

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - UCS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS - CARVI  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANDERSON LUIS SBISESKI BOSCHI**

**PROJETO E ANÁLISE DO CONCENTRADOR J-FEN 2D VOLTADO À  
FACHADAS VERTICAIS DE EDIFICAÇÕES**

**BENTO GONÇALVES**

**2020**

**ANDERSON LUIS SBISESKI BOSCHI**

**PROJETO E ANÁLISE DO CONCENTRADOR J-FEN 2D VOLTADO À  
FACHADAS VERTICAIS DE EDIFICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de TCC II, ao curso de graduação em Engenharia Mecânica no Campus Universitário de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Tiago Cassol Severo

**BENTO GONÇALVES**

2020

ANDERSON LUIS SBISESKI BOSCHI

**PROJETO E ANÁLISE DO CONCENTRADOR J-FEN 2D VOLTADO À  
FACHADAS VERTICAIS DE EDIFICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de TCC II, ao curso de graduação em Engenharia Mecânica no Campus Universitário de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Tiago Cassol Severo

**Aprovado em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_**

**Banca examinadora**

---

Prof. Me. Tiago Cassol Severo

Orientador / Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Me. Heston Silveira

Professor convidado / Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Me. Jean Greselle Balotin

Professor convidado / Universidade de Caxias do Sul

## AGRADECIMENTOS

Passamos por muitas etapas na vida, e cada uma delas nos marca de diferentes formas. Esta, sem sombra de dúvidas, foi muito especial e essencial, pois foi nela que obtive crescimento pessoal, experiências novas e muito aprendizado, foi nesta etapa que horizontes se abriram e pude enxergar quão grandiosa e intensa é a vida.

Agradeço primeiramente a **Deus**, a quem devo minha vida, por tudo o que conquistei, por ter me concedido poder realizar este sonho, pela fé e coragem que me transmitiu em todos os momentos de dificuldade, até este último.

De forma especial, agradeço ao meu pai **Luis Boschi** e a minha mãe **Marili Boschi**, os quais, com certeza, foram essenciais nesta etapa, pois não mediram esforços para me apoiar e me deram forças para enfrentar as dificuldades. Agradeço pela paciência e pela compreensão. Muito obrigado pela motivação e por acreditarem que eu poderia chegar até aqui. Hoje comemoramos esta vitória juntos, pois esta conquista também é de vocês!

A minha irmã **Luana Boschi**, que sempre se fez presente em minha vida, aconselhando-me e ajudando-me, acreditando no meu potencial e incentivando-me a continuar. Muito obrigada é pouco por toda a ajuda e a paciência que tu tiveste e tens comigo. Com certeza tu fazes parte desta conquista, e minha gratidão será eterna!

A Universidade de Caxias do Sul, pela oportunidade de realização do curso de Engenharia Mecânica!

A todos os professores, que durante a graduação compartilharam seus conhecimentos e ensinamentos. Em especial ao professor **Tiago Cassol Severo**, orientador do trabalho de conclusão de curso, sempre presente e atencioso, nos dando suporte para o que precisasse.

Aos futuros colegas de profissão que, além de se tornarem amigos, foram aqueles com quem compartilhei experiências, momentos bons e momentos em que foi necessário um ombro amigo. Além disso, agradeço por compartilharem do mais importante ensinamento, que é o saber aprender a viver e conviver com as diferenças. O mundo nos espera de braços abertos!

Por fim, minha gratidão a todos os que colaboraram de uma forma ou outra para a concretização de mais este grande sonho. Meus sinceros agradecimentos!

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o projeto e análise do módulo concentrador de energia solar J-FEN 2D, visando uma maior concentração da radiação solar sobre painéis solares bifaciais a ser instalado em fachadas verticais de edificações com radiação solar disponível. O concentrador é composto inicialmente por um plano refletor em aço INOX e a radiação solar refletida pela estrutura do concentrador chega à face posterior das células solares, alcançando uma maior concentração de energia. Raios solares serão projetados (*Ray Tracing*) em um software de modelagem computacional para definir o perfil geométrico do concentrador. Posteriormente, foi executado o processo de confecção do concentrador J-FEN 2D conforme parâmetros estabelecidos e geometrias determinadas. Com o projeto do perfil do concentrador, o protótipo foi construído em dimensões proporcionais a um receptor baseado em células solares monofaciais de 3.0 cm de largura com 5.0 cm de comprimento e serão apresentadas no decorrer do estudo. Com o protótipo finalizado, foram executados testes em bancada e testes de exposição à radiação solar em dias de céu limpo, com o objetivo de aferir a concentração do J-FEN 2D. Seus resultados foram utilizados para simular numericamente, um sistema instalado em uma fachada de um prédio residencial para a região de Bento Gonçalves. Os resultados foram analisados e assim simulado o ganho de energia em uma implementação em casos reais, onde foi obtido um ganho médio em geração de energia de até 97% do concentrador J-FEN 2D em relação a um painel monofacial.

**Palavra-chave:** Concentrador 2D, células bifaciais, fachadas de prédio.

## ABSTRACT

This present work aims at the design and analysis of the J-FEN 2D solar energy concentrator module, searching for a higher concentration of solar radiation on bifacial solar panels that will be installed on the vertical facades of buildings using available solar energy. The concentrator consists of one reflector body made of stainless steel and the solar radiation reflected in the structure of the concentrator hits the back face of the solar cells, achieving a greater concentration of energy. Sunrays will be projected (*Ray Tracing*) in computational modeling software to define the geometric profile of the concentrator. Subsequently, the process of making the J-FEN 2D concentrator will be executed, according to the requirements and the necessary geometries. After the design of the concentrator profile, a prototype was created in proportional dimensions a receiver based on 3.0 cm wide, 5.0 cm long monofacial solar cells will be used during the study. After the prototype is completed, stand tests will be performed to test the concentration of the J-FEN 2D and its results will be used to simulate a system installed on a facade of a residential building for a specific region. The results will be evaluated and will estimate the feasibility of its implementation in real cases, where an average gain in energy concentration of up to 97% of the J-FEN 2D concentrator was obtained compared to a monofacial panel.

**Keyword:** 2D concentrator, bifacial cells, building facades.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Ranking estadual de geração distribuída .....	18
Figura 2 - Imagem esquemática de um corpo negro .....	20
Figura 3 - Componentes da radiação na superfície terrestre do Rio Grande do Sul .....	21
Figura 4 - Ilustração de um concentrador refletor .....	22
Figura 5 - Ilustração de um concentrador refrator .....	22
Figura 6 - Células, módulos e arranjos (NASA) .....	23
Figura 7 - Junção pn entre o material tipo p e o tipo n .....	25
Figura 8 - Representação de receptores bifaciais e monofaciais .....	26
Figura 9 - Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede .....	27
Figura 10 - Otimização no processo de assimetria do concentrador .....	29
Figura 11 - Experimento realizado em laboratório utilizando o simulador solar Oriel .....	30
Figura 12 - Configuração de simulação OptisWorks (1) fonte de luz (2) raios de luz e (3) concentrador em calha V .....	32
Figura 13 - Simulação de traçado de raios para o design ideal do concentrador em calha V. ....	33
Figura 14 - Construção do perfil CPC a partir do princípio do raio de borda .....	34
Figura 15 - Concentrador 2D em formato de calha com vidro na parte superior e PV na parte inferior .....	35
Figura 16 - Concentrador 3D com aberturas poligonais de 4, 5, 6, 8, 12 lados e CPC contornado ( $n = \infty$ ) .....	35
Figura 17 - Esquema representativo da abertura angular $\theta$ .....	38
Figura 18 - Painel Solar Fotovoltaico Swan Bifacial 60H 320-340 Watt .....	40
Figura 19 - Método de projeção dos raios .....	41
Figura 20 - Representação da reflexão dos raios solares .....	41
Figura 21 - Concentrador conforme inclinação estipulada .....	44
Figura 22 - Projeção dos raios que passam pela abertura .....	45
Figura 23 - Renderização do concentrador J-FEN 2D .....	45
Figura 24 - Procedimento de dobra do perfil concentrador .....	47
Figura 25 – Protótipo montado do módulo concentrador J-FEN 2D .....	48
Figura 26 - Comparação do perfil do protótipo J-FEN 2D com seu projeto teórico ...	48
Figura 27 - Teste óptico do concentrador J-FEN 2D .....	49
Figura 28 - Condições de contorno para testes de concentração .....	50

Figura 29 - Posicionamento do concentrador para teste elétrico em 90° .....	51
Figura 30 - Gráficos da relação de potência entre a célula frontal em função da posterior posição 90° .....	52
Figura 31 - Gráficos da relação de potência entre a célula frontal em função da posterior posição 6° .....	53
Figura 32 - Gráficos da relação de potência entre a célula frontal em função da posterior posição 48° .....	54



## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Espectro eletromagnético e os regimes .....	19
Tabela 2 - Concentração média da célula posterior em relação a célula frontal .....	54
Tabela 3 - Características dos painéis analisados .....	55
Tabela 4 - Comparativo de ganho de energia .....	56
Tabela 5 - Comparativo das quantidades de painéis .....	58

## **LISTAS DE SIGLAS**

<b>ABSOLAR</b>	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>J-FEN 2D</b>	Módulo concentrador bifacial

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2.3	JUSTIFICATIVA.....	16
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
3.1	ENERGIA SOLAR.....	17
3.2	RADIAÇÃO SOLAR .....	18
<b>3.2.1</b>	<b>Corpo negro</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Radiação difusa</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Radiação direta</b> .....	<b>21</b>
3.3	CONCENTRADOR SOLAR .....	21
3.4	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	23
<b>3.4.1</b>	<b>Painéis solares monofaciais e bifaciais</b> .....	<b>23</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Conexão em rede elétrica</b> .....	<b>26</b>
3.5	ESTADO DA ARTE .....	27
<b>3.5.1</b>	<b>Análise de projeto, otimização e desempenho de um concentrador – PV do tipo janela com sistema assimétrico para a aplicação na parede sul do edifício.</b> 27	
<b>3.5.2</b>	<b>Projeto ideal do concentrador em V para aplicações fotovoltaicas</b> ...	<b>30</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Uma revisão sobre o recente progresso da pesquisa no composto parabólico concentrador CPC para aplicações de energia solar</b> .....	<b>33</b>
3.5.3.1	Princípios de design do CPC.....	34
3.5.3.2	Considerações de design no material .....	36
3.5.3.3	Geometria solar e sistema de rastreamento.....	36
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>38</b>

4.1	MÉTODO DE TRAÇADO DE RAIOS.....	38
4.2	DEFINIÇÕES DO CONCENTRADOR J-FEN 2D.....	39
<b>4.2.1</b>	<b>Desenvolvimento do Perfil do Concentrador J-FEN 2D .....</b>	<b>39</b>
4.3	SIMULAÇÃO DOS GANHOS DO CONCENTRADOR J-FEN 2D .....	42
4.4	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO J-FEN 2D .....	42
4.5	TESTES DO CONCENTRADOR J-FEN 2D .....	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>44</b>
5.1	DEFINIÇÕES DO PROTÓTIPO CONCENTRADOR J-FEN 2D .....	44
5.2	FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO PERFIL DO CONCENTRADOR J-FEN 2D	46
5.3	FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO MÓDULO CONCENTRADOR J-FEN 2D 47	
5.4	RESULTADO DO TESTE ÓPTICO .....	49
5.5	RESULTADOS DO TESTE ELÉTRICO.....	50
5.6	RESULTADO DE CONCENTRAÇÃO DO J-FEN 2D EM TRÊS INCLINAÇÕES .....	52
5.7	COMPARAÇÃO DOS PAINÉIS SOLARES .....	55
5.8	COMPARAÇÃO DO J-FEN 2D COM PAINEL BIFACIAL SWAN 325WP EM RELAÇÃO À UM PAINEL MONOFACIAL DA MESMA POTÊNCIA.....	55
5.9	GANHO EM QUANTIDADE DE PAINÉIS EM UMA APLICAÇÃO EM UM EDIFÍCIO COMERCIAL .....	57
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>60</b>
	APÊNDICE A - DADOS DAS MEDIÇÕES NA POSIÇÃO 1 EQUIVALENTE A 90°.....	62
	APÊNDICE B - DADOS DAS MEDIÇÕES NA POSIÇÃO 2 EQUIVALENTE A 6°.....	63
	APÊNDICE C - DADOS DAS MEDIÇÕES NA POSIÇÃO 3 EQUIVALENTE A 48° ....	64
	ANEXO A - CARACTERÍSTICAS PAINEL 335W – UPSOLAR UP-M335P .....	65

ANEXO B - CARACTERISTICAS PAINEL SWAN BIFACIAL 60H 320-340 WATT ....	66
ANEXO C - CARACTERISTICAS PAINEL SWAN BIFACIAL 60H 310-330 WATT ....	67
ANEXO D - RADIAÇÃO SOLAR PARA O MÊS DE OUTUBRO .....	68
ANEXO E - RADIAÇÃO SOLAR PARA O MÊS DE NOVEMBRO .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população e o aumento da necessidade de fontes energéticas para abastecer indústrias, a necessidade mundial de energia têm uma projeção cada vez mais elevada. Em função disso, é possível preencher essa necessidade com a introdução de novas fontes de energia. E assim, o crescimento na utilização de energia permite que as fontes menos usuais tenham oportunidade de se mostrar competitivas, e as que apresentarem maior eficiência podem se tornar predominantes (BONATTO, 2019)

A procura por fontes de energia caracterizadas por serem limpas e renováveis deu origem ao desenvolvimento de diferentes tecnologias, como o aproveitamento da radiação solar. Hoje em dia, já existem vários métodos para obter um melhor aproveitamento da energia solar. Os módulos fotovoltaicos são exemplos a serem apontados (JACOBSON; DELUCCHI, 2001).

Os módulos fotovoltaicos, apresentam como característica a capacidade de conversão da radiação solar em energia elétrica. Aplicação desses sistemas obtiveram um crescimento considerável no decorrer dos últimos anos, no entanto ainda apresentam limitada difusão no Brasil. Um desafio presente da energia solar é ser competitivo quando comparado a tecnologias tradicionais, ou seja, fazer com que o custo de instalação e operação, sejam mais viáveis e compensem a economia gerada em relação às tecnologias energéticas mais utilizadas atualmente. Assim, painéis solares com tecnologia baseada em células bifaciais, isto é, ativas em ambas as faces, podem proporcionar maior competitividade aos sistemas baseados em energia solar (SEVERO et. al., 2005), (TIAN, 2018).

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento, o projeto e a fabricação do protótipo concentrador solar J-FEN 2D, projetado a partir da ótica não formadora de imagem, composto por células solares bifaciais, que são ativas em ambas as faces.

Este trabalho tem início no capítulo dois, onde estão descritos os objetivos e justificativas para esse estudo.

No capítulo três, consta a fundamentação teórica, onde é apresentado de uma maneira geral, como é o funcionamento de um sistema fotovoltaico e o estado da arte, onde foram coletadas informações para o desenvolvimento do estudo deste trabalho.

No capítulo quatro, apresenta-se a metodologia, desde o traçado de raios para a definição de um perfil refletor, até a montagem final do protótipo concentrador J-FEN 2D.

No capítulo cinco, são apresentados os resultados e análises obtidas através deste estudo.

No capítulo seis, são apresentadas as conclusões e sugestões de continuidade do estudo voltado à concentração de energia, através do protótipo concentrador J-FEN 2D.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o concentrador J-FEN 2D sobre painéis solares bifaciais integrado à fachada de edifícios buscando o maior aproveitamento do recurso solar.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Projetar um concentrador bidimensional, de maneira a obter aumento da concentração da radiação solar sobre painéis solares bifaciais, instalados em fachadas de edifícios;

b) Simular os resultados de concentração óptica e de geração de energia elétrica do J-FEN 2D;

c) Construir um protótipo do concentrador J-FEN 2D proporcionais as células solares disponíveis para testes de bancada;

d) Comparar os resultados simulados do J-FEN 2D com os resultados medidos em testes de bancada;

### 2.3 JUSTIFICATIVA

Um dos desafios que os sistemas de captação de energia fotovoltaica enfrentam atualmente é tentarem ser competitivos em comparação as tecnologias tradicionais. Dessa forma, um concentrador solar pode ser uma alternativa para potencializar a captação de raios solares, aumentando assim a capacidade da geração de energia elétrica em comparação aos sistemas fotovoltaicos convencionais. Com isso, estudos aprofundados na área de geração de energia solar serão necessários, onde o incremento de concentradores solares se justifica.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 ENERGIA SOLAR

Ao longo dos últimos anos, devido ao aumento populacional, muitos países têm sofrido ao enfrentar problemas energéticos e analisado seus impactos na humanidade. Esses impactos vão de questões que tratam de segurança energética, passando pelas questões econômicas dos países, juntamente com a questão da sustentabilidade, onde se almeja a maior produção de energia, com os menores impactos ambientais e ecológicos possíveis (HODGE, 2018).

Na busca por padrões energéticos fundamentados em uma ideia de sustentabilidade, se evidenciou a necessidade de engajar a população e incentivar o desenvolvimento de estudos voltados as fontes de energias renováveis que estão disponíveis. Dentro desses estudos e possibilidades de energias sustentáveis, se faz presente a energia solar fotovoltaica e é através dela que se apresenta uma alternativa, para o uso na obtenção de energia elétrica (JACOBSON; DELUCCHI, 2001).

A tecnologia solar fotovoltaica aplicada em telhados, fachadas e terrenos, com a finalidade de gerar energia distribuída, reúne os atributos rentáveis e sustentáveis dos problemas cotidianos. Com os custos cada vez mais acessíveis e atrativos, ficam cada vez mais próximos de diferentes camadas sociais, encontrando um amplo apoio e interesse de todas as classes socioeconômicas.

No Brasil o recurso solar é mais abundante do que em outros países, porem, ainda há um atraso na geração de energia solar fotovoltaica distribuída, já que hoje possui somente 200 mil sistemas instalados no país, em que o potencial de consumo ultrapassa os 84 milhões de pessoas e consumidores que poderiam ser beneficiados com essa tecnologia (ABSOLAR, 2020).

Segundo dados da ABSOLAR, entre 2012 e 2019, este setor gerou mais de 130 mil empregos no Brasil e estão projetados para 2020 uma geração de 120 mil novos empregos. No Ranking Estadual de geração distribuída, o Rio Grande do Sul ocupa a terceira posição referente a potência instalada (MW) gerando 503,7 MW que equivalem a 12,5% da geração nacional, conforme Figura 1.

Figura 1 - Ranking estadual de geração distribuída



Fonte: Adaptado de infográfico ABSOLAR 2020

### 3.2 RADIAÇÃO SOLAR

O Sol é a fonte de energia solar na terra, localizando-se a  $1,5 \times 10^{11}$  m da terra, possui um diâmetro equivalente a  $1,39 \times 10^9$  m. A constante solar, definida como fluxo de energia solar incidente na superfície tem um valor médio de  $1.353 \text{ W/m}^2$  considerando a borda externa da atmosfera. No entanto, para as aplicações terrestres, o importante é o fluxo solar que incide na superfície terrestre, após os raios solares atravessarem a atmosfera. O fluxo solar extraterrestre tem uma distribuição espectral aproximada a radiação encontrada em um corpo negro, equivalente a  $5.800 \text{ K}$ , mas não a mesma potência de emissão de um corpo negro (HODGE, 2018).

A compreensão da energia solar baseia-se na familiaridade com a natureza espectral da radiação solar. Do ponto de vista da energia solar, as áreas que interessam são duas: As características provenientes do Sol e a resposta de uma superfície a esta energia. Deve-se considerar a transferência de calor por radiação como ponto de partida. O transporte de fótons ou propagação de uma onda eletromagnética pode ser definida como radiação térmica. Para que ocorra a propagação da radiação em um meio há uma relação entre a frequência e o comprimento da onda (HODGE, 2018). Onde  $c$  é a velocidade da luz no meio,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $f$  é a frequência.

O espectro eletromagnético é dividido em diferentes regimes e em função do comprimento de onda. Os regimes e faixas de comprimento de onda são delineados conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Espectro eletromagnético e os regimes

Regime	Faixa
Raios gama	$\lambda < 10^{-4} \mu\text{m}$
Raios X	$10^{-4} < \lambda < 10^{-2} \mu\text{m}$
Ultravioleta	$10^{-2} < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$
<b>Rádiação térmica</b>	<b><math>10^{-1} &lt; \lambda &lt; 10^2 \mu\text{m}</math></b>
Infravermelho	$0,7 < \lambda < 10^2 \mu\text{m}$
Micro-ondas	$\lambda < 10^2 \mu\text{m}$

Fonte: Adaptado de Sistemas e aplicações de energia alternativa

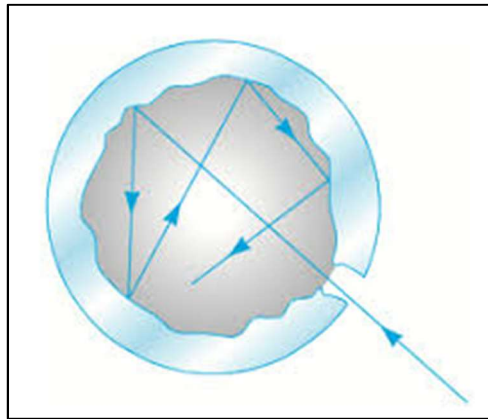
Para a engenharia solar, o que mais interessa é a radiação na faixa de onda  $10^{-1} < \lambda < 10^2 \mu\text{m}$ . A porção visível do espectro fica na faixa de  $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$  sendo limitado pelo ultravioleta e o infravermelho (HODGE, 2018).

### 3.2.1 Corpo negro

Corpo negro é definido como um meio ou substância que absorve toda energia incidente sobre ele, onde nenhuma parte da radiação incidente é refletida ou transmitida. Ele absorve toda radiação incidente, independentemente da direção e do comprimento da onda fazendo dele um emissor difuso. Para temperaturas e comprimentos de onda prescritos, nenhuma outra superfície consegue emitir mais energia que um corpo negro (HALLIDAY et. Al., 1995).

Um objeto onde a radiação térmica depende somente da temperatura e não do estado da superfície, do material ou de qualquer outro parâmetro. Pode-se efetuar a fabricação de um corpo negro, criando uma cavidade interior em um objeto e mantendo uma uniformidade da temperatura das paredes da cavidade. Os átomos das paredes da cavidade oscilam por possuírem energia térmica, fazendo com que sejam emitidas ondas eletromagnéticas, a radiação térmica. Para obter uma amostra dessa radiação é feito um furo na parede, o que permite que uma pequena fração de radiação escape para ser medida. Porém se o furo for suficientemente pequeno, a fração que escapa não será suficiente para alterar a radiação no interior da cavidade conforme Figura 2 (HALLIDAY et. Al., 1995).

Figura 2 - Imagem esquemática de um corpo negro



Fonte: Adaptado de Fundamentos da Física 4

### 3.2.2 Radiação difusa

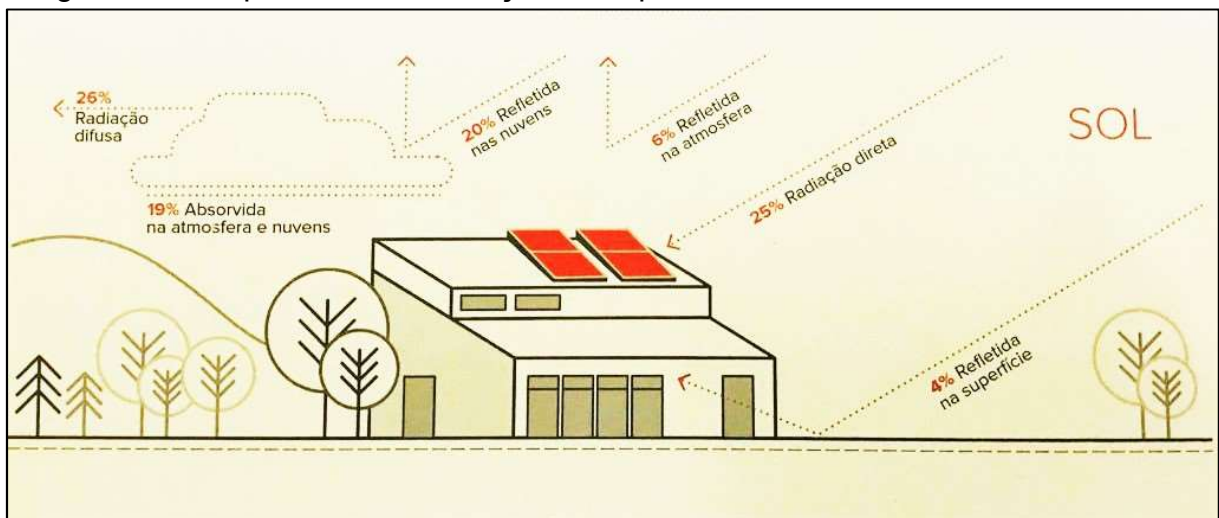
A componente difusa da radiação solar se origina com a interação entre a radiação solar e as partículas que compõem a atmosfera terrestre. O espelhamento e a absorção são dois processos reativos a transferência radiativa da atmosfera terrestre. O processo de absorção molecular é dependente do estado de energia molecular, ocorrendo a absorção da radiação durante a transição de um estado de energia para o outro. A absorção se dá quando um certo componente atmosférico remove parte da energia incidente convertendo ela em energia interna. Esse processo ocorre somente para comprimentos discretos de ondas, ou seja, cada componente atmosférico absorve radiação em um determinado comprimento de onda. Os principais componentes do ar seco que absorvem radiação solar na região espectral mais significativa, conforme o fluxo solar passa pela atmosfera, são oxigênio ( $O_2$ ), ozônio ( $O_3$ ), vapor d'água ( $H_2O$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (SANTOS; COSTA, 2018).

O processo de espelhamento é um caso particular de difusão da radiação e geralmente está associado às posições irregulares das partículas em um gás. No processo, as partículas comportam-se como fontes secundárias de radiação e não se verifica a seletividade espectral. O processo é repetido, a radiação se espalha por uma molécula e pode ser novamente espalhada por outra, dando origem ao que se chama de múltiplos (SANTOS; COSTA, 2018).

### 3.2.3 Radiação direta

A radiação solar direta equivale a porção de radiação que penetrou a atmosfera terrestre sem ter sido dispersa ou absorvida. Essa porção de radiação está na direção do ângulo zenital. Na Figura 3, uma ilustração das componentes da radiação atuando sobre a superfície terrestre (SANTOS; COSTA, 2018).

Figura 3 - Componentes da radiação na superfície terrestre do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de Atlas solar do Rio Grande do Sul

### 3.3 CONCENTRADOR SOLAR

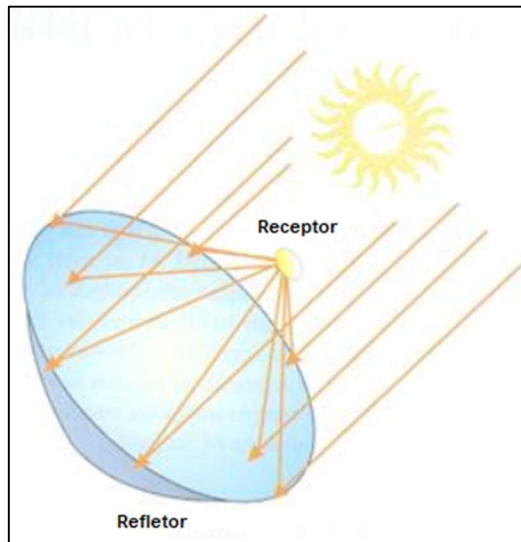
Desde o início dos anos 70, após o choque do petróleo, as pesquisas sobre a utilização de concentradores fotovoltaicos tem se intensificado. Principalmente pesquisas para avaliar concentradores fotovoltaicos com configurações refletoras e refratoras, bem como diferentes sistemas de rastreamento. Nas décadas seguintes as células de multijunção obtiveram um desenvolvimento, sendo que no início da década de 2010, se obteve um aumento da capacidade instalada, de modo que hoje há um pico de mais de 330 MW de potência instalada (SANTOS; COSTA, 2018).

Os concentradores fotovoltaicos utilizam espelhos ou lentes como meio para concentrar a energia do Sol em células fotovoltaicas. Isso permite uma considerável redução nas áreas de células requeridas para conseguir produzir uma determinada quantidade de potência. Em geral as células constituem a parte de maior custo do módulo, e com isso pode se proporcionar uma redução no custo global, quando se

substitui uma área de células de custo elevado por uma área com material ótico mais barato.

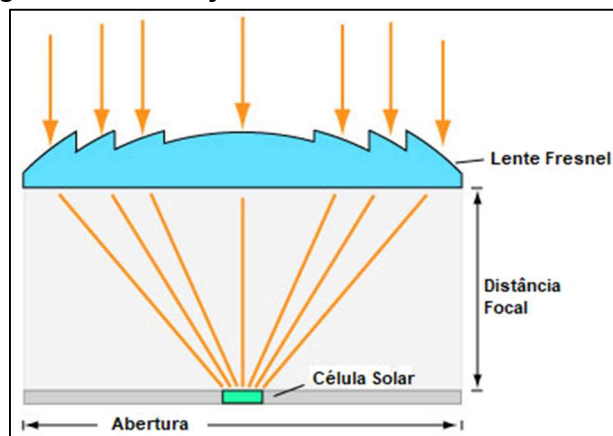
Há diferentes parâmetros de análises e configurações de concentradores, uma das principais, é a razão de concentração entre a área da abertura do módulo e a área da célula. Para sistemas estáticos essa razão de concentração varia de 2 a 4, em sistemas com rastreamento em um eixo, a razão de concentração pode variar de 10 a 40, podendo chegar a razões de concentração superiores a 1000 em sistemas com mecanismo de rastreamento em dois eixos. A forma de concentração pode variar havendo sistemas refletores ou refratores conforme Figura 4 e Figura 5 respectivamente (SANTOS; COSTA, 2018).

Figura 4 - Ilustração de um concentrador refletor



Fonte: Adaptado de Fundamentos da Física 4

Figura 5 - Ilustração de um concentrador refrator



Fonte: Adaptado de Fundamentos da Física 4

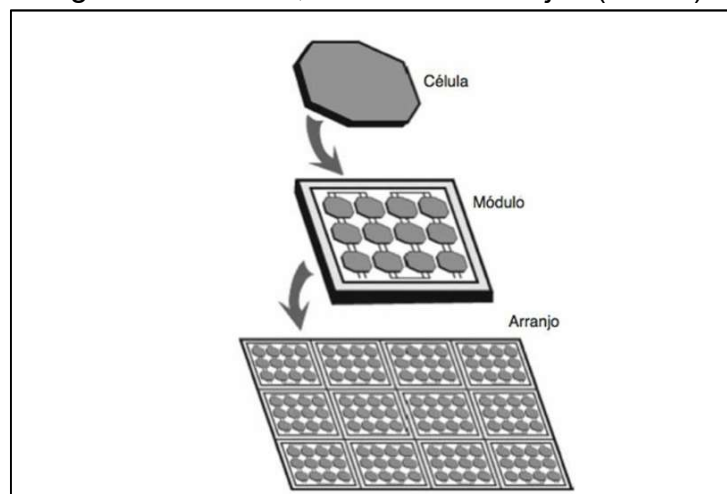
### 3.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Sistemas fotovoltaicos estão dispostos em uma ampla gama de funções e tamanhos. As duas principais classificações de sistemas fotovoltaicos são: as independentes que não são conectadas a rede elétrica e, as integradas, que são conectadas a rede elétrica. De uma maneira crescente e em uma hierarquia de funcionalidade, os sistemas fotovoltaicos são: diretamente acoplado; sistema com armazenamento em baterias; sistemas com energia reserva (Gerador); sistemas de energia híbrida; sistemas conectados à rede elétrica; sistemas para a produção de energia elétrica (HODGE, 2018).

#### 3.4.1 Painéis solares monofaciais e bifaciais

Independentemente do tipo de sistema fotovoltaico que esteja sendo considerado, o elemento fundamental é a célula fotovoltaica elemento básico do módulo fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos são montados a partir das células individuais principalmente de silício monocristalino ou policristalino, podendo ser dopado com fósforo e boro para formação da junção PN e possibilitar a geração de eletricidade. São montados em arranjos, os quais são integrados em sistemas com diversos componentes, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Células, módulos e arranjos (NASA)



Fonte: Adaptado de Sistemas e aplicações de energia alternativa

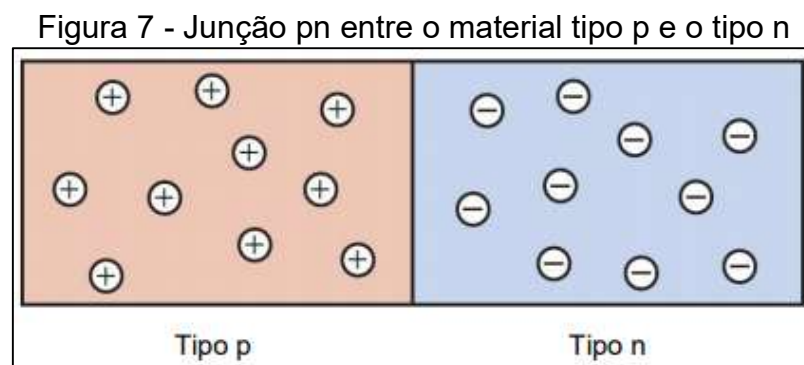
Na primeira parte da imagem é representada a célula solar e apresenta as informações de materiais, tamanhos empregados e detalhes construtivos. No centro da imagem representando o módulo, esboça a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito entre outras informações tais como tensão, corrente, potência e eficiência na potência máxima de diferentes classes de células solares.

A construção dos módulos se dá pelo arranjo em série e em paralelo das células fotovoltaicas. Essas configurações respeitam as mesmas regras do circuito DC, para componentes idênticos arranjados em série, as tensões apresentam uma corrente constante, para componentes idênticos arranjados em paralelo, as correntes apresentam uma tensão constante (HODGE, 2018).

O efeito fotovoltaico se dá pela conversão direta de energia solar em energia elétrica. Sendo observado pela primeira vez em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, enquanto realizava experimentos de eletroquímica, onde eletrodos submersos em solução eletrolítica e expostos à luz, dava origem a uma diferença de potencial entre eles. Aproximadamente quatro décadas depois, em 1870, esse efeito foi evidenciado em um material sólido, o selênio. Células solares convertem a radiação solar em energia elétrica mediante o efeito fotovoltaico e estão baseadas nas características físicas apresentadas por materiais semicondutores. Tal tecnologia que domina o mercado hoje está baseada em lâminas de silício cristalino. Isto ocorre pela abundância deste elemento na Terra, considerando esse elemento uma fonte inesgotável de matéria-prima, e pela vasta experiência que a indústria já possui trabalhando com este material. Os átomos de silício, na formação do sólido cristalino, se unem através de ligações covalentes. Ao ser excitado, o elétron da banda de valência passa para a de condução, se tornando livre e podendo se mover pela rede cristalina e deixando uma lacuna em sua posição original. Esta lacuna pode ser vista como uma partícula carregada positivamente. Atualmente, também estão em desenvolvimento, dispositivos fotovoltaicos fabricados em filmes finos. Estas são combinações de materiais distintos como telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio, gálio e selênio (Cu[In,Ga]Se<sub>2</sub> ou CIGS), disseleneto de cobre e índio (CuInSe<sub>2</sub> ou CIS), e arsenieto de gálio (GaAs), com as camadas formando ligas e espessura da ordem de micrometros. Porém, possuem custo de fabricação elevado ou baixa eficiência. Lâminas de silício do tipo n e tipo p são a base das células solares. Durante o processo de crescimento da estrutura cristalina do semicondutor, por meio



das técnicas Czochralski (Si-Cz) ou fusão zonal flutuante (Si-FZ), são incorporadas ao silício, impurezas doadoras ou aceitadoras em pequena quantidade. Partindo de uma das superfícies da lâmina de silício, um dopante diferenciado daquele que forma a base é difundido formando a junção pn conforme esquematizado na Figura 7. As lacunas são os portadores de maior parte da carga no silício tipo p, enquanto que, no silício tipo n, os elétrons são os portadores de maior parte da carga. Com isto, no limite entre as diferentes regiões de dopantes, originasse um campo elétrico no sentido do silício tipo n para o silício tipo p (BIAZETTO, 2019).

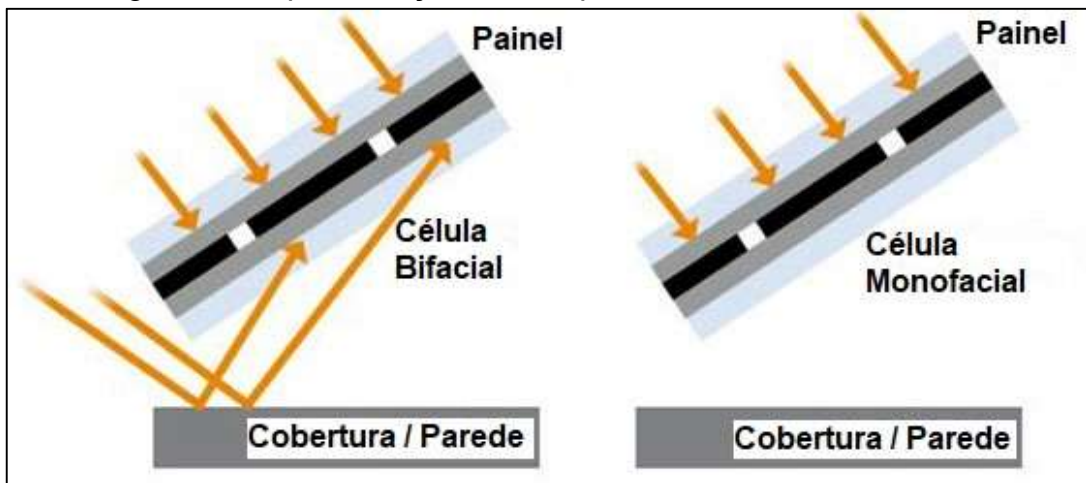


Fonte: (BIAZETTO, 2019).

Células solares bifaciais de silício, são projetadas e fabricadas de maneira que em ambas as faces possam atuar como conversor de energia solar. A radiação solar, direta e difusa, é coletada nas suas duas superfícies, frontal e posterior, e convertida em energia elétrica. Dessa maneira, os dispositivos têm o dobro de área útil (BIAZETTO, 2019), enquanto que as células solares monofaciais geralmente possuem sua face posterior totalmente recoberta com uma pasta de alumínio, dessa forma, apenas a face frontal é capaz de atuar como coletor de radiação solar e converter em energia elétrica, conforme ilustrado na Figura 8.

Com pesquisas em desenvolvimento desde a década de 1960, quando utilizadas pela indústria espacial para o fornecimento de energia elétrica em satélites, células solares bifaciais apresentam inúmeras vantagens com relação às monofaciais. Devido à combinação de incidência da radiação solar em suas superfícies frontal e posterior, melhoram a potência dos módulos fotovoltaicos. Com isso pode se obter um aumento de até 50 % no que diz respeito à produção de energia elétrica por módulo fotovoltaico, utilizando um dispositivo de concentração permitindo o aumento na radiação (BONATTO, 2019).

Figura 8 - Representação de receptores bifaciais e monofaciais



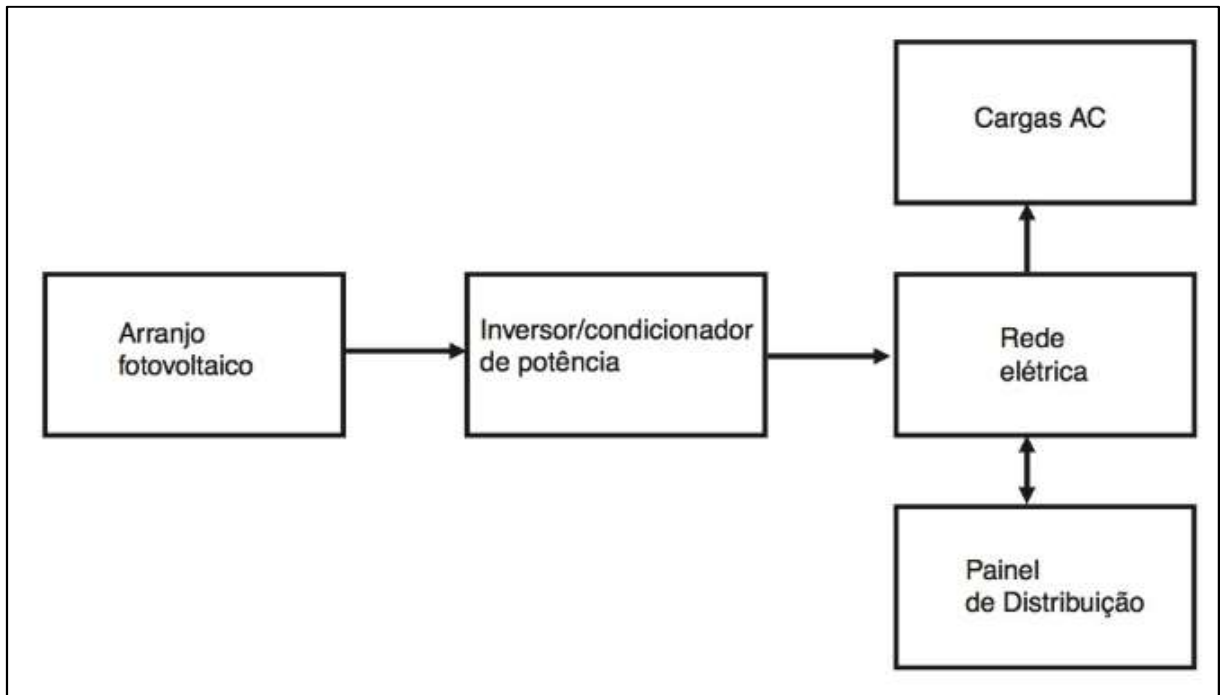
Fonte: Adaptado Tritec intervento

### 3.4.2 Conexão em rede elétrica

Em sistemas de conexão com a rede elétrica, os módulos fotovoltaicos são responsáveis pela captação da energia da luz solar. Esses painéis contêm um conjunto de células solares que convertem a luz em energia, passando pelo inversor solar que é o responsável por converter essa energia gerada pelos painéis solares de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), ou seja, o inversor é fundamental para que você possa usar a energia fotovoltaica para alimentar os utensílios elétricos que se usa no dia a dia.

No caso de um sistema ligado à rede elétrica, a estrutura de taxas de serviço público pode ser economicamente limitadora, ou seja, caso for exigido uma elevada tarifa ou penalidades quando a rede de energia elétrica for utilizada, cada kWh de energia elétrica pode ter um custo excessivo. Sistemas fotovoltaicos podem ser empregados para fornecer eletricidade à rede elétrica. Um sistema esquemático de sistema fotovoltaico conectado à rede está ilustrado pela Figura 9. Para qualquer sistema fotovoltaico conectado à rede, a energia dos arranjos deve ser compatível com os parâmetros de fase, frequência e tensão da rede (HODGE, 2018).

Figura 9 - Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Adaptado de Sistemas e aplicações de energia alternativa

### 3.5 ESTADO DA ARTE

A técnica de utilização de concentradores solares busca gerar a intensificação dos raios solares em um local pré-determinado. Estudos realizados por cientistas indicam que o emprego de concentradores de energia solar reduz consideravelmente despesas de uma instalação solar, visto que, por possuírem a capacidade de amplificar e intensificar a radiação solar, reduz a necessidade de um aumento das áreas de células fotovoltaicas para gerar uma certa demanda de energia.

Concentradores solares tem a capacidade de coletar e direcionar um valor significativamente maior de energia solar que incide nas células, utilizando lentes ópticas, abas ou parábolas com materiais reflexivos.

#### 3.5.1 Análise de projeto, otimização e desempenho de um concentrador –PV do tipo janela com sistema assimétrico para a aplicação na parede sul do edifício. (XUAN, 2019).

Ao analisar o projeto foi apresentado o desenvolvimento de uma janela tipo PV para a construção e integração da parede sul de um edifício, que fornece uma solução

para a crise energética e o problema da poluição ambiental. Assim, neste artigo, um concentrador assimétrico é proposto e através do processo simples de otimização da matriz do concentrador assimétrico-PV, pode ser projetado um tipo de janela, que fornece a geração de eletricidade e incorpora a função de iluminação natural ao mesmo tempo.

O uso do concentrador tipo BICPV (concentrador fotovoltaico integrado ao edifício) é uma etapa chave, que substitui o material da célula fotovoltaica de maior custo, pelo material dielétrico de menor custo. O BICPV oferece muitas vantagens sobre os tradicionais dispositivos fotovoltaicos planos, como: maior eficiência de conversão elétrica nas células fotovoltaicas, melhor aproveitamento do espaço, facilidade de reciclagem de constituintes materiais e uso reduzido de produtos tóxicos envolvidos nas células fotovoltaicas. Além do mais, com o uso de material transparente, permite maiores variações de design, incorporando as funções de geração de eletricidade e luz do dia, fornecendo a arte de construção mais bonita. Com o rápido desenvolvimento da civilização moderna nas cidades, existe a necessidade de implantação de sistemas multifuncionais de concentração, proporcionando uma melhor arte para arquiteturas modernas e tornando-se cada vez mais urgente. Através da revisão de literatura, existem vários desafios para coletores BICPV / D para a integração da parede sul do edifício no projeto estágio: em particular, é necessário encontrar um arranjo óptico adequado. Considerando a integração da parede sul do edifício, os concentradores exigiram um maior grau de aceitação. Para os sistemas de concentração instalados na cobertura do edifício, não há diferença em relação à instalação no solo. Portanto, a energia solar estática de concentradores com taxas de concentração média a baixa seriam suficientes para confirmar a operação do ano inteiro. No entanto, a área de maior disponibilidade nas regiões da cidade é a parede sul do edifício, visto que as cidades estão crescendo e dispondo de menores áreas livres. Assim, é mais prático desenvolver dispositivos multifuncionais de concentração para a aplicação na parede sul do edifício.

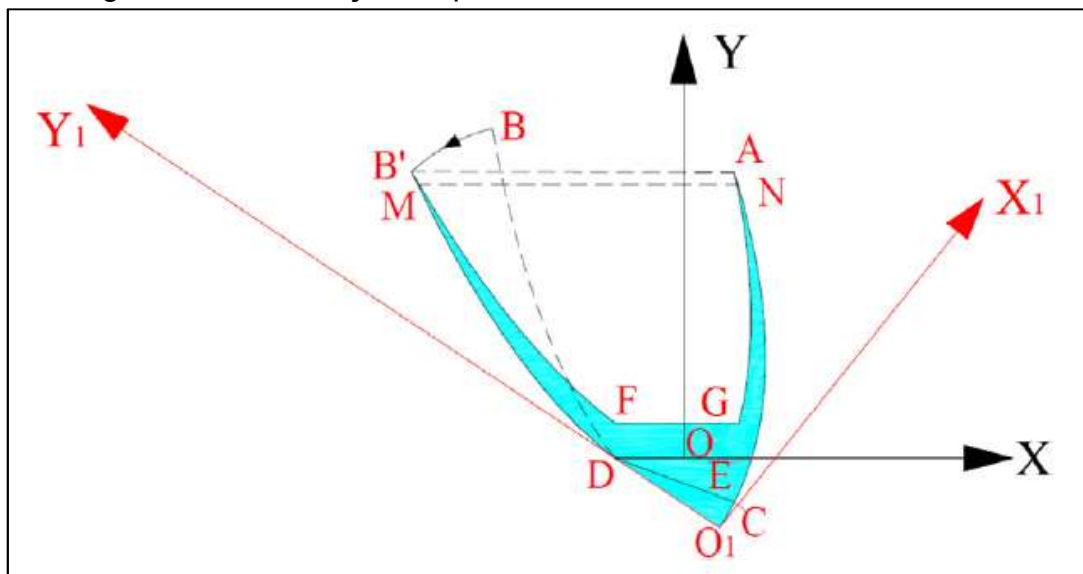
A saída do sistema BICPV depende dos seguintes fatores:

- (1) A disponibilidade e acesso à radiação solar, conforme determinado pelo clima, inclinação, latitude, orientação e ambiente livre disponíveis pela superfícies da construção;
- (2) Sombreamento parcial;

- (3) Eficiência fotovoltaica e sua degradação com o tempo;
- (4) Eficiência do equilíbrio dos componentes do sistema;
- (5) Acoplamento à rede elétrica, resistência da fiação elétrica e queda de tensão nos diodos;
- (6) Acumulação de sujeira, poeira ou neve nos módulos.

Levando em consideração que a radiação solar global em uma parede sul de um edifício é mais baixa durante os meses de verão e os meses de inverno podem ser mais altos, pois o ângulo de incidência anual varia durante o ano todo e talvez cerca de  $90^\circ$  no verão, enquanto no inverno, encontramos valores mais baixos próximos a  $15^\circ$  ou até menos. Portanto um obstáculo para a construção de um sistema de concentração solar na parede sul possa ser o ângulo de incidência de raios solares. Para isto, foram propostas algumas alterações no escopo original do concentrador, conforme Figura 10.

Figura 10 - Otimização no processo de assimetria do concentrador



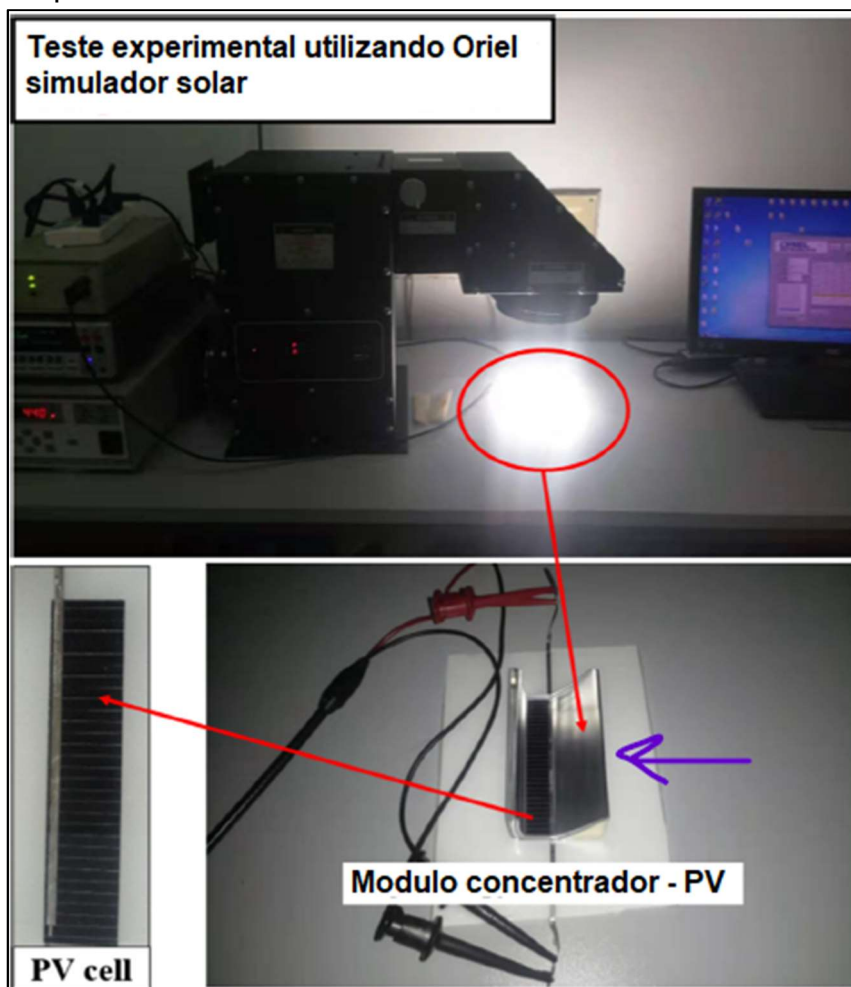
Fonte: (XUAN, 2019).

Para aumentar ainda mais a área de coleta de energia solar, ou seja, aumentar a razão de concentração geométrica, a curva de parábola  $BD$  é girada pelo ponto final inferior  $D$  por um certo ângulo de  $15^\circ$ . E a curva  $AO1$  foi cortada no ponto  $E$ . Assim o intervalo do concentrador original era de  $0^\circ$  a  $70^\circ$  dessa forma a faixa de aceitação será alterada para  $15^\circ$  a  $85^\circ$ .

Após feitos os ajustes necessários, o protótipo foi exposto a ensaios de laboratório conforme Figura 11, onde foi analisado o desempenho ótico do concentrador, o diagrama esquemático do ângulo de incidência dos raios solares na parede sul de um edifício, os efeitos de sombreamento e o desempenho da luz do dia.

Após a análise detalhada, pode-se concluir que o módulo concentrador-PV assimétrico do tipo janela obteve uma melhor resposta a iluminação natural para a geração de eletricidade, atendendo melhor à demanda de energia do edifício.

Figura 11 - Experimento realizado em laboratório utilizando o simulador solar Oriel



Fonte: (XUAN, 2019).

### 3.5.2 Projeto ideal do concentrador em V para aplicações fotovoltaicas

A principal razão para o desenvolvimento dos concentradores ideais de calha em V para uso com módulos fotovoltaicos é produzir energia com mais eficiência, com menor calor gerado, redução de pontos quentes na superfície PV e menor custo.

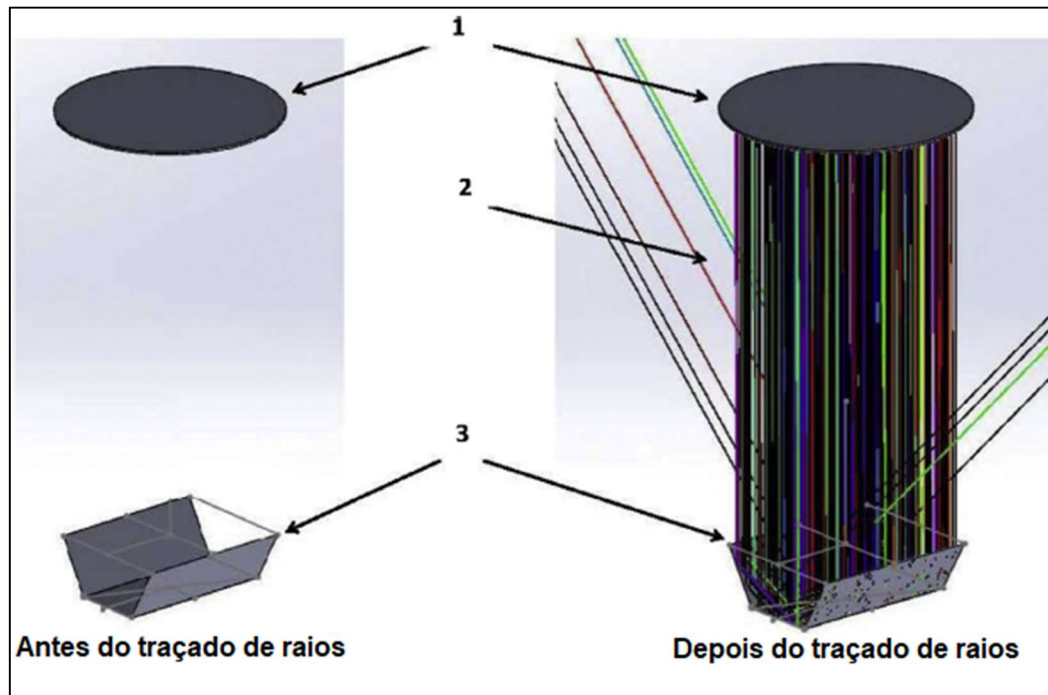
Vários pesquisadores apresentaram diferentes análises para desenvolvimento de projetos ideais para concentradores em calha V. Contudo, a maioria desses métodos de análise é baseada na solução analítica das equações que descrevem principalmente o número de reflexões de raios através dos refletores em V.

Recentemente, o método de rastreamento de raios foi amplamente utilizado para projetar, simular, e otimizar diferentes tipos de sistemas ópticos. O traçado de raios é um técnica estatística que simula os raios de luz de um local específico, uma fonte, para um alvo usando muitos raios. A técnica de traçado de raios tem muitas vantagens, como simular geometrias de concentradores complexos e de diferentes ângulos de incidência, determinando a intensidade da irradiância e distribuições de fluxo no plano absorvedor.

Nesta simulação, utilizando um software de rastreamento de raios, com a técnica de rastreamento de raios 3D usada para determinar o desempenho do concentrador em calha V. A Figura 12 mostra a configuração da calha em V sob o simulador de traçado de raios (fonte de luz), antes e depois da simulação. Quatro razões de concentração geométrica (1,5x, 2x, 2,5x e 3x) e três materiais refletores (refletor ideal R100%, alumínio anodizado R90% e espelho R80%) foram simulados.

O design ideal do concentrador em calha V pode ser definido como o ângulo ideal do vértice, que produz uma máxima relação de concentração efetiva, não uniforme, com uma mínima irradiância concentrada no plano absorvente e altura inclinada mínima dos refletores. Pode ser visto que o ângulo ótimo de vértice ( $\Psi$ ) do concentrador em V, para 1,5x, 2x, 2,5x e 3x são 30°, 30°, 22° e 19°, respectivamente, para todo o material reflexivo usado. A Figura 13 mostra a ilustração do traçado de raios para o design ideal do concentrador em calha V para diferentes razões de concentração geométrica.

Figura 12 - Configuração de simulação OptisWorks (1) fonte de luz (2) raios de luz e (3) concentrador em calha V



Fonte: Artigo projeto ideal do concentrador em V para aplicações fotovoltaicas

Após realizar as investigações, observou-se que para as configurações apresentadas acima, a comparação da razão de concentração efetiva do concentrador em calha V previsto pelo OptisWorks, em comparação aos parâmetros estipulados, apresentou um desvio de cerca de 1,99%.

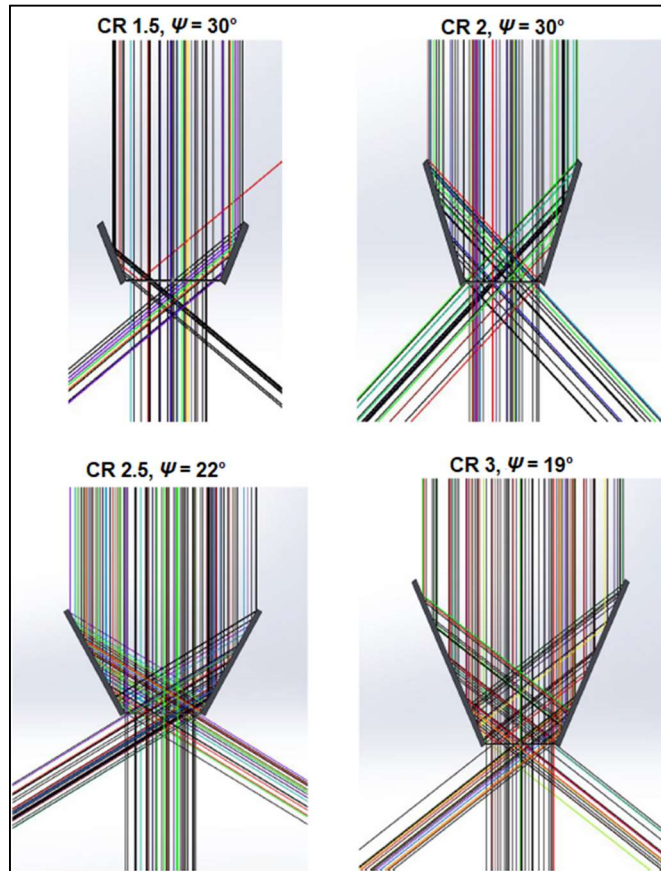
A comparação dos resultados da simulação da concentração efetiva pelo OptisWorks, para o teste experimental, apresentaram um desvio de cerca de 0,1%.

O design ideal do concentrador V-calha para 1,5x, 2x, 2,5x e 3x são encontrados nos ângulos dos vértices  $30^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $22^\circ$  e  $19^\circ$ , respectivamente.

Foi destacado o potencial do uso da técnica de traçado de raios para determinar o design ideal dos concentradores em calha V, levando uma economia no material refletor, alta uniformidade na distribuição da irradiância concentrada na superfície fotovoltaica e uma previsão mais precisa para a razão de concentração efetiva do concentrador.



Figura 13 - Simulação de traçado de raios para o design ideal do concentrador em calha V.



Fonte: (XUAN, 2019).

### 3.5.3 Uma revisão sobre o recente progresso da pesquisa no composto parabólico concentrador CPC para aplicações de energia solar

Concentradores parabólicos compostos (CPC) vêm ganhando cada vez mais atenção de pesquisadores acadêmicos e desenvolvedores industriais, devido à sua característica estacionária de coletar energia solar com maior eficiência. Como um concentrador de baixa concentração e com um ângulo de aceitação maior, sem necessidade de rastreamento, é uma solução atraente para melhorar o desempenho do sistema e reduzir o custo do sistema fotovoltaico (PV). Em um resumo abrangente e atualizado revisando os princípios de design para configurações diversas, aplicativos, previsões de desempenho e avanços tecnológicos, inúmeros estudos tecnicamente focados desde 2000 serão introduzidos e resumidos. Por fim, serão propostas perspectivas focadas nos projetos e melhorias do CPC.

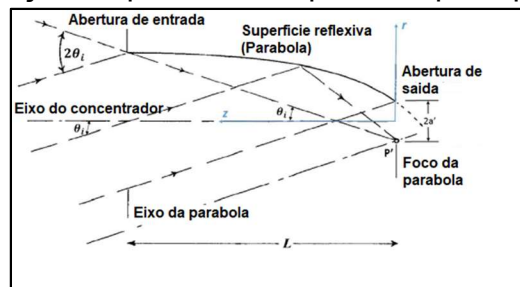
Imagem e não imagem são duas categorias de concentradores solares. Concentradores parabólicos compostos (CPC) pertencem à não imagem óptica, e são considerados uma opção altamente potencial e atraente para concentração e iluminação de energia solar.

A revisão começará a partir dos conceitos, passando pelos princípios de design e considerações do CPC. Em seguida, o software aplicado para simular o desempenho do CPC será comparado e discutido e finalmente, perspectivas futuras e direções de pesquisa para estudos sobre CPC desde o início os trabalhos até os avanços mais recentes.

### 3.5.3.1 Princípios de design do CPC

De acordo com a lei de Snell, princípio de Fermat e método de rastreamento de raios, o processo de design do CPC pode ser descrito conforme à Figura 14, que é chamado de "princípio do raio da borda" ou o método da "corda".

Figura 14 - Construção do perfil CPC a partir do princípio do raio de borda



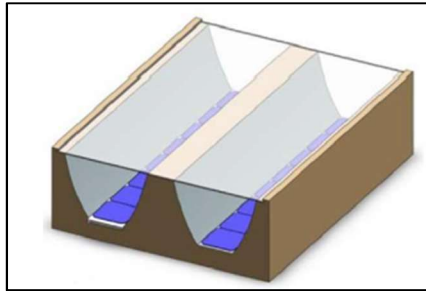
Fonte: Uma revisão sobre o recente progresso da pesquisa no composto parabólico concentrador CPC para aplicações de energia solar

A razão de concentração geométrica é um parâmetro crítico no projeto de concentradores de óptica sem imagem definida, como a proporção da área aberta e relativa à área do receptor. A concentração geométrica teórica da relação do CPC 2D faz com que esse CPC se torne quase um concentrador ideal. 'Ideal' significa que todos os raios dentro do ângulo máximo de coleta não serão refletidos de volta e emergir da abertura de saída.

Geralmente, o CPC pode ser classificado em duas categorias que são: bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). O CPC 2D refere-se ao CPC que possui um eixo longitudinal como mostrado na Figura 15. Concentrador 3D representa o CPC

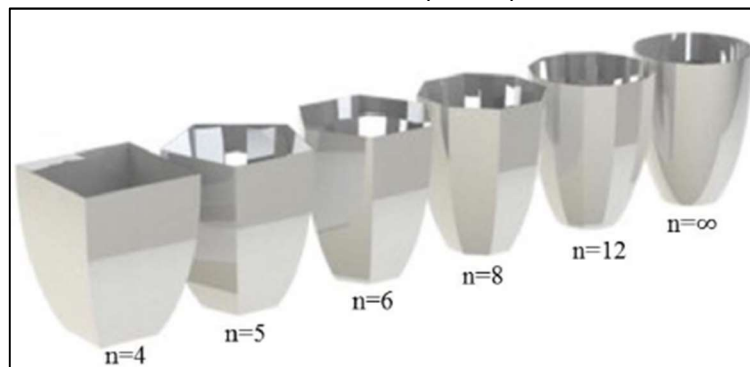
cuja geometria é obtida por rotação uma seção meridiana 2D em um intervalo angular, conforme Figura 16. Pode também ser chamado de CPC linear ou CPC tipo calha para alguns casos especiais. CPCs podem ser simétricos ou assimétricos e em formatos especiais.

Figura 15 - Concentrador 2D em formato de calha com vidro na parte superior e PV na parte inferior



Fonte: Uma revisão sobre o recente progresso da pesquisa no composto parabólico concentrador CPC para aplicações de energia solar.

Figura 16 - Concentrador 3D com aberturas poligonais de 4, 5, 6, 8, 12 lados e CPC contornado ( $n = \infty$ )



Fonte: Uma revisão sobre o recente progresso da pesquisa no composto parabólico concentrador CPC para aplicações de energia solar

Dentre os casos especiais de concentradores, encontra-se o concentrador “Concha do Mar”. Este concentrador é um CPC assimétrico, onde o foco da parábola está na borda do absorvedor. É usado para concentrar todos os raios incidentes através da abertura formada pelo eixo da parábola com o ponto externo da abertura. Concentradores com absorvedor convexo, onde o absorvedor do concentrador ideal pode não ser apenas plano e paralelo à abertura, mas também convexo. Concentrador com parede de lente, ele pode ser considerado um combinação de CPC reflexivo com lente de formato fino ou dielétrico particular.

### 3.5.3.2 Considerações de design no material

De acordo com a estrutura do concentrador, ele pode ser dividido em paredes, considerando a aplicação CPC para concentração e iluminação. A parede lateral do concentrador deve ser composta por um material reflexivo, geralmente um metal com alta refletividade, como aço inoxidável ou alumínio. A seleção do material depende das propriedades e dos seus requisitos de fabricação. Quando o concentrador é incorporado à uma célula fotovoltaica, o encapsulante entre eles também precisa ser levado em consideração. Um elastômero de silicone é um encapsulante comum em sistemas de CPV que possui excelente transmissão propriedades dentro da faixa espectral visível por UV com índices de refração de 1,5.

### 3.5.3.3 Geometria solar e sistema de rastreamento

Para um concentrador 2D do tipo calha, seu eixo é posicionado na direção leste-oeste. O normal para as aberturas é que estejam inclinadas para baixo a partir do zênite, que é chamado ângulo de inclinação do concentrador. A posição do concentrador 3D segue o mesmo princípio, com base no movimento solar. Sendo que a coleta solar anual esperada, é que seja a máxima quando o ângulo de inclinação for igual à latitude local.

De acordo com a geometria do concentrador, pode-se observar que quanto maior for a razão de concentração, menor será o ângulo de aceitação. Os concentradores em sua maioria são projetados para ter boa concentração sem rastreamento, porque eles podem alcançar o mais amplo campo de visão angular para uma dada concentração geométrica. Assim o desenho geométrico do concentrador é o fator mais importante para determinar se o mecanismo de rastreamento estacionário ou passivo seria utilizado. Para concentradores onde a razão de concentração deve ser maior que 10 vezes, sistemas de rastreamento são necessários. No entanto, a utilização do rastreador ainda não é tão comum. Os rastreadores solares precisos tem custo elevado, sua utilização traz dificuldade de instalação, o mecânico em movimento pode reduzir a confiabilidade de todo o sistema, os rastreadores também consomem eletricidade e nem todos os dispositivos são apropriados para instalar rastreadores.

Portanto, quando alta concentração não é significativa, o sistema de rastreamento não tem alta prioridade a ser considerada.

Com base na revisão de literatura apresentada, algumas recomendações são propostas para sugestões de melhorias em pesquisas futuras:

a) Concentradores podem ser projetado de várias formas. No entanto, os prós e contras de qualquer novo design deve ser considerado antes da execução. Em termos de concentradores com preenchimento dielétrico, seu peso é uma desvantagem quando aplicado como fachada de edifício. O truncamento é uma das abordagens básicas para mitigar isso. Além disso, o concentrador com lente pode ser proposto para resolver esse problema mantendo o ângulo de aceitação;

b) O efeito de fabricação é um fator importante que causa os desvios dos resultados do experimento. Design, materiais e fabricação deve ser considerado para melhorar sua precisão na produção;

c) Os requisitos do sistema de rastreamento devem ser considerados quando um concentrador é projetado. Geralmente, concentradores não necessitam sistemas de rastreamento. Mas para alguns em particular, onde a aplicação do concentrador tem maior taxa de concentração, pode precisar de rastreamento de um eixo se for 2D ou de dois eixos se for 3D. A precisão, complexidade, manutenção e vida útil dos rastreadores precisam ser calculados. Além disso, o custo do sistema rastreamento deve ser levado em consideração;

d) Distribuição de irradiância e temperatura são os dois principais fatores que devem ser levado em consideração ao projetar um concentrador para algumas aplicações típicas. Por exemplo, quando um concentrador é integrado ao sistema fotovoltaico, ambos com uma não uniformidade da distribuição de fluxo e alta temperatura resultam em redução da geração de eletricidade por PV;

e) Quando o concentrador é utilizado na fachada do edifício, seu desempenho térmico deve ser levado em consideração;

f) De acordo com o resumo das literaturas, pode-se ver que a maioria das experimentos foram realizados em ambiente interno por simulador solar. Experiência interna é uma maneira rápida e fácil de testar o desempenho do concentrador. Contudo, experimentos ao ar livre são recomendados em vista de diferentes condições climáticas.

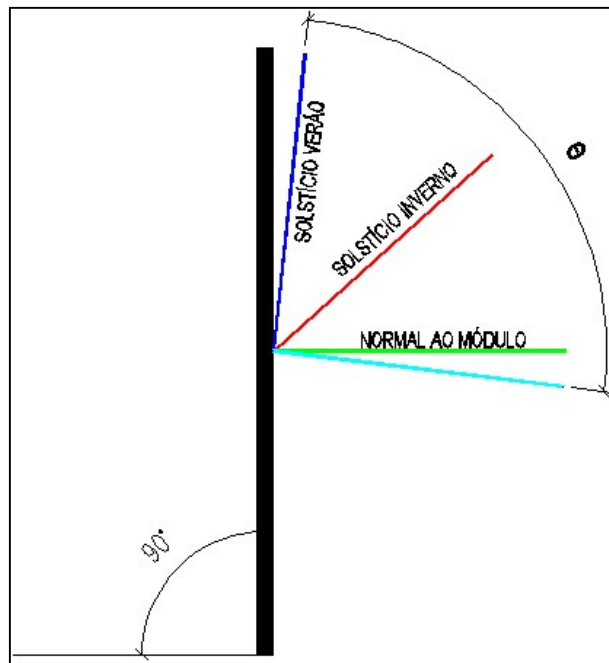
## 4 METODOLOGIA

### 4.1 MÉTODO DE TRAÇADO DE RAIOS

Para desenvolver a seção transversal que irá compor o concentrador solar e estimar a resposta gerada pelo módulo, para uma posição solar pré-definida utilizou-se a metodologia baseada no método traçado de raios (*Ray Tracing*). Este recurso possibilita projetar concentradores solares em 2D, considerando o princípio dos raios extremos da óptica não formadora de imagem (SEVERO et. al., 2005), (TIAN et. al., 2018). Os concentradores absorvem os raios no interior de uma abertura com angulação, e desconsidera os demais raios incidentes fora deste intervalo. Para o presente projeto, utilizou-se ferramentas computacionais para o projeto do perfil do concentrador e desenvolvimento do método traçado de raios, tais como software de modelagem computacional e planilhas eletrônicas (BONATTO, 2019)

A abertura angular que será usada para a construção do concentrador, terá como pontos de referência as posições do Sol ao meio dia solar no solstício de inverno e verão. Com estes parâmetros, pode-se determinar a abertura angular do concentrador (SEVERO et. al., 2005), (TIAN et. al., 2018).

Figura 17 - Esquema representativo da abertura angular  $\theta$



Fonte: Do autor (2020)

## 4.2 DEFINIÇÕES DO CONCENTRADOR J-FEN 2D

O material reflexivo escolhido para a construção da seção transversal do concentrador J-FEN 2D será aço inox. A sua otimização será feita através do método de reflexão dos raios incidentes.

Raios incidentes são os raios que chegam até o receptor, ou passam pela abertura do concentrador. Os que passam pela abertura, alcançam o refletor e dão origem aos raios refletidos que chegam à face posterior do receptor, aumentando assim a capacidade de absorção de radiação solar. A abertura de entrada por sua vez, é o local por onde os raios incidentes irão alcançar o material reflexivo e atingir a parte posterior do receptor. A abertura de entrada está diretamente relacionada a concentração geométrica ( $C_g$ ), através da razão entre a abertura de entrada ( $A_e$ ) e a área do receptor ( $A_r$ ) define-se o ( $C_g$ ) do concentrador.

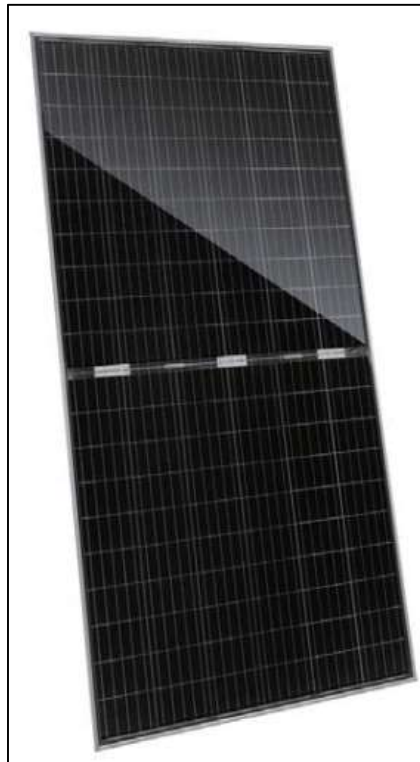
### 4.2.1 Desenvolvimento do Perfil do Concentrador J-FEN 2D

O desenvolvimento do projeto do sistema óptico existente no módulo concentrador estático J-FEN 2D encontra-se embasado pelas leis da reflexão. Quando um raio com ângulo ( $\theta$ ) atinge uma superfície, este será refletido com o mesmo ângulo ( $\theta$ ) em relação à normal da superfície. Isso é válido para todas as direções e para um número infinito de raios que venham a incidir na superfície (SEVERO et. al., 2005), (TIAN et. al., 2018).

A partir da lei da reflexão, foi definido que o perfil do concentrador irá ser projetado para o meio dia solar do inverno e mais duas posições solares. Sendo a latitude de Bento Gonçalves  $29^\circ$ , será considerada a angulação da abertura solar de  $90^\circ$  para desenvolvimento e para sua instalação em fachadas de residências ou edifícios.

Com o ângulo de inclinação já definido, estabeleceu-se que a abertura de entrada do concentrador possuirá comprimento de acordo com as dimensões de um painel solar real conforme a Figura 18.

Figura 18 - Painel Solar Fotovoltaico Swan Bifacial 60H 320-340 Watt



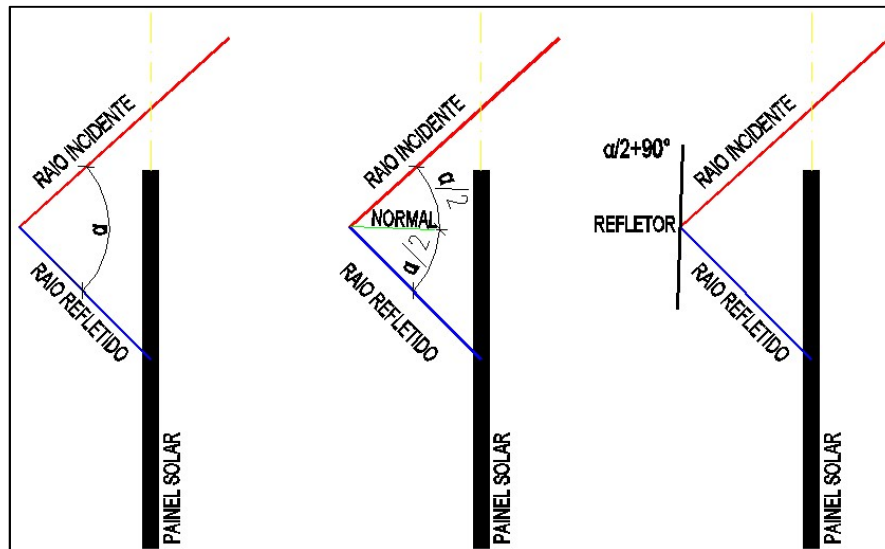
Fonte: adaptado Jinko solar

Assim, o concentrador J-FEN 2D apresentará uma concentração geométrica ( $C_g$ ) baseado nas medidas de um receptor com um painel bifacial já comercializado. Com a definição do posicionamento solar, serão projetados raios de entrada que proporcionarão ganho na concentração.

Como ferramenta para projetar a seção transversal do concentrador J-FEN 2D, será usado software de modelagem computacional para projetar a abertura de entrada, a superfície do receptor dos raios, os raios incidentes e os raios refletidos sobre as células bifaciais. Para calcular o ângulo do elemento refletor considerou-se o plano do concentrador perpendicular ao raio incidente. Visto que a linha normal projetada no elemento será traçada na metade do ângulo existente entre o raio incidente de entrada e o raio refletido, após calcular o ângulo do elemento refletor, será desenhado o mesmo elemento com a orientação necessária, conforme Figura 19.



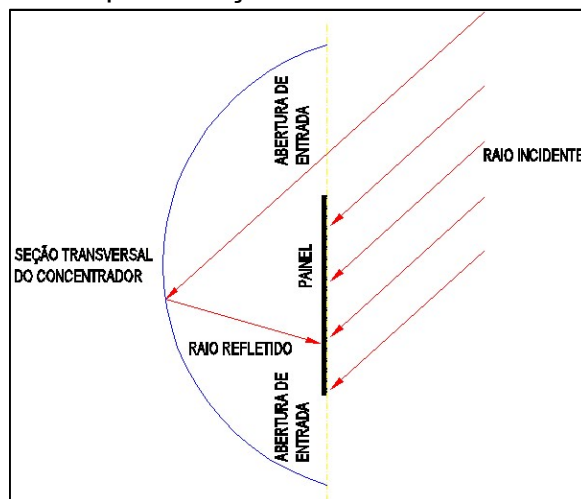
Figura 19 - Método de projeção dos raios



Fonte: Do autor (2020)

O dimensionamento do elemento refletor, iniciou-se na posição onde acontece a intersecção entre o raio de entrada e o raio refletido, até a posição aonde o próximo raio de entrada alcance a superfície, conforme mostra a Figura 20. O procedimento é repetido para estimar os elementos refletores subsequentes para obter o maior fator de concentração. No software de modelagem computacional existe a possibilidade de obter o ângulo existente entre o raio incidente de entrada e o raio incidente refletido. O ângulo resultante dos dois raios aponta o ângulo de rotação da superfície refletora, que permite que o raio incidente de entrada seja refletido para a face dos painéis bifaciais.

Figura 20 - Representação da reflexão dos raios solares



Fonte: Do autor (2020)

### 4.3 SIMULAÇÃO DOS GANHOS DO CONCENTRADOR J-FEN 2D

Baseado na seção transversal definida, foi realizada uma simulação para estimar o ganho total de radiação solar, tanto na face frontal, quanto na face posterior do concentrador J-FEN 2D, e será comparado com os ganhos que seriam obtidos em um sistema fotovoltaico convencional sob as mesmas configurações e condições de exposição à radiação solar e, com isso simular se houve ou não aumento na produção de energia elétrica entre o sistema fotovoltaico do concentrador J-FEN 2D e um sistema fotovoltaico convencional com a mesma quantidade de painéis solares.

### 4.4 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO J-FEN 2D

Para os testes de ganho energético, o módulo bifacial será substituído por duas células monofaciais, ativas em uma única face. Isso se justifica por que não é possível medir o ganho energético de um módulo bifacial. Assim, dois módulos monofaciais servem para medir tanto a potência recebida na face frontal como na face posterior onde se encontra o sistema concentrador.

Além disso, para fabricação do protótipo do J-FEN 2D, a seção transversal será otimizada para o tamanho do novo receptor.

Um modelo do módulo concentrador estático J-FEN 2D, será fabricado para células solares monofaciais de 5,0 cm x 3,0cm, simulando um sistema fotovoltaico em escala.

Devido às condições climáticas da região, fez-se a opção pela utilização do aço INOX para fabricação do concentrador. O aço INOX apresenta boas propriedades de espelhamento, além de sofrer efeito corrosivo inferior aos aços mais comumente comercializados quando em contato com a umidade.

### 4.5 TESTES DO CONCENTRADOR J-FEN 2D

Foi realizado teste óptico em ensaio de bancada através da incidência de um raio laser e gelo seco para averiguar o sistema concentrador e a formação do raio refletido. Foi utilizado um medidor óptico laser que servirá para simular os raios de

entrada do concentrador. Conforme a metodologia baseada nas referências bibliográficas (SEVERO, 2005), o feixe luminoso do medidor deve ser direcionado em linha reta, perpendicular à superfície do concentrador J-FEN 2D. Assim é possível verificar a direção do raio refletido e a semelhança do concentrador fabricado, analisando o ganho de energia do J-FEN 2D com um sistema solar convencional instalado nas mesmas condições e posicionamento do protótipo J-FEN 2D.

Além do teste óptico, o protótipo do J-FEN 2D foi testado em condições de incidência solar. Para esta avaliação serão utilizados equipamentos de medição como voltímetro e amperímetro para cada célula monofacial, onde será medida a tensão elétrica e a corrente elétrica das células. Esta medição foi feita em dias de sol com céu limpo.

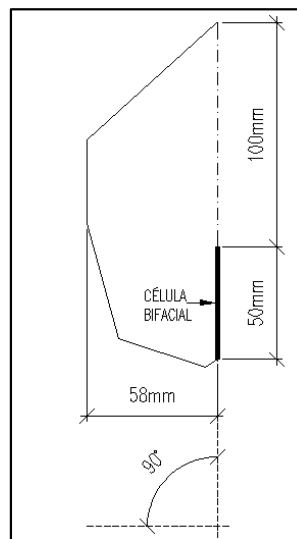
## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo, serão apresentados os resultados referentes à execução do projeto e construção do protótipo concentrador J-FEN 2D, contendo os resultados do teste óptico e do teste elétrico, realizados com os valores obtidos nas medições efetuadas externamente.

### 5.1 DEFINIÇÕES DO PROTÓTIPO CONCENTRADOR J-FEN 2D

Observada a latitude de Bento Gonçalves, ficou definido que a angulação padrão de instalação do concentrador J-FEN 2D foi de  $90^\circ$ , conforme a Figura 21, respeitando assim, padrões estabelecidos de instalação de módulos fotovoltaicos convencionais.

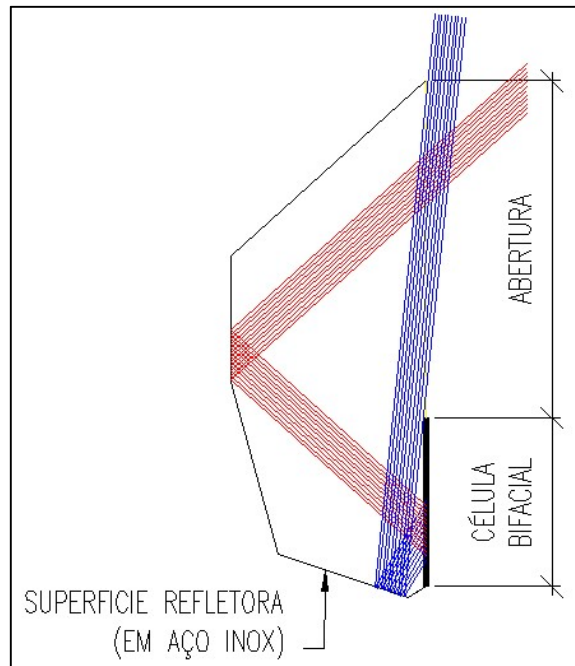
Figura 21 - Concentrador conforme inclinação estipulada



Fonte: Do autor (2020)

Com embasamento na Lei da Reflexão e desenvolvendo o método de traçado de raios, foi projetada a seção transversal do módulo concentrador conforme mostrado na Figura 22. De acordo com as medidas pré-estabelecidas e mostradas na Figura 23, alcança-se uma concentração geométrica teórica de 2. O dimensionamento, assim como a angulação da superfície refletora servem como sugestão inicial de projeto, visto que ajustes e correções podem ser aplicadas no protótipo após a realização do teste óptico.

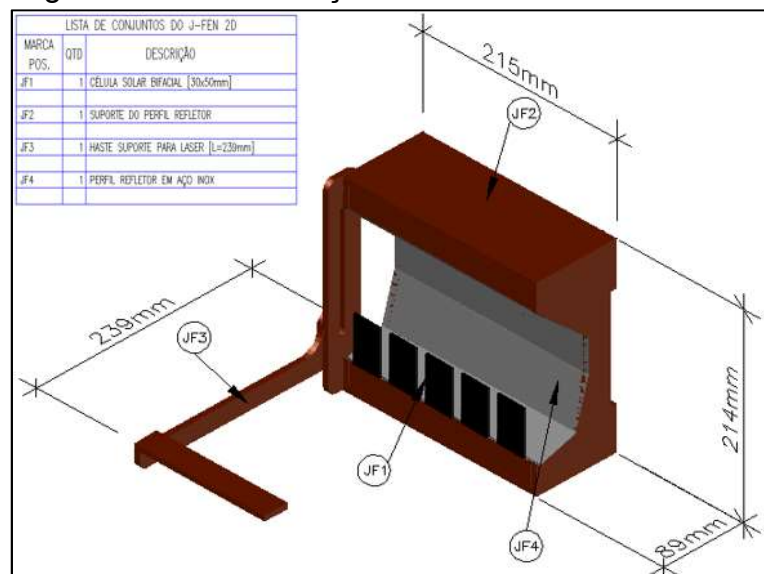
Figura 22 - Projeção dos raios que passam pela abertura



Fonte: Do autor (2020)

Na Figura 23 é apresentada uma renderização do protótipo concentrador J-FEN 2D, observando que é composto por uma parte JF1, representando os receptores, que são as células solares bifaciais, a parte JF2 sendo o suporte e estrutura do protótipo concentrador, a parte JF3, a haste onde foi fixado o laser utilizado para simular a angulação solar no teste óptico verificando a incidência dos raios solares e a sua reflexão até o receptor, e a parte JF4, representando o perfil refletor em aço inox.

Figura 23 - Renderização do concentrador J-FEN 2D



Fonte: Do autor (2020)

## 5.2 FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO PERFIL DO CONCENTRADOR J-FEN 2D

Após projetar o concentrador com a utilização do software de modelagem computacional, foram executadas a fabricação e montagem do protótipo J-FEN 2D.

Em parceria com a empresa funilaria JJ Segalin e a empresa JP Mobili, foram realizados os processos necessários para execução do projeto do protótipo J-FEN 2D. Conforme definições de projeto estipuladas anteriormente, foi executado o corte geral da chapa de Aço Inox necessária para fabricar o perfil refletor do protótipo.

Com as proteções necessárias para preservação da superfície refletora do perfil, foram executadas operações de corte de precisão, buscando obter as medidas exatas solicitadas no projeto e com a base da chapa de aço inox já nas dimensões corretas, aplicou-se o processo de dobra para obtenção da variação de seção que refletirá os raios solares conforme Figura 24. O processo de dobra foi executado buscando preservar a angulação definida anteriormente, com embasamento nas leis da reflexão.

Foram conferidas todas as medidas com os instrumentos de inspeção de qualidade adequados e devidamente aferidos, garantindo assim a correta angulação de cada dobra. Em seguida, realizada uma conferência de sobreposição, através de uma impressão do desenho em escala 1:1 e sobrepondo o perfil ao desenho certificando-se de que a curvatura do perfil estava de acordo e com a correta angulação do protótipo.

A verificação de curvatura da seção foi uma das fases de maior importância de todo o processo de fabricação. Os erros de angulação podem ocasionar um mau posicionamento das células solares bifaciais e como consequência uma redução de percentual no ganho energético.

Com o processo de fabricação concluído e conferência do perfil do concentrador, foi obtido o formato final do J-FEN 2D, que respeitou todos os parâmetros estipulados e pré-definidos anteriormente.

Figura 24 - Procedimento de dobra do perfil concentrador



Fonte: Do autor (2020)

### 5.3 FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO MÓDULO CONCENTRADOR J-FEN 2D

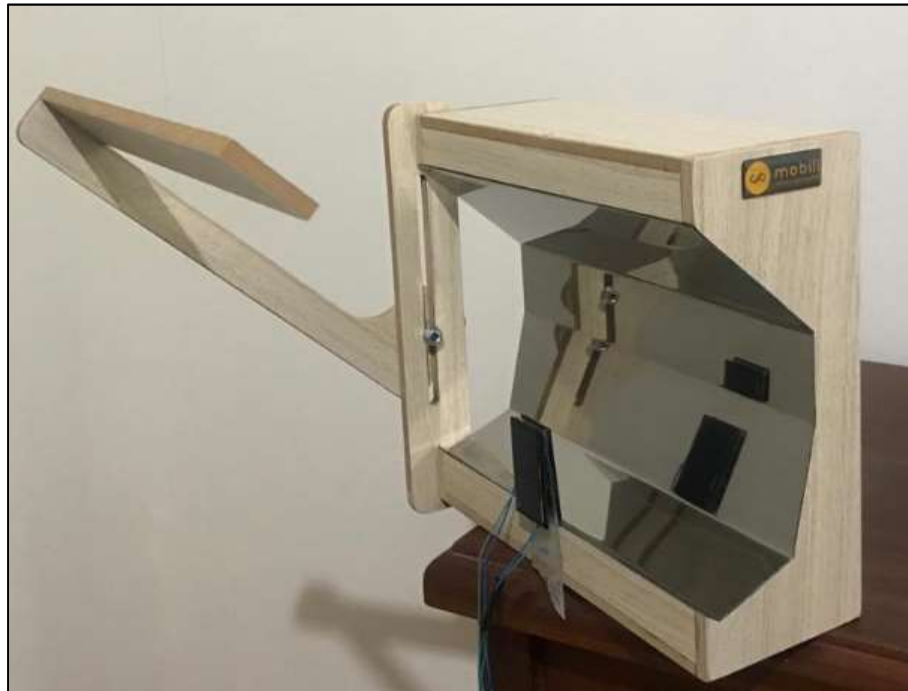
Com o perfil do concentrador em mãos, o passo seguinte foi fabricar e montar o módulo fotovoltaico completo.

Para garantir a sustentação do concentrador, um suporte de madeira foi projetado, fabricado e montado de acordo com o dimensionamento do perfil do concentrador J-FEN. Esse suporte irá garantir que não ocorra variações ou desalinhamentos no perfil do concentrador, evitando assim alterações em seu dimensionamento e formato.

Para finalizar o processo de montagem do módulo concentrador J-FEN 2D foram fixadas as células solares, que foram montadas na parte frontal do módulo concentrador, separadas por uma lâmina de acrílico para garantir o isolamento das conexões conforme mostrado na Figura 25.

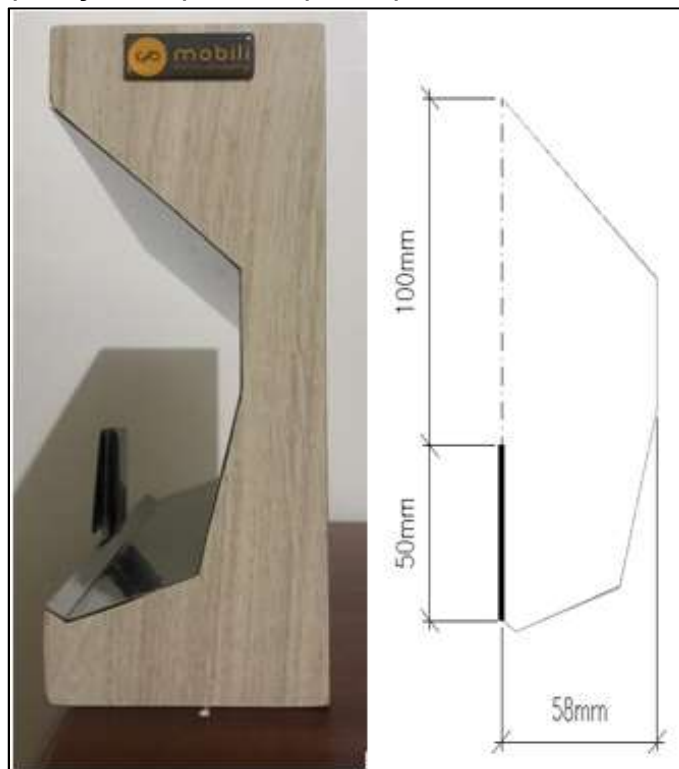
Uma das células solares terá sua face recebendo diretamente os raios solares. E a outra célula solar receberá os raios refletidos no perfil concentrador. Assim, foi possível simular a utilização de células solares bifaciais, além do comportamento de um módulo convencional, conforme proposto na metodologia deste trabalho.

Figura 25 – Protótipo montado do módulo concentrador J-FEN 2D



Fonte: Do autor (2020)

Figura 26 - Comparação do perfil do protótipo J-FEN 2D com seu projeto teórico



Fonte: Do autor (2020)

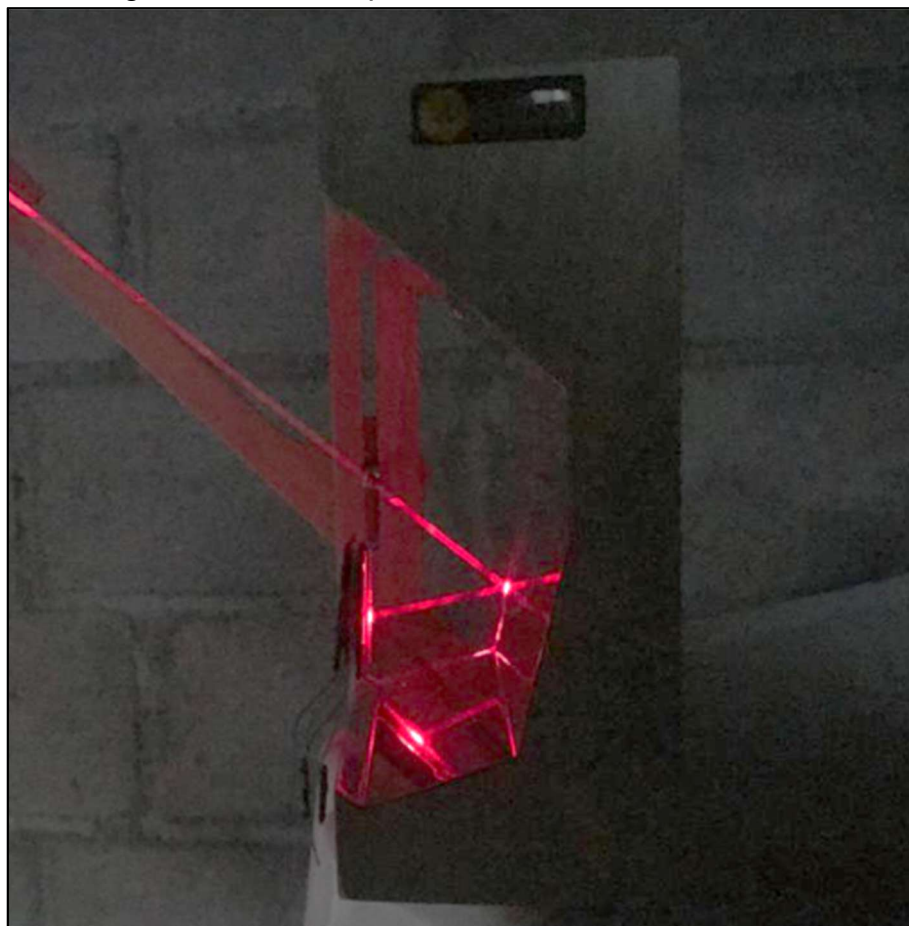


#### 5.4 RESULTADO DO TESTE ÓPTICO

Como teste de bancada, foi realizada uma simulação ótica do protótipo concentrador J-FEN 2D, onde verificou-se a correta formação do raio refletido. Isso foi feito a partir do direcionamento de um laser, simulando os raios solares adentrando na abertura do concentrador para isso direcionou-se o feixe luminoso do laser em linha reta, perpendicularmente à superfície interna do concentrador, como mostrado no software de modelagem computacional. Também foi realizada a verificação da direção do raio refletido sendo possível analisar a semelhança do perfil concentrador construído e do projetado.

Para simular a incidência da reflexão diretamente nas células solares, foi confeccionado um braço móvel, com o eixo de rotação centralizado com o respectivo eixo das células solares, onde foi adaptado um laser, que representa os raios incidentes de acordo com a angulação desejada, conforme representa a Figura 27.

Figura 27 - Teste óptico do concentrador J-FEN 2D



Fonte: Do autor (2020)

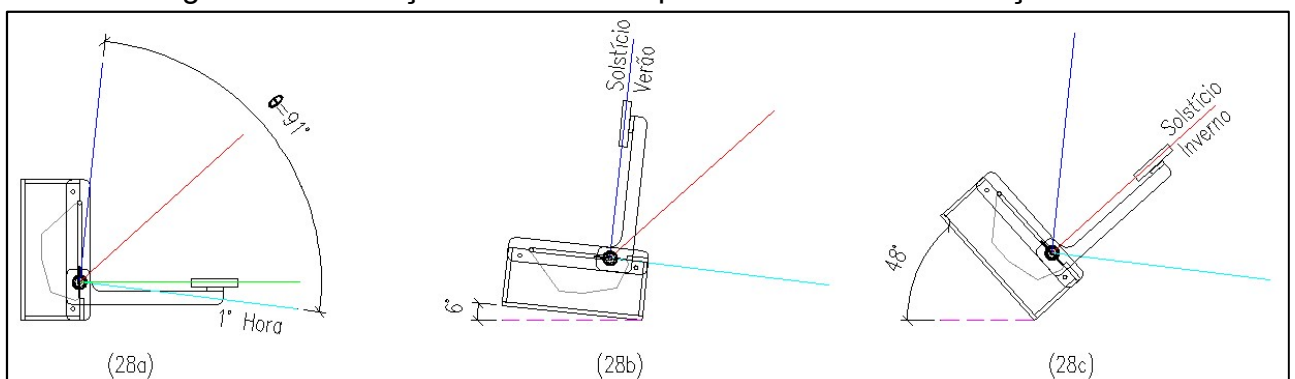
## 5.5 RESULTADOS DO TESTE ELÉTRICO

Os testes de validação de concentradores devem ser feitos em um período de, pelo menos, um ano completo. Isso se justifica para ter todas as inclinações dos raios solares incidentes sobre as células solares e, assim, aferindo o concentrador de forma completa. Entretanto, este trabalho não teve a disponibilidade deste período e um método alternativo de medida foi implementado.

Então com a abertura angular  $\theta$  definida em  $91^\circ$ , conforme apresentado na Figura 28a, foram estabelecidas três condições de análise para a geração de energia do J-FEN 2D. Estabelecendo o ângulo entre a primeira hora medida e o meio dia solar de verão, o protótipo J-FEN 2D foi submetido a três testes de concentração, considerando-se: posição 1, a exposição do protótipo nas condições iniciais de aplicação, simulando uma fachada residencial, posicionado a  $90^\circ$ , conforme Figura 28a; posição 2, o protótipo J-FEN 2D foi inclinado em  $6^\circ$ , simulando a incidência dos raios solares de verão, de maneira que face frontal da célula solar ficasse perpendicular aos raios solares do solstício de verão Figura 28b, na posição 3, o protótipo J-FEN 2D, foi inclinado em  $48^\circ$ , simulando a incidência dos raios solares de inverno, de maneira que face frontal da célula solar ficasse perpendicular aos raios solares do solstício de inverno conforme Figura 28c.

Essa variação angular se fez necessária, para poder simular a inclinação real do sol, em uma determinada época do ano, assim ao posicionar o protótipo concentrador de acordo com a posição 2, simula-se a inclinação solar equivalente ao verão, e ao posicionar o protótipo de acordo com a posição 3, a simulação se equivale a inclinação solar do inverno considerando os meses de dezembro e junho respectivamente.

Figura 28 - Condições de contorno para testes de concentração



Fonte: Do autor (2020)

Para realização dos testes elétricos se fez necessário a coleta de dados em dois dias de Sol, com céu limpo e sem nuvens, sendo assim dois dias para cada posição indicada na Figura 29. Dois multímetros da marca MINIPA, modelo ET-2702 com número de série ET2702001936 e ET2702001936, foram utilizados para obtenção dos valores referentes à tensão (V) e a corrente (mA) existente na célula solar frontal e na célula solar traseira.

Após a realização das medições e obtenção de dados, entre as 8h e 16h, foram passados os dados para uma planilha eletrônica onde se extraiu as médias dos valores obtidos para corrente (mA) e tensão (V) e calculada a potência média (W).

Para as medições na posição 1, o concentrador J-FEN 2D, foi posicionado na vertical, de maneira que as células solares ficassem em uma angulação de  $90^\circ$  e com sua face voltada para o Norte, conforme informado na metodologia e representado pela Figura 29. Os dados das medições na posição 1 foram obtidos nos dias 21/10/2020 e 28/10/2020 respectivamente, conforme apêndice A.

Figura 29 - Posicionamento do concentrador para teste elétrico em  $90^\circ$



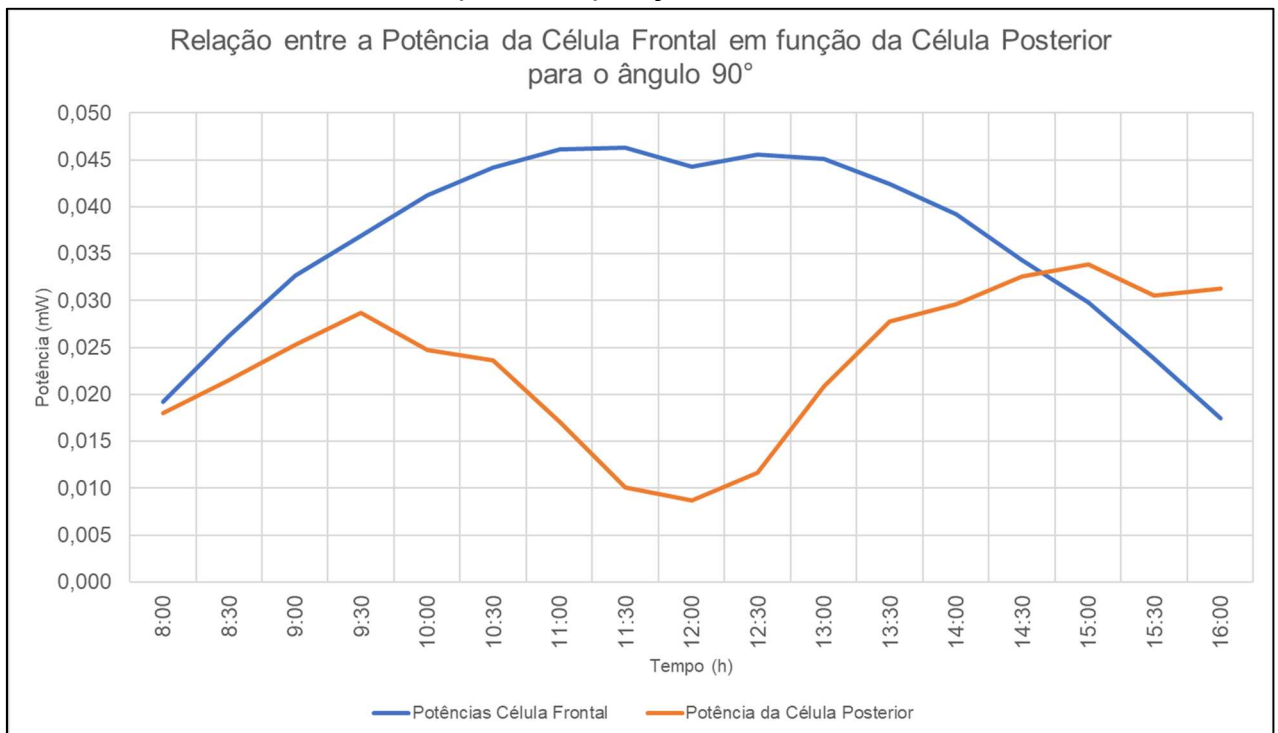
Fonte: Do autor (2020)

Para efetuar as medições nas posições de  $6^\circ$  e  $48^\circ$ , o protótipo concentrador J-FEN 2D, foi posicionado sobre uma superfície plana, com a ajuda de uma bússola. O concentrador foi posicionado com a parte frontal voltada para o Norte, e com a ajuda de um apoio foi dada a inclinação de acordo com os ângulos estipulados, verificando o ângulo com um transferidor e a distância da base até o canto superior traseiro do módulo concentrador sendo verificada com uma trena. Os dados das medições das posições 2 e 3 podem ser visualizados nos apêndices B e C.

## 5.6 RESULTADO DE CONCENTRAÇÃO DO J-FEN 2D EM TRÊS INCLINAÇÕES

Com os dados obtidos através das medições, calculou-se a potência média em cada uma das posições. Os dados foram inseridos em uma planilha eletrônica e com isso conseguiu-se comparar a quantidade de energia recebida pela célula frontal com a quantidade de energia concentrada pela célula posterior, conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Gráficos da relação de potência entre a célula frontal em função da posterior posição  $90^\circ$

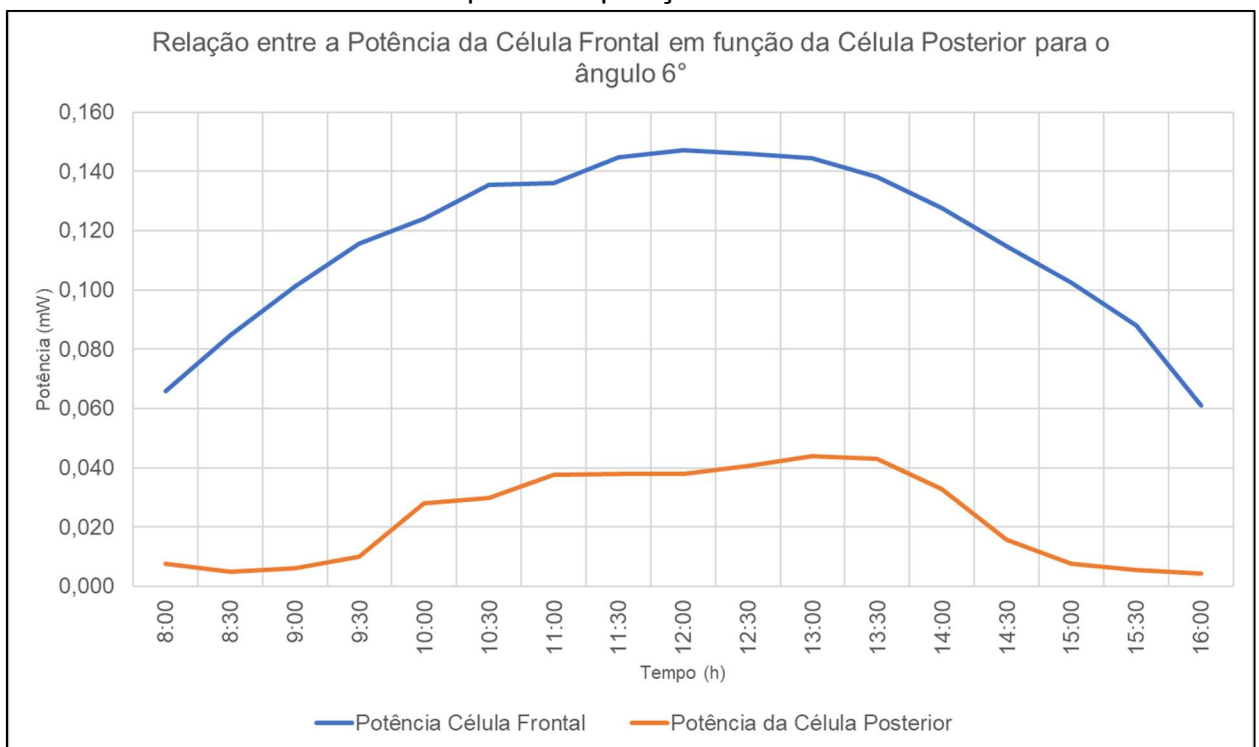


Fonte: Do autor (2020)

Conforme representado na Figura 30, através dos dados obtidos para a posição 1, onde o protótipo concentrador J-FEN 2D foi posicionado em  $90^\circ$ , obteve-se uma concentração média de 71% na célula posterior em relação a célula frontal, observando-se que nessa posição, o concentrador respondeu melhor entre 8h e 10h e trinta minutos, 13h e trinta minutos e 16h, onde o ângulo de incidência dos raios solares é maior. Essa faixa abrange as variações da primeira hora medida até solstício de inverno, conforme mostrado anteriormente pela Figura 28a.

Na Figura 31, pode-se observar os resultados obtidos com o protótipo concentrador posicionado a  $6^\circ$  da base de apoio, representando assim a incidência dos raios solares em uma aplicação as condições solares do verão, para o qual o perfil concentrador desenvolvido não é eficiente obtendo apenas uma concentração média de 18% na célula posterior em relação a célula frontal.

Figura 31 - Gráficos da relação de potência entre a célula frontal em função da posterior posição  $6^\circ$

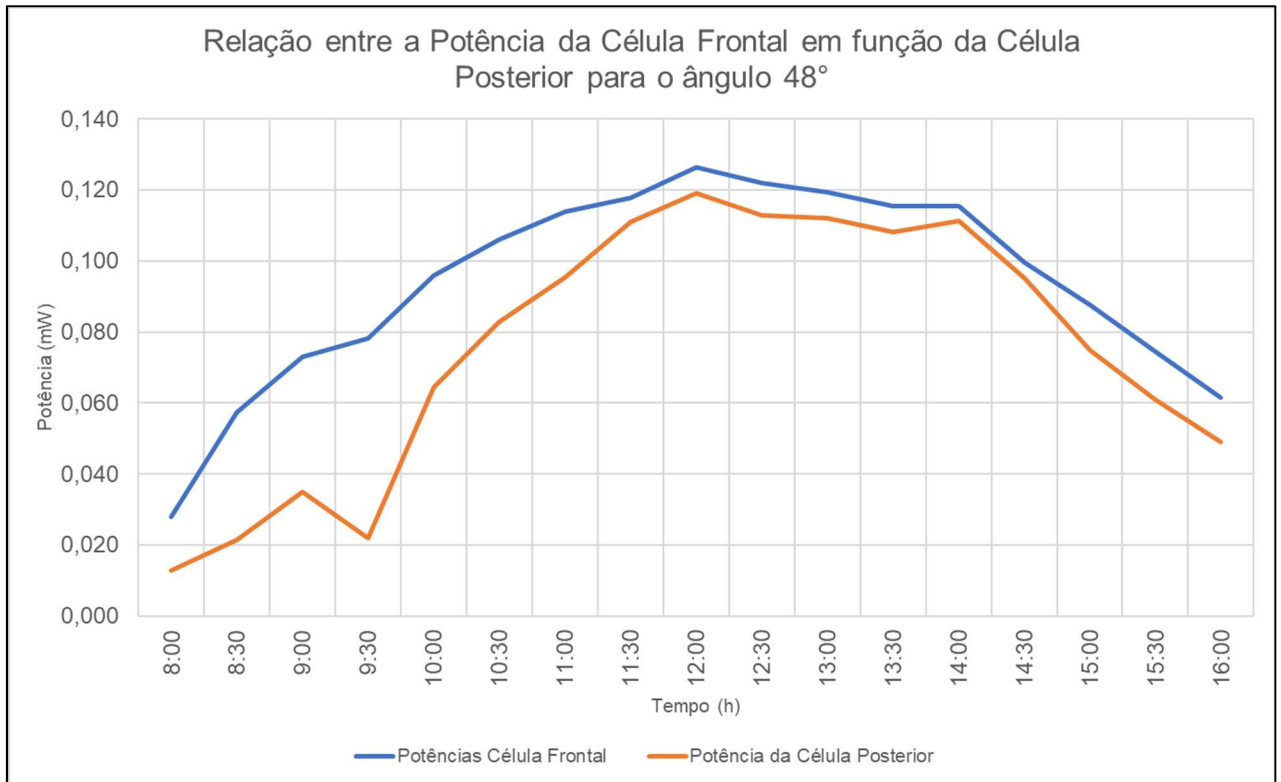


Fonte: Do autor (2020)

A Figura 32, apresenta os resultados obtidos ao inclinar o protótipo concentrador em  $48^\circ$  em relação a base de apoio, simulando assim a incidência dos raios solares que ocorre no inverno. Com isso obteve-se uma concentração média equivalente a 77% na célula posterior, em relação a célula frontal. Nessa condição o

protótipo concentrador J-FEN 2D, nos apresentou uma melhor resposta, confirmando assim com as condições de contorno iniciais, definidas o perfil concentrador com foco na incidência dos raios solares dessa faixa de angulação entre a primeira hora e o solstício de inverno, conforme apresentado anteriormente na Figura 28c.

Figura 32 - Gráficos da relação de potência entre a célula frontal em função da posterior posição 48°



Fonte: Do autor (2020)

Na Tabela 2 pode-se ver a concentração média para cada posição do protótipo concentrador J-FEN 2D.

Tabela 2 - Concentração média da célula posterior em relação a célula frontal

Célula Posterior em relação à Frontal		
Mês	Inclinação para simular a posição solar	Média de concentração em %
Outubro	90°	71
Dezembro	6°	18
Junho	48°	77

Fonte: Do autor (2020)

## 5.7 COMPARAÇÃO DOS PAINÉIS SOLARES

Com os testes de concentração do J-FEN 2D executados a partir de um protótipo, o próximo passo foi simular o seu funcionamento baseado em um painel bifacial real. Assim para a escolha do painel bifacial que servirá de receptor do concentrador J-FEN 2D, foram analisados três tipos disponíveis no mercado conforme as suas principais características mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos painéis analisados

Características	335W - Upsolar UP-M335P	Swan Bifacial 60H 320-340 Watt	Swan Bifacial 60H 310-330 Watt
Dimensão [mm]	1956x992x40	1704x1008x30	1698x1002x6
Peso [kg]	22,7	22,4	24,0
Potência [Wp]	335	325	315
Frame	Sim	Sim	Não

Fonte – Do autor (2020)

Para a execução das análises e o projeto do concentrador, foram consideradas as características do painel Swan Bifacial 60H 320-340 Watt, principalmente por ser composto por células bifaciais e com um pico de potência equivalente a 325W. Levou-se em consideração o peso do painel, sendo este mais leve, possibilitando a diminuição de gastos com estrutura e facilitando a fixação na estrutura do concentrador, não necessitando a confecção de uma moldura para a célula fotovoltaica e assim correr o risco de tapar alguma parte do J-FEN 2D. Para maiores informações sobre os painéis consultar Anexos A, B e C.

## 5.8 COMPARAÇÃO DO J-FEN 2D COM PAINEL BIFACIAL SWAN 325WP EM RELAÇÃO À UM PAINEL MONOFACIAL DA MESMA POTÊNCIA

Com os dados obtidos nas medições, juntamente com os dados referentes a radiação solar para os meses de outubro e novembro, conforme anexos D e E, dados retirados do Radiasol, foi possível calcular a quantidade de energia em kWh que o

painel SWAN 325WP consegue gerar nas mesmas condições aplicadas ao concentrador J-FEN 2D e compara-las com a quantidade de energia gerada por um painel monofacial, aplicado as mesmas condições pré-estabelecidas, conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo de ganho de energia

ENERGIA TOTAL					
Mês	Inclinação posição solar	Painel monofacial [kWh]	J-FEN SWAN 325Wp [kWh]	Fator de concentração [-]	Aumento da energia J-FEN 2D
Outubro	90°	4,34	7,19	1,71	165%
Dezembro	6°	4,19	4,77	1,43	114%
Junho	48°	4,19	8,26	1,77	197%

Fonte – Do autor (2020)

Analisando os dados obtidos para a posição 1, aplicada ao mês de outubro, com a posição equivalente a 90°, a energia média gerada por um painel monofacial foi de 4,34 kWh, e a energia média gerada pelo concentrador J-FEN, utilizando um painel bifacial SWAN com uma potência de pico equivalente a 325W, foi de 7,19 kWh, obtendo assim, um ganho equivalente a 65% na geração de energia, com um fator de concentração média, igual 1,71.

Da mesma forma, foi realizada a análise para a posição 2, a exposição dos painéis na posição de 6°, equivalente ao mês de dezembro e simulando a aplicação para os meses de verão. Considerando um painel monofacial, a energia média gerada foi equivalente a 4,19 kWh. A mesma aplicação para um painel bifacial SWAN 325W, foi obtido uma geração média de energia equivalente a 4,77 kWh. Para essa aplicação obteve-se um resultado inferior para o concentrador J-FEN 2D, obtendo assim um ganho de apenas 14% em comparação as aplicações monofacial e bifacial. Entretanto essa concentração inferior se dá no verão, época onde a radiação solar é superior e com isso a célula solar frontal absorve uma quantidade superior de radiação, sendo isso apenas um modo de compensação do J-FEN 2D, para a equalização na geração anual de energia.

Por último, foi analisado a geração média de energia na posição 3, sendo equivalente a exposição aos raios solares do mês de junho, simulando a angulação solar do inverno. Foi posicionado o concentrador J-FEN em 48°, e considerando um



painel monofacial, foi obtido uma geração média de energia equivalente a 4,19 kWh. Para um painel bifacial SWAN 325Wp, foi obtido uma geração média de energia de 8,26 kWh. Alcançando assim um fator de concentração de 1,77 e obtendo assim um ganho equivalente a 97% comparando as aplicações.

Visto que a célula frontal do protótipo concentrador J-FEN 2D, simula o comportamento de um módulo solar fotovoltaico convencional, é possível verificar que ao utilizar a estrutura construída nas medições realizadas obteve-se um percentual média de 159% de eficiência na produção de energia. O fator de concentração médio encontrado para se chegar a este valor de eficiência foi de 1,55.

## 5.9 GANHO EM QUANTIDADE DE PAINÉIS EM UMA APLICAÇÃO EM UM EDIFÍCIO COMERCIAL

Com os resultados, foi possível simular a economia em quantidades de painéis entre uma aplicação convencional com painéis monofaciais e uma situação utilizando o módulo concentrador J-FEN 2D.

Foi estipulado um consumo médio de 6300 kWh (MOHDYACOUB; FERREIRA, 2014) para um prédio comercial, definindo que seu funcionamento será de 8h por dia, em um período de 28 dias. Adotando as condições de ganhos apresentadas anteriormente e um fator de concentração média de 1,55, um painel monofacial com uma capacidade de 325 W, é capaz de gerar 72,8 kWh, necessitando assim de 87 painéis para atender a demanda de energia do prédio em questão. Nas mesmas condições, utilizando o módulo concentrador J-FEN SWAN 325 Wp, simulando um painel bifacial, a geração de energia foi de 113,1 kWh, necessitando assim de 53 painéis para atender a mesma demanda, com isso obtém-se uma redução de 39% na quantidade de painéis entre um sistema convencional e o J-FEN SWAN 325 Wp.

Na tabela 5, está representada a redução na quantidade de painéis, quando aplicado os resultados obtidos nas medições das posições de 90° e 48°, onde foram obtidas as maiores concentrações, assim gerado maior quantidade de energia, obtendo o fator de concentração igual a 1,71 para a posição de 90°, situação na qual é a proposta deste trabalho. E para a posição onde o concentrador foi exposto a uma angulação de 48°, o fator de concentração igual a 1,77, o resultado considerando a incidência dos raios solares nos meses de inverno. E assim, com os os ganhos obtidos

com a concentração média resultante das três simulações sendo elas a 90°, 48° e 6°, representando a concentração média obtida no período de um ano, onde passa por todas as estações.

Tabela 5 - Comparativo das quantidades de painéis

Fator de concentração [-]	Energia mensal gerada painel monofacial [kWh]	Quantidade de painéis monofaciais	Energia mensal gerada J-FEN SWAN 325Wp [kWh]	Quantidade de painéis bifaciais	Energia mensal gerada a mais pelo J-FEN SWAN 325Wp [kWh]	Redução na quantidade de painéis
1,71	72,8	87	124,5	51	71%	41%
1,77	72,8	87	128,9	49	77%	44%
1,55	72,8	87	119,1	53	55%	39%

Fonte – Do autor (2020)

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho projetou um concentrador solar fotovoltaico bidimensional J-FEN 2D, desenvolvido baseando-se nas leis da reflexão. O módulo concentrador foi projetado para cidade de Bento Gonçalves – RS e região da serra gaúcha.

Os resultados foram comprovados experimentalmente, visto que foram realizadas medições de tensão e corrente produzidas pelas células bifaciais, e calculada a potência e energia gerada pelo concentrador.

Notou-se que para a proposta original do projeto, a célula posterior concentrou em média 71% de potência em relação a célula frontal. Assim foi obtido uma resposta favorável do concentrador J-FEN 2D, obtendo um fator de concentração equivalente a 85,5% em relação ao projeto teórico, com uma geração média de energia 65% maior em relação a um sistema convencional.

Para a variação de posição, simulando os meses de inverno, a resposta do concentrador se aproximou significativamente do projeto teórico, chegando a um fator de concentração 88,5% em relação ao projeto teórico, obtendo assim uma média de 97% na geração de energia.

A resposta e análise da proposta do concentrador J-FEN 2D, ainda possibilita um estudo de estruturação e aplicação em condições e aplicações reais, relacionando à tipos de instalação, custos versus benefício e melhor rendimento em caso de variação do material reflexivo.

Sugere-se para um trabalho posterior, a variação no material reflexivo visando maior concentração ou melhor custo-benefício, ou uma análise do comportamento de concentração e geração de energia elétrica, onde o concentrador seja exposto as condições reais de incidência solar por um período de, pelo menos, um ano.

## REFERENCIAS

- 1- ALI, I, M. S., REDDY, K S., MALLICK, T, K. Indoor Experimental Investigations of Two Different Static 3-D Solar Concentrators. **Renewable Energy In The Service Of Mankind Vol I**, p. 741-748, dez. 2015.
- 2- BIAZETTO, Fábio André. **Otimização das regiões altamente dopadas de células solares bifaciais base e análise da passivação**. 2019. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- 3- **BRASIL. Atlas solar: Rio Grande do Sul. Camargo Schubert Engenheiros Associados, SMERS, UERGS, PUCRS, UFRGS. Curitiba, 2018. 144 p.**
- 4- BONATTO, C. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO CONCENTRADOR SOLAR ESTÁTICO PRIO3. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves – RS, 2011.
- 5- CAVALCANTE, Caio Neno Silva. **Desenvolvimento de sistema de controle e instrumentação de protótipo de concentrador de energia solar fotovoltaica e térmica com um grau de liberdade**. 2016. 211p. Trabalho de Graduação – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, Brasil, 2016.
- 6- CHEMISANA, D. Building Integrated Concentrating Photovoltaics: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n.1, p. 603-611, jan/2011.
- 7- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física 4. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1995, 4ª Edição.
- 8- HODGE, B, K. Sistemas e Aplicações de energia alternativa. Revisão técnica Marco Aurélio dos Santos. Rio de Janeiro, 2018.
- 9- JACOBSON, M. Z., & DELUCCHI, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials, 2001.
- 10-LOPEZ R. A. Energia solar para produção de eletricidade. São Paulo: Arliber Editora, 2012.
- 11-MASUDA, T, et al. Static concentrator photovoltaics for automotive applications. **Solar energy**, v.146, p.523-531, abril.2017.
- 12-PATEL, D, K., BRAHMBHATT, P,K, & PANCHAL, H. A review on compound parabolic solar concentrator for sustainable development. v. 39, n. 5, p. 533-546, jan/mar. 2017.

- 13-SANTOS, H, F, L., COSTA, V, M, C. Concentradores fotovoltaicos: uma tecnologia em declínio?, **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, abril/2018.
- 14-SEVERO, Tiago Cassol. **Desenvolvimento do Módulo Fotovoltaico Concentrador Estático HELIUS para Sistemas Autônomos**. 2005. Dissertação para a obtenção do título de mestre em engenharia e tecnologia de materiais, Faculdade de Engenharia, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,2005.
- 15-SEVERO, T, C., ZANESCO, I., MOEHLECKE, A. Desenvolvimento de um módulo fotovoltaico concentrador estático com alta concentração óptica. Porto Alegre.
- 16-TIAN, M., SU, Y., ZHENG, H., PEI, G., LI, G., RIFFAT, S. A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1272-1296, fev. 2018.
- 17-XUAN, Q., et al. Design, optimization and performance analysis of an asymmetric concentrator-PV type window for the building south wall application. **Solar Energy**, v .193, p. 422-433, november/2019.
- 18-ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em < <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html> >. Acesso em 01 de dezembro de 2020.
- 19-MOHDYACOUB, M, A., FERREIRA, C, C. Diagnóstico do consumo de energia de edificações em comparação com a simulação em dispositivos gratuitos. **Revista Delos: Desarrollo Local Sostenible**, n. 20, Junho/2014.

## APÊNDICE A - DADOS DAS MEDIÇÕES NA POSIÇÃO 1 EQUIVALENTE A 90°

Apêndice A					
VALORES MÉDIOS - PARA POSIÇÃO 1 - INCLINAÇÃO 90° - OUTUBRO					
hora	Potências Célula Frontal	Potência da Célula Posterior	Posterior com JFEN	Potência real JFEN	Comparando o JFEN com um painel monofacial
08:00	0,019171647	0,017971625	94%	0,03714327	194%
08:10	0,021800165	0,019382832	89%	0,04118300	189%
08:20	0,023962818	0,020333350	85%	0,04429617	185%
08:30	0,026179110	0,021523663	82%	0,04770277	182%
08:40	0,027735156	0,022251099	80%	0,04998626	180%
08:50	0,030310800	0,023791200	78%	0,05410200	178%
09:00	0,032616218	0,025308050	78%	0,05792427	178%
09:10	0,034349424	0,026760760	78%	0,06111018	178%
09:20	0,035540009	0,027476379	77%	0,06301639	177%
09:30	0,036908817	0,028687313	78%	0,06559613	178%
09:40	0,038312673	0,027672926	72%	0,06598560	172%
09:50	0,040354984	0,026879711	67%	0,06723470	167%
10:00	0,041238551	0,024758849	60%	0,06599740	160%
10:10	0,042294331	0,024796115	59%	0,06709045	159%
10:20	0,043414860	0,024890936	57%	0,06830580	157%
10:30	0,044208041	0,023608925	53%	0,06781697	153%
10:40	0,044983356	0,021938014	49%	0,06692137	149%
10:50	0,045746312	0,019827570	43%	0,06557388	143%
11:00	0,046109048	0,017124059	37%	0,06323311	137%
11:10	0,046012387	0,015328656	33%	0,06134104	133%
11:20	0,046021999	0,012302435	27%	0,05832443	127%
11:30	0,046324121	0,010066020	22%	0,05639014	122%
11:40	0,045520372	0,008555766	19%	0,05407614	119%
11:50	0,045383220	0,007938979	17%	0,05332220	117%
12:00	0,044224785	0,008678455	20%	0,05290324	120%
12:10	0,045179337	0,008230726	18%	0,05341006	118%
12:20	0,045216600	0,009447765	21%	0,05466437	121%
12:30	0,045548331	0,011648464	26%	0,05719679	126%
12:40	0,045136276	0,014466414	32%	0,05960269	132%
12:50	0,045225832	0,017761073	39%	0,06298691	139%
13:00	0,045105672	0,020833500	46%	0,06593917	146%
13:10	0,044238923	0,023425704	53%	0,06766463	153%
13:20	0,043516634	0,026014745	60%	0,06953138	160%
13:30	0,042450357	0,027798656	65%	0,07024901	165%
13:40	0,041664349	0,029435840	71%	0,07110019	171%
13:50	0,040391698	0,029398117	73%	0,06978981	173%
14:00	0,039190211	0,029632625	76%	0,06882284	176%
14:10	0,038047509	0,029714430	78%	0,06776194	178%
14:20	0,036394667	0,031445634	86%	0,06784030	186%
14:30	0,034307452	0,032539500	95%	0,06684695	195%
14:40	0,033038154	0,033775945	102%	0,06681410	202%
14:50	0,031507604	0,035114816	111%	0,06662242	211%
15:00	0,029782304	0,033834460	114%	0,06361676	214%
15:10	0,027576077	0,032480053	118%	0,06005613	218%
15:20	0,025250572	0,030927600	122%	0,05617817	222%
15:30	0,023785772	0,030501564	128%	0,05428734	228%
15:40	0,021737958	0,030416733	140%	0,05215469	240%
15:50	0,019835050	0,031732978	160%	0,05156803	260%
16:00	0,017416001	0,031300431	180%	0,04871643	280%

## APÊNDICE B - DADOS DAS MEDIÇÕES NA POSIÇÃO 2 EQUIVALENTE A 6°

Apêndice B					
VALORES MÉDIOS - PARA POSIÇÃO 2 - INCLINAÇÃO 6°					
hora	Potência Célula Frontal	Potência da Célula Posterior	Posterior com J-FEN	Potência real JFEN	Comparando o JFEN com um painel monofacial
08:00	0,065739950	0,007716128	12%	0,073456078	112%
08:10	0,073823364	0,004669300	6%	0,078492664	106%
08:20	0,076170335	0,004759163	6%	0,080929498	106%
08:30	0,084842146	0,004817640	6%	0,089659786	106%
08:40	0,091118400	0,005025904	6%	0,096144304	106%
08:50	0,096117863	0,005476961	6%	0,101594824	106%
09:00	0,101336146	0,006001772	6%	0,107337918	106%
09:10	0,109044132	0,006563896	6%	0,115608028	106%
09:20	0,110951480	0,007255264	7%	0,118206743	107%
09:30	0,115684677	0,010117700	9%	0,125802377	109%
09:40	0,119144260	0,015769086	13%	0,134913346	113%
09:50	0,115723144	0,022115712	19%	0,137838856	119%
10:00	0,123934836	0,027987784	23%	0,151922619	123%
10:10	0,115369826	0,028179440	24%	0,143549266	124%
10:20	0,132507810	0,032935911	25%	0,165443721	125%
10:30	0,135289791	0,029746621	22%	0,165036412	122%
10:40	0,136980135	0,035486694	26%	0,172466829	126%
10:50	0,141212048	0,036496925	26%	0,177708973	126%
11:00	0,136093867	0,037737015	28%	0,173830882	128%
11:10	0,143635854	0,037881580	26%	0,181517434	126%
11:20	0,145421756	0,037785937	26%	0,183207693	126%
11:30	0,144677855	0,038027744	26%	0,182705599	126%
11:40	0,145808465	0,037836480	26%	0,183644945	126%
11:50	0,145845185	0,037713015	26%	0,1835582	126%
12:00	0,147025650	0,037804997	26%	0,184830647	126%
12:10	0,146813694	0,037990482	26%	0,184804176	126%
12:20	0,145944818	0,038336706	26%	0,184281524	126%
12:30	0,145867632	0,040508360	28%	0,186375992	128%
12:40	0,146685423	0,041480892	28%	0,188166315	128%
12:50	0,144154318	0,042499216	29%	0,186653534	129%
13:00	0,144495480	0,043844360	30%	0,18833984	130%
13:10	0,143645376	0,043827560	31%	0,187472936	131%
13:20	0,142241002	0,043980623	31%	0,186221624	131%
13:30	0,138170723	0,042940628	31%	0,18111135	131%
13:40	0,136549982	0,041272178	30%	0,17782216	130%
13:50	0,135994158	0,039883617	29%	0,175877775	129%
14:00	0,127644160	0,032727959	26%	0,160372119	126%
14:10	0,119970550	0,031918868	27%	0,151889418	127%
14:20	0,119502685	0,024056921	20%	0,143559606	120%
14:30	0,114812040	0,015729724	14%	0,130541764	114%
14:40	0,111397424	0,011258823	10%	0,122656247	110%
14:50	0,106937718	0,009585634	9%	0,116523352	109%
15:00	0,102562121	0,007511653	7%	0,110073774	107%
15:10	0,098056758	0,006547841	7%	0,104604598	107%
15:20	0,092949269	0,005986038	6%	0,098935306	106%
15:30	0,088113976	0,005501539	6%	0,093615515	106%
15:40	0,081963599	0,005075968	6%	0,087039567	106%
15:50	0,077636442	0,004705492	6%	0,082341934	106%
16:00	0,060887231	0,004400876	7%	0,065288107	107%

## APÊNDICE C - DADOS DAS MEDIÇÕES NA POSIÇÃO 3 EQUIVALENTE A 48°

Apêndice C					
VALORES MÉDIOS - PARA POSIÇÃO 3 - INCLINAÇÃO 48°					
hora	Potências Célula Frontal	Potência da Célula Posterior	Posterior com J-FEN	Potência real JFEN	Comparando o JFEN com um painel monofacial
08:00	0,027926595	0,012755056	46%	0,040681651	146%
08:10	0,0429048	0,011619738	27%	0,054524538	127%
08:20	0,05256185	0,018330293	35%	0,070892143	135%
08:30	0,057310475	0,021354125	37%	0,0786646	137%
08:40	0,064811565	0,02601316	40%	0,090824725	140%
08:50	0,068268262	0,032099519	47%	0,100367781	147%
09:00	0,072922512	0,035041512	48%	0,107964024	148%
09:10	0,076081779	0,038470156	51%	0,114551934	151%
09:20	0,079988797	0,044631054	56%	0,124619851	156%
09:30	0,078111045	0,02200582	28%	0,100116865	128%
09:40	0,09023764	0,051702105	57%	0,141939745	157%
09:50	0,094545923	0,056998979	60%	0,151544902	160%
10:00	0,09590735	0,06444682	67%	0,16035417	167%
10:10	0,099813978	0,073234795	73%	0,173048773	173%
10:20	0,103461806	0,080115569	77%	0,183577375	177%
10:30	0,106125195	0,082890816	78%	0,189016011	178%
10:40	0,103606972	0,065435136	63%	0,169042108	163%
10:50	0,114576798	0,093966241	82%	0,208543039	182%
11:00	0,113889468	0,095360653	84%	0,209250121	184%
11:10	0,115088086	0,100778433	88%	0,215866519	188%
11:20	0,1167305	0,106753434	91%	0,223483934	191%
11:30	0,11775786	0,110993834	94%	0,228751694	194%
11:40	0,11867039	0,11421605	96%	0,23288644	196%
11:50	0,123570474	0,116892671	95%	0,240463145	195%
12:00	0,126432969	0,118979235	94%	0,245412204	194%
12:10	0,124815762	0,117364196	94%	0,242179958	194%
12:20	0,120998976	0,114174464	94%	0,23517344	194%
12:30	0,122057215	0,112951454	93%	0,235008669	193%
12:40	0,120752496	0,113700712	94%	0,234453208	194%
12:50	0,120167664	0,112879213	94%	0,233046877	194%
13:00	0,119364707	0,112055255	94%	0,231419962	194%
13:10	0,118081964	0,10991493	93%	0,227996894	193%
13:20	0,119456383	0,11317485	95%	0,232631233	195%
13:30	0,115580028	0,108181216	94%	0,223761244	194%
13:40	0,113359638	0,10571652	93%	0,219076158	193%
13:50	0,114373759	0,110115695	96%	0,224489454	196%
14:00	0,1155836	0,111398853	96%	0,226982453	196%
14:10	0,112795868	0,107465178	95%	0,220261046	195%
14:20	0,102416704	0,09686034	95%	0,199277044	195%
14:30	0,099582912	0,09507836	95%	0,194661272	195%
14:40	0,095080703	0,083597875	88%	0,178678578	188%
14:50	0,091053872	0,079491933	87%	0,170545805	187%
15:00	0,087458745	0,074891516	86%	0,162350261	186%
15:10	0,083647579	0,070418628	84%	0,154066207	184%
15:20	0,078302119	0,066000084	84%	0,144302203	184%
15:30	0,074528029	0,061072624	82%	0,135600652	182%
15:40	0,070307759	0,049346152	70%	0,11965391	170%
15:50	0,06529325	0,051603233	79%	0,116896483	179%
16:00	0,06146868	0,04908811	80%	0,11055679	180%



ANEXO A - CARACTERISTICAS PAINEL 335W – UPSOLAR UP-M335P

## Poly Series | 6" PV Module 72 cells

### Electrical Characteristics

MODEL	UP-M325P	UP-M330P	UP-M335P	UP-M340P	UP-M345P	UP-M350P
Max Power Pm (Wp)	325	330	335	340	345	350
Max Power Voltage Vm (V)	36.9	37.1	37.3	37.5	37.7	37.9
Max Power Current Im (A)	8.81	8.89	8.98	9.07	9.15	9.23
Open-Circuit Voltage Voc (V)	46.6	46.8	47.0	47.2	47.4	47.6
Short-Circuit Current Isc (A)	9.06	9.14	9.22	9.32	9.40	9.49
Module Efficiency	16.7%	17.0%	17.3%	17.5%	17.8%	18.0%
Maximum System Voltage (V)	1000 (IEC)/1000 (UL) 1500 (IEC)/1500 (UL)					
Power Tolerance	0/-3%					
Series Fuse Rating (A)	20A					

STC Irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, Module temperature 25°C, AM-1.5

### Components & Mechanical Data

Front Glass	High Transparency Tempered Glass 0.125" // 3.2 mm
Junction Box	IP 65 or above
Bypass Diode	3 diodes
Output Cables	1.0 m // IEC, UL approved (4 mm <sup>2</sup> 12AWG) (PV Wire Type)
Connectors	MC4 compatible (IP67, IEC and UL approved)
Frame	Anodized aluminum alloy type 6063-T5
Encapsulation Material	EVA (0.018" // 0.45 mm ± 0.001" // 0.03 mm thickness)
Back Sheet	White multilayer polymer film
Temperature Range	-40°F to +194°F // -40°C to +90°C
Max Load	75 lbs / ft <sup>2</sup> (UL Standard) // 5400 Pa (IEC Standards)
Impact Resistance	Steel ball - 1.18 lbs // 535 g dropped from 51" // 1.3 m high

### Specifications

Cells	Polycrystalline silicon solar cells 6" x 6" // 156 mm x 156 mm
Number of Cells	72 (6 x 12)
Dimensions (in // mm)	77.01 x 39.06 x 1.57 // 1956 x 992 x 40
Weight (lb // kg)	50.0 // 22.7

### Temperature Coefficients

NOCT (°C)	45 ± 2
Temperature Coefficients of Isc (% / °C)	0.05 ± 0.01
Temperature Coefficients of Voc (% / °C)	-0.30 ± 0.02
Temperature Coefficients of Im (% / °C)	-0.02 ± 0.02
Temperature Coefficients of Vm (% / °C)	-0.42 ± 0.03
Temperature Coefficients of Pm (% / °C)	-0.40 ± 0.05

### IV Curves

### Options Available

SolarEdge Integrated

Rear View

Upsolar is not responsible for damages caused by errors or omissions on this data sheet. All information is subject to change without notice.

www.upsolar.com | **08**

ANEXO B - CARACTERISTICAS PAINEL SWAN BIFACIAL 60H 320-340 WATT

### Engineering Drawings

Front Side Back

lenth: 2mm  
Width: 2mm  
Height: 1mm  
RowPitch: 2mm

### Electrical Performance & Temperature Dependence

**Current-Voltage & Power-Voltage Curves (320W)**

**Temperature Dependence of Isc, Voc, Pmax**

### Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)  
31 pcs/pallets, 62 pcs/stack, 806 pcs/ 40'HQ Container

### Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono PERC 158.75×158.75mm
No. of cells	120 (6×20)
Dimensions	1704×1008×35mm (67.09×39.69×1.38 inch)
Weight	19.5kg (43.0 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminum Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm <sup>2</sup> (+): 250mm (-): 150mm or Customized Length

### SPECIFICATIONS

Module Type	JKM320M-60H-TV		JKM325M-60H-TV		JKM330M-60H-TV		JKM335M-60H-TV		JKM340M-60H-TV	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	320Wp	238Wp	325Wp	241Wp	330Wp	245Wp	335Wp	249Wp	340Wp	252Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	32.90V	30.93V	33.10V	31.13V	33.24V	31.33V	33.40V	31.48V	33.62V	31.63V
Maximum Power Current (Imp)	9.73A	7.68A	9.82A	7.75A	9.93A	7.82A	10.03A	7.90A	10.11A	7.98A
Open-circuit Voltage (Voc)	40.10V	37.77V	40.30V	37.96V	40.39V	38.04V	40.46V	38.11V	40.60V	38.24V
Short-circuit Current (Isc)	10.07A	8.13A	10.15A	8.20A	10.25A	8.28A	10.34A	8.35A	10.43A	8.42A
Module Efficiency STC (%)	18.62%		18.91%		19.20%		19.49%		19.79%	
Operating Temperature(°C)	-40°C→+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0→+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.29%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

### BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		320Wp	341Wp	347Wp	352Wp	357Wp
<b>5%</b>	Maximum Power (Pmax)	336Wp	341Wp	347Wp	352Wp	357Wp
	Module Efficiency STC (%)	19.55%	19.86%	20.16%	20.47%	20.78%
<b>15%</b>	Maximum Power (Pmax)	368Wp	374Wp	380Wp	385Wp	391Wp
	Module Efficiency STC (%)	21.41%	21.75%	22.08%	22.42%	22.76%
<b>25%</b>	Maximum Power (Pmax)	400Wp	406Wp	413Wp	419Wp	425Wp
	Module Efficiency STC (%)	23.27%	23.64%	24.00%	24.37%	24.74%

\*STC: ☀ Irradiance 1000W/m<sup>2</sup> 🌡 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5

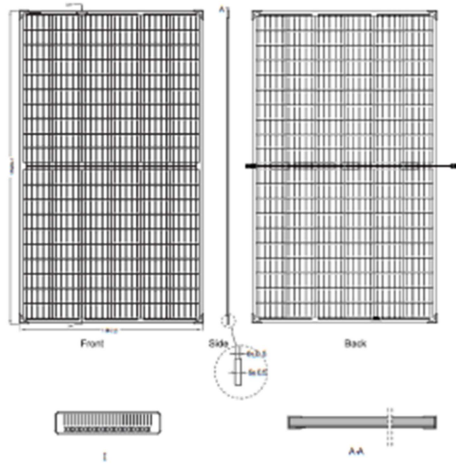
NOCT: ☀ Irradiance 800W/m<sup>2</sup> 🌡 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌪 Wind Speed 1m/s

\* Power measurement tolerance: ± 3%

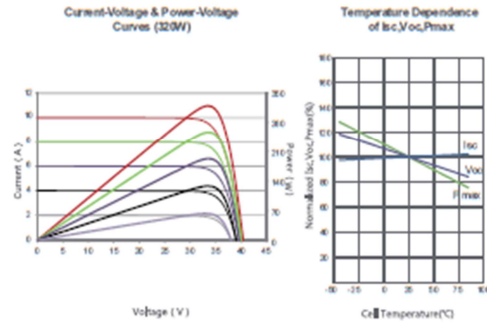
The company reserves the final right for explanation on any of the information presented hereby. JKM320-340M-60H-TV-F35-A3-EN

ANEXO C - CARACTERISTICAS PAINEL SWAN BIFACIAL 60H 310-330 WATT

Engineering Drawings



Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono PERC 158.75x158.75mm
No. of cells	120 (5x20)
Dimensions	1698x1002x6mm (66.85x39.45x0.24 inch)
Weight	24.0kg (52.9 lbs)
Front Glass	2.5mm, Anti-Reflection Coating
Back Glass	2.5mm heat strengthened glass
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1x4.0mm <sup>2</sup> (+) 250mm, (-) 150mm or customized length

Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)  
33 pcs/pallet, 66 pcs/stack, 792 pcs/40HQ Container

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM310M-60H-BDVP		JKM315M-60H-BDVP		JKM320M-60H-BDVP		JKM325M-60H-BDVP		JKM330M-60H-BDVP	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (P <sub>max</sub> )	310Wp	231Wp	315Wp	235Wp	320Wp	239Wp	325Wp	242Wp	330Wp	246Wp
Maximum Power Voltage (V <sub>mp</sub> )	33.1V	30.0V	33.4V	30.3V	33.6V	30.5V	33.9V	30.7V	34.2V	31.0V
Maximum Power Current (I <sub>mp</sub> )	9.37A	7.70A	9.44A	7.76A	9.52A	7.82A	9.59A	7.89A	9.66A	7.94A
Open-circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	39.8V	36.6V	40.1V	36.9V	40.4V	37.1V	40.7V	37.4V	41.0V	37.7V
Short-circuit Current (I <sub>sc</sub> )	9.87A	7.99A	9.95A	8.06A	10.01A	8.12A	10.08A	8.17A	10.16A	8.22A
Module Efficiency STC (%)	18.22%		18.51%		18.81%		19.10%		19.40%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	20A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of P <sub>max</sub>	-0.36%/°C									
Temperature coefficients of V <sub>oc</sub>	-0.29%/°C									
Temperature coefficients of I <sub>sc</sub>	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

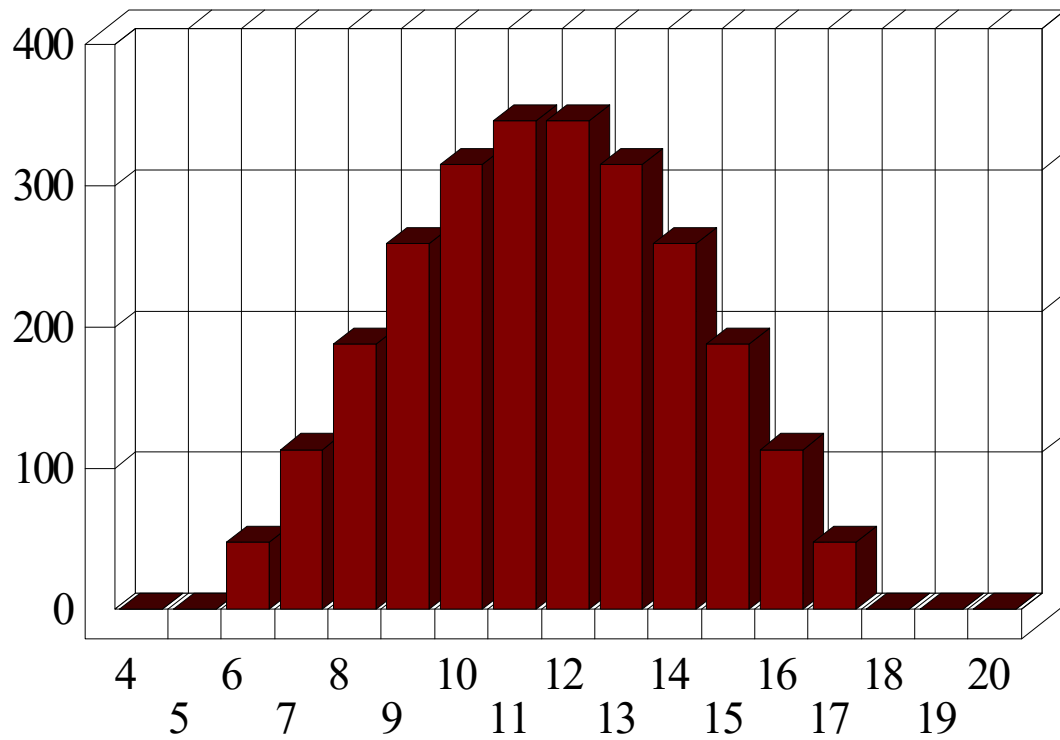
BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		JKM310M-60H-BDVP	JKM315M-60H-BDVP	JKM320M-60H-BDVP	JKM325M-60H-BDVP	JKM330M-60H-BDVP
5%	Maximum Power (P <sub>max</sub> )	326Wp	331Wp	336Wp	341Wp	347Wp
	Module Efficiency STC (%)	19.13%	19.44%	19.75%	20.06%	20.37%
15%	Maximum Power (P <sub>max</sub> )	357Wp	362Wp	368Wp	374Wp	380Wp
	Module Efficiency STC (%)	20.95%	21.29%	21.63%	21.97%	22.31%
25%	Maximum Power (P <sub>max</sub> )	388Wp	394Wp	400Wp	406Wp	413Wp
	Module Efficiency STC (%)	22.78%	23.14%	23.51%	23.88%	24.24%

\*STC: ☀ Irradiance 1000W/m<sup>2</sup> 🌡 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5  
 NOCT: ☀ Irradiance 800W/m<sup>2</sup> 🌡 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌀 Wind Speed 1m/s  
 • Power measurement tolerance: ± 3%

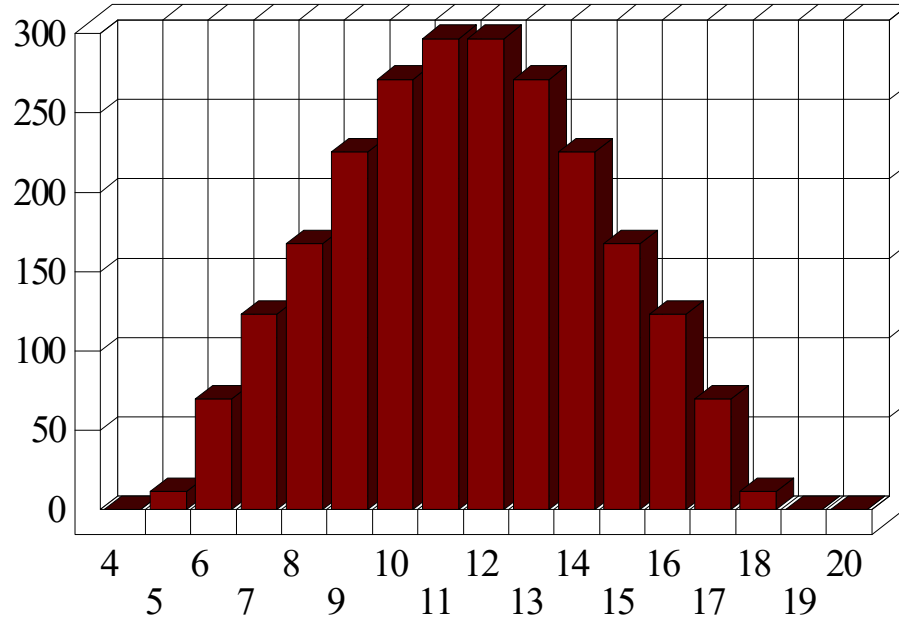
The company reserves the final right for explanation on any of the information presented hereby. JKM310-330M-60H-BDVP-A2-EN

## ANEXO D - RADIAÇÃO SOLAR PARA O MÊS DE OUTUBRO

Radiação Solar Horária Wh/m<sup>2</sup>

Fonte: RADIASOL

## ANEXO E - RADIAÇÃO SOLAR PARA O MÊS DE NOVEMBRO

Radiação Solar Horária Wh/m<sup>2</sup>

Fonte: RADIASOL