



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

GABRIEL DA SILVA

SIDINEI AUGUSTO DA SILVA JUNIOR

**AS VANTAGENS E CUIDADOS NA UTILIZAÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS**

Palhoça

2022

GABRIEL DA SILVA
SIDINEI AUGUSTO DA SILVA JUNIOR

**AS VANTAGENS E CUIDADOS NA UTILIZAÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof. Francielli Scarpini Barbosa Cordeiro, Ma. Eng.

Palhoça

2022

GABRIEL DA SILVA
SIDINEI AUGUSTO DA SILVA JUNIOR

**AS VANTAGENS E CUIDADOS NA UTILIZAÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 08 de março de 2022

Professora e Orientadora Francielli Scarpini Barbosa Cordeiro, Ma. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Fabiano Max da Costa, Esp. Eng. Eletricista
Universidade do Sul de Santa Catarina

Convidado, Eduardo Müller Martins, Eng. Eletricista
Quantum Engenharia LTDA

AGRADECIMENTOS

Gabriel da Silva: Primeiramente agradeço a Deus por me agraciar com o dom da vida, me concedendo saúde e força para chegar até aqui. Sem ele, nada disso seria possível.

À minha família, meu pai Adair da Silva, minha mãe Rosangela Aparecida Coelho da Silva e meu irmão Rafael da Silva, agradeço por ser meu alicerce, me incentivando e apoiando incondicionalmente.

Agradeço à minha namorada Amanda Ramos Meurer, por todo apoio, paciência e companheirismo ao longo desta trajetória.

Ao meu amigo, Sidinei Augusto da Silva Junior, agradeço a dedicação e parceria ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À nossa orientadora, Francielli Scarpini Barbosa Cordeiro, sou grato a ter aceitado nos conduzir na construção desta monografia.

Sidinei Augusto da Silva Junior: Primeiramente gostaria de agradecer a minha falecida mãe, que em seus últimos dias explanou seu desejo em ver seu filho finalizando um curso de graduação.

Também gostaria de mostrar minha imensa gratidão a minha noiva Fabiana Frigo Souza, que me ajudou a trilhar este caminho difícil, e sempre me incentivou a nunca desistir.

Agradeço mais ainda a meu Padrinho, Paulo Sergio dos Santos, que sempre foi a pessoa que eu quis seguir seus passos, e ser motivo de orgulho.

Também não posso esquecer de minha irmã, Natalia Tereza da Silva, que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, desde os mais difíceis aos melhores.

A minha orientadora Francielli Scarpini Barbosa Cordeiro que fez este trabalho acontecer.

Por fim, quero agradecer aos amigos que o curso de Engenharia Elétrica e esta carreira me trouxera, André Luiz Canela, Paulo Sérgio Moreira, Gabriel da Silva, Matheus Braz e Luis Felipe Goulart.

A vida me ensinou a nunca desistir, nem ganhar, nem perder, mas procurar evoluir
(Chorão, Thiago Castanho, 2006).

RESUMO

Tendo em vista a crescente demanda por novas fontes de energia elétrica, busca-se também uma evolução tecnológica das energias renováveis já utilizadas, uma delas é a energia fotovoltaica. Portanto, o trabalho apresenta as contribuições que os módulos fotovoltaicos bifaciais podem trazer para a matriz energética brasileira, abordando sobre as características e os métodos de instalação desta tecnologia, que pode ser ainda mais explorada em nosso país. Sendo assim, se faz necessário uma análise das características de funcionamento dos módulos monofaciais convencionais, para após, abordar sobre as vantagens que os bifaciais trazem sobre os convencionais.

Palavras-chave: Módulos fotovoltaicos. Bifacial. Convencional.

ABSTRACT

In view of the growing demand for new sources of electrical energy, a technological evolution of the renewable energies already used is also sought, one of which is photovoltaic energy. Therefore, the work presents the contributions that bifacial photovoltaic modules can bring to the Brazilian energy matrix, addressing the characteristics and installation methods of this technology, which can be further explored in our country. Therefore, it is necessary to analyze the operating characteristics of conventional monofacial modules, and then address the advantages that bifacials bring over conventional ones.

Keywords: Photovoltaic modules. Bifacial. Conventional.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Crise hídrica.....	10
Figura 2 - Módulos Bifaciais.....	11
Figura 3 - Expansão da matriz energética.....	14
Figura 4 – Efeito Fotovoltaico.....	15
Figura 5 - Junção p-n.....	16
Figura 6 – Componentes da radiação solar.....	17
Figura 7 - Elementos de um módulo fotovoltaico.....	19
Figura 8 – Estrutura física Convencional x Bifacial.....	20
Figura 9 – Estrutura do módulo bifacial.....	21
Figura 10 – Albedo em diferentes superfícies.....	22
Figura 11 - Página inicial - PVSYST®.....	26
Figura 12 - Página da base de dados - PVSYST®.....	26
Figura 13 - Página "Acoplado a rede" - PVSYST®.....	27
Figura 14 - Mapa de irradiação solar do Brasil.....	28
Figura 15 - UFV AURORA.....	29
Figura 16 – Terreno da usina.....	32
Figura 17 - Plataforma - Aurora Vision.....	33
Figura 18 - Página de dados - Aurora Vision.....	34
Figura 19 - Histórico de geração.....	34
Figura 20 - Índice de albedo aplicado.....	38
Figura 21- Resultado de perdas.....	39
Figura 22 - Consulta de mercado.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz Energética Brasileira.....	14
Tabela 2 - Eficiência de um módulo fotovoltaico atual.....	18
Tabela 3 - Ganho de reflexão	22
Tabela 4 – Irradiação média por região brasileira	29
Tabela 5 – Características Módulo LR4HBD-435M.....	30
Tabela 6 – Características Inversor PVS-175-TL.....	31
Tabela 7 – Características Inversor PVS-120-TL.....	31
Tabela 8 - Aquisição de dados 1.....	35
Tabela 9 - Dados adquiridos.....	37
Tabela 10 – Módulo utilizado.....	38
Tabela 11 - Dados simulados.....	40
Tabela 12 - Comparativo - Simulação x Planta real.....	41

SUMÁRIO

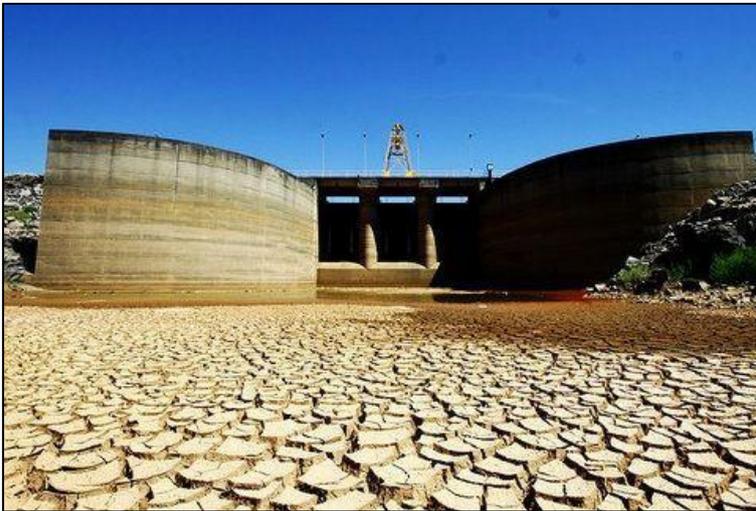
1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	12
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA	13
2.2	ENERGIA FOTOVOLTAICA	15
2.2.1	Efeito Fotovoltaico.....	15
2.2.2	Tipos de radiação solar	16
2.3	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	18
2.3.1	Módulos fotovoltaicos convencionais.....	18
2.3.2	Módulos Fotovoltaicos Bifaciais.....	19
2.3.2.1	Rendimento Módulos Fotovoltaicos Bifaciais	21
2.3.2.1.1	Importância do albedo nos painéis bifaciais.....	22
3	METODOLOGIA.....	24
4	DESENVOLVIMENTO.....	25
4.1	SIMULADOR PVSYST®	25
4.2	USINA FOTOVOLTAICO – AURORA I, II, III & IV	27
4.2.1	Albedo da usina	32
4.3	AQUISIÇÃO DE DADOS	32
4.4	SIMULAÇÃO.....	37
4.5	COMPARAÇÃO SIMULADOR X PLANTA REAL	40
4.6	RESULTADOS OBTIDOS	42
5	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O território brasileiro é capaz de fornecer a seu sistema de energia elétrica, diversas fontes de energias primárias de geração de energia, como hidráulica, biomassa, eólica e entre outras. Porém 60% do país depende do fornecimento de energia elétrica através de hidrelétricas, ANEEL 02/2022 (FALCÃO et. al., 2019).

Segundo Galvão (2015), a crise hídrica no ano de 2015, e que ainda está sendo vivenciada no país, evidenciou os conflitos entre a geração de energia e o uso múltiplo das águas, conforme vemos na Figura 1.

Figura 1 - Crise hídrica



Fonte: O Maringá (2022)

Na contramão da crise hídrica, vem surgindo nos últimos anos, uma grande esperança em outras fontes de energia, as renováveis, por exemplo: eólica e solar. As duas fontes de energia vêm aumentando sua contribuição na matriz energética nos últimos anos, porém para ter um grande impacto real na matriz energética do país, é necessário um grande investimento em tecnologia (BRONZATTI et al., 2008).

Segundo Fernández (2020), a energia solar fotovoltaica vem ganhando espaço através da utilização de módulos fotovoltaicos convencionais, transformando a irradiação solar em energia elétrica.

Neste contexto, nota-se que os módulos fotovoltaicos convencionais, o monofaciais já são uma realidade em nosso mercado, e vem contribuindo em diversos aspectos no Brasil, tanto no financeiro, quanto no ambiental.

Porém a busca por novas tecnologias e a melhoria contínua nas tecnologias existentes não podem parar, conforme trás Muniz Filho (2021) é justificável a realização de um estudo aprofundado das especificidades do emprego de módulos bifaciais, conforme vemos na Figura 2 em um projeto de usina fotovoltaica, abordando as características de sua instalação, juntamente com fatores que podem melhorar o ganho de produção com o uso desta tecnologia.

Figura 2 - Módulos Bifaciais



Fone: Portal Solar (2022)

Os módulos fotovoltaicos bifaciais vêm aquecendo o mercado de energia solar, e trazendo novos patamares na produção de energia elétrica. Porém a sua aparição tão repentina acaba trazendo incertezas e dúvidas sobre sua aplicação e utilização.

Incertezas por conta da falta dados técnicos em relação ao real ganho na geração de energia elétrica, que essa disposição bifacial do módulo pode trazer no sistema em que ele está instalado e também por falta de uma orientação para a melhor utilização destes módulos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a crescente demanda por energia elétrica, a busca por novas fontes de energia ou o melhor aproveitamento das fontes já existentes, se torna uma busca incansável entre os profissionais da área da geração de energia elétrica.

Neste sentido, uma análise das vantagens que os módulos bifaciais, quando bem utilizados, podem trazer sobre os módulos monofaciais, se faz de extrema importância na melhoria do sistema de geração de energia fotovoltaica.

Vantagem essa que pode ser observada no aumento de geração que os módulos bifaciais trazem sobre os módulos monofaciais, por conta da sua capacidade de receber a luminosidade refletida do solo na parte inferior do módulo.

Bem como, também otimizar a geração por área ocupada, visto que um módulo com capacidade de geração de energia superior, pode se usar uma quantidade menor de módulos para se atender a uma determinada demanda energética.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho tem como objetivo estudar as aplicações de módulos fotovoltaicos, e obter resultados de medições através de acompanhamento de monitoramento e medições instantâneas de sistemas reais.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho vem apresentar as vantagens na utilização de módulos bifaciais, tanto em sistemas fotovoltaicos que utilizam sistemas de fixação fixos, com *trackers* e estruturas sobre laje.

1.3.2 Objetivos Específicos

Atendendo o objetivo geral, também será possível atender os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as diferenças dos módulos monofaciais e bifaciais;
- Apresentar ganhos reais na utilização de módulos bifaciais;
- Indicar os principais cuidados que devem ser tomados para a utilização de módulos bifaciais;
- Conseguir definir em quais situações os módulos bifaciais podem ser aplicados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, os trabalhos trazidos, terão o foco em apresentar a matriz energética brasileira, os módulos fotovoltaicos monofaciais e os módulos fotovoltaicos bifaciais. Primeiramente sobre a matriz energética traremos a sua composição e evoluções nos últimos anos e em seguida mostraremos o funcionamento dos módulos fotovoltaicos monofaciais e bifaciais.

Na medida em que foram sendo descobertas e utilizadas, as diversas fontes de energia impactaram fortemente os rumos que a civilização humana tomou. Entretanto, nenhuma transição de uma fonte para outra foi causada por conta do esgotamento físico da fonte anterior, mas sim por motivos de carácter social, econômico e geopolítico (CARVALHO, 2009).

Conforme citado, não é algo recente as mudanças na matriz energética dos países em todo o mundo. Nesta mesma linha, hoje o Brasil vem explorando novas fontes de energia, tecnologia e formas de trabalho. E diante do cenário em que o Brasil vem vivendo hoje, de crise hídrica, falta de recursos e valores de energia elétrica em altos patamares, é inevitável a busca por novas soluções de eficiência energética e geração de energia elétrica.

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA

Hoje a geração de energia elétrica através das fontes renováveis vem ganhando espaço dentro da matriz energética brasileira, com grandes incentivos na comercialização de módulos fotovoltaicos e demais equipamentos de UFV's. Conforme podemos ver na Tabela 1, as UFV's já são uma realidade, sendo responsável por 2,67% da potência total da matriz energética brasileira.

Tabela 1 - Matriz Energética Brasileira

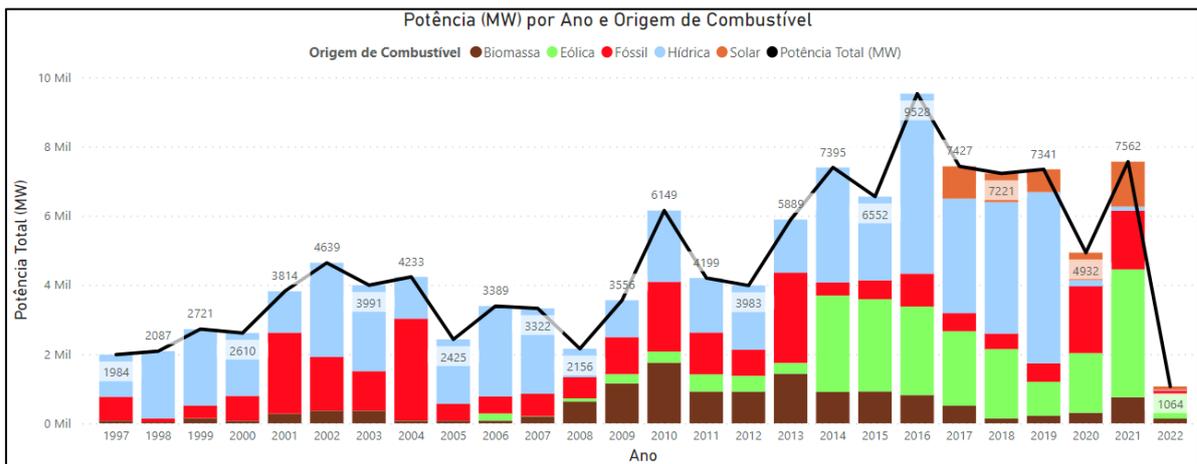
Tipo	Quantidade	Potência Outorga (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	% (Pot. Fiscalizada)
UHE	223	103.454.926,00	103.003.362,00	56,34%
UTE	3231	55.448.646,81	44.939.141,71	24,58%
EOL	1187	34.982.668,86	21.585.878,86	11,81%
PCH	540	7.213.898,32	5.576.996,57	3,05%
UFV	9543	43.309.356,31	4.876.010,61	2,67%
UTN	3	3.340.000,00	1.990.000,00	1,09%
CGH	744	868.472,92	844.777,92	0,46%
CGU	1	50,00	50,00	0,00%
Total	15472	248.618.019,22	182.816.217,67	100,00%

Fonte: ANEEL (2022)

No Brasil, a participação das fontes renováveis na matriz energética sempre foi muito alta. Este arranjo torna o Brasil um caso único, quando comparado com outros países de porte econômico e renda média equivalente (CAPRIGLIONE, 2006).

Apesar dos fortes incentivos na utilização de fontes renováveis para a geração de energia elétrica, é nítido a dependência do Brasil em hidrelétricas, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Expansão da matriz energética



Fonte: ANEEL (2022)

As UFV's começam a aparecer nos dados da ANEEL apenas em 2017. Porém nota-se que sua contribuição e crescimento vem sendo de grande importância em épocas de crise hídrica.

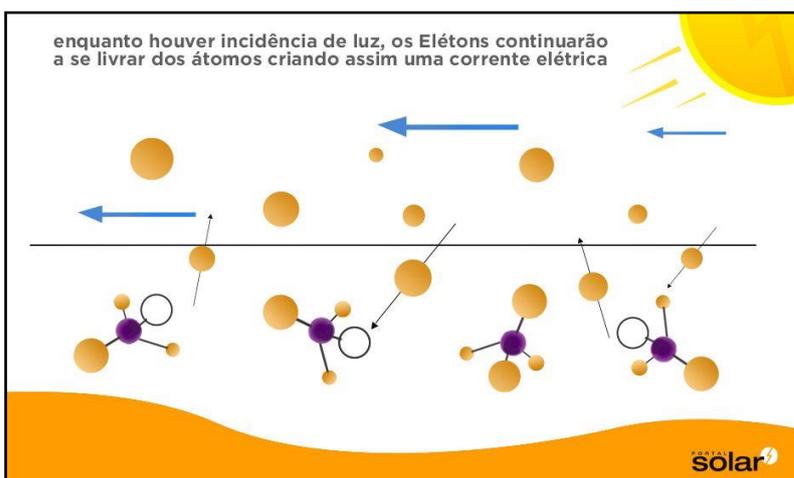
2.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA

Energia fotovoltaica ou energia solar, é o nome dado a energia que é produzida a partir da luz do sol. O termo “fotovoltaico” vem da junção da palavra grega *fotos* que significa luz, e de *volt*, que é a unidade de força eletromotriz, que por sua vez teve sua origem do sobrenome do físico italiano, Alessandro Volta, que em 1800, descobriu a pilha elétrica (PORTAL SOLAR, 2022).

2.2.1 Efeito Fotovoltaico

O processo de transformação da energia contida na radiação solar em energia elétrica, é conhecido como efeito fotovoltaico. O físico francês Edmond Becquerel, foi o primeiro cientista a observar a ocorrência do efeito fotovoltaico em determinados materiais semicondutores. Becquerel observou que alguns materiais semicondutores, tinham a capacidade de absorver a energia contida nos fótons irradiados pela energia solar, quebrando as ligações químicas que formam a estrutura molecular do material, liberando assim, cargas elétricas que podem ser convertidas para realizar trabalho, como demonstrado na Figura 4 (ZILLES; MACÊDO; GALHARDO; OLIVEIRA, 2012).

Figura 4 – Efeito Fotovoltaico



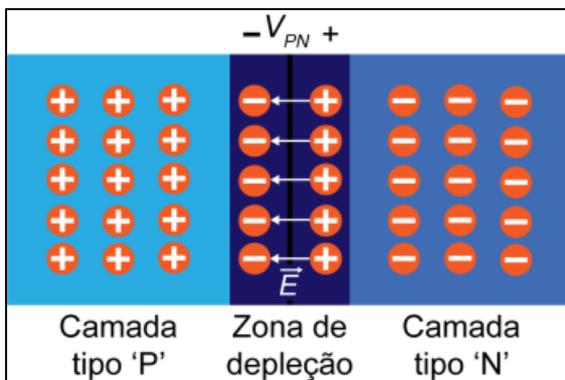
Fonte: Portal Solar (2022)

Desta forma, podemos compreender o funcionamento de um módulo fotovoltaico, que tem em sua composição elementos semicondutores, tornando-o um dispositivo de conversão fotovoltaica. Segundo Fernández (2020), os elementos mais utilizados na construção de

módulos fotovoltaicos são: silício (Si) monocristalino, policristalino e amorfo; arseneto de gálio (GaAs); disseleneto de cobre e índio (CuInSe_2); disseleneto de cobre, gálio índio (CuInGaSe_2); e telureto de cádmio (CdTe). Estes elementos semicondutores, ao receberem a irradiação solar, transferem parte dessa energia aos elétrons que o compõem, criando, assim, pares de portadores de carga (elétrons e lacuna).

Para que um semicondutor intrínseco, ou seja, em sua forma mais pura, adquiria propriedades de um conversor fotovoltaico, é necessário que ele passe por um processo de dopagem. Adicionando material dopante do tipo receptor, para formar a região tipo p, na qual se caracteriza pela formação de “lacunas”, criando uma densidade de cargas positivas. Já para a formação da região tipo n, é adicionado material dopante do tipo doador, provocando o aparecimento de elétrons livres. Assim, formando entre as duas regiões, a chamada junção p-n, que pode ser observada na Figura 5, na qual tem a função de criar um campo elétrico interno, estabelecendo o princípio de funcionamento da conversão fotovoltaica (FERNÁNDEZ, 2020).

Figura 5 - Junção p-n



Fonte: Eletrônica de Potência (2022)

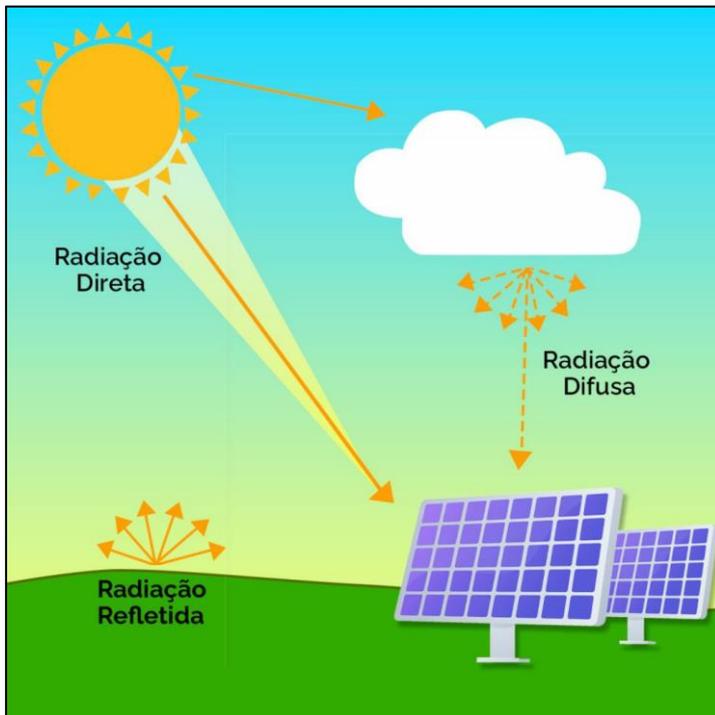
2.2.2 Tipos de radiação solar

Para fins de padronização das medições relacionadas ao fluxo de irradiação que alcança a superfície terrestre, é definido como a irradiação máxima quando o sol está a incidência máxima sobre o local de medição, ou seja, quando o sol está perpendicular a terra no ponto de medição (VIAN, 2021).

Segundo Pereira, Martins, Abreu e Runther (2006), somente 45% do fluxo de energia solar que atinge a terra chega até a superfície terrestre, a outra parte é absorvida por diferentes fatores. A radiação que atinge a superfície da terra e que pode ser capturada por um receptor

fotovoltaico, é basicamente formada por três componentes, que são a radiação direta, radiação difusa e radiação refletida, como mostra a Figura 6 (CANTOR, 2017).

Figura 6 – Componentes da radiação solar



Fonte: Quanta Geração (2022)

Para Vian (2021), a radiação direta é aquela que atravessa a atmosfera e chega à superfície terrestre. Nos dias de tempo mais limpo e com sol na incidência máxima, a fração de radiação direta que atinge os receptores fotovoltaicos é predominante.

Os raios da componente da radiação difusa, são os que sofrem interação com as moléculas em suspensão na atmosfera, pela umidade e pelas nuvens (VIAN, 2021). Estes, atingem o receptor fotovoltaico com um ângulo diferente aos raios de radiação direta.

A radiação refletida, é aquela que ao atingir o solo ou outros objetos, sofre a reflexão. A energia proveniente deste corpo ao qual a refletiu, pode ter um valor considerável ou desprezível, dependendo do meio em que o receptor foi instalado. A soma da radiação direta e da radiação difusa incidente sobre uma superfície, resulta na radiação global.

2.3 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos já são utilizados há muitas gerações para várias aplicações, porém, quando descobertas, as primeiras células fotovoltaicas possuíam apenas entre 10% e 11% de eficiência, isto no ano de 1839 conforme afirma Demonti (2003).

Por possuir uma baixa eficiência, e elevados custos de produção, logo após a descoberta do efeito fotovoltaico observado por Edmond Bequerel em 1839, a aplicação das células fotovoltaicas eram feitas apenas em situações muito pontuais, como por exemplo em estações espaciais, conforme indica Alvarenga (2004).

Desde a criação dos módulos fotovoltaicos, o foco em possuir um melhor rendimento nas células fotovoltaicas são o maior foco dos pesquisadores, hoje já possuímos módulos fotovoltaicos com eficiências próximas a 20% conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Eficiência de um módulo fotovoltaico atual

JKM610N-78HL4-BDV	
STC	NOCT
610Wp	459Wp
45.60V	10.83A
13.38A	42.35V
55.31V	52.54V
14.03A	11.33A
21.82%	

FONTE: Jinko solar (2022)

2.3.1 Módulos fotovoltaicos convencionais

Os módulos fotovoltaicos convencionais são compostos geralmente por 5 elementos:

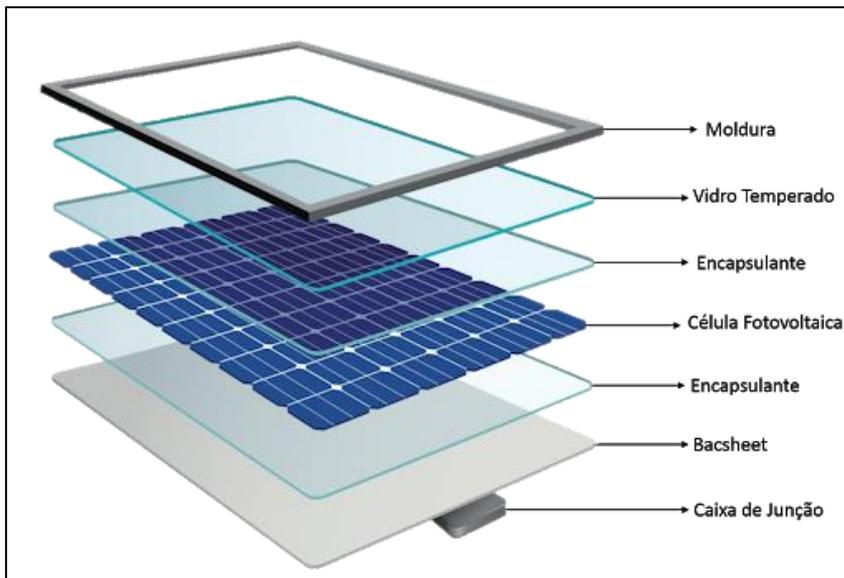
1. Caixilho;
2. Vidro;
3. Material de encapsulamento;
4. Células fotovoltaicos e;
5. Isolamento elétrico (backsheet).

Conforme afirma Carneiro (2010).

Podemos visualizar melhor a composição de um módulo fotovoltaico a partir da Figura

7.

Figura 7 - Elementos de um módulo fotovoltaico



Fonte: Empalux (2021)

Podemos notar que a célula fotovoltaica fica no centro de todos os demais elementos, tendo assim, uma isolação mecânica, a fim de proteger a célula fotovoltaica, e também uma isolação elétrica.

Cada elemento tem sua função e importância nos módulos fotovoltaicos, porém os que se destacam são as células fotovoltaicas que são compostas por semicondutores, e o isolamento elétrico, que é composto por isolantes elétricos.

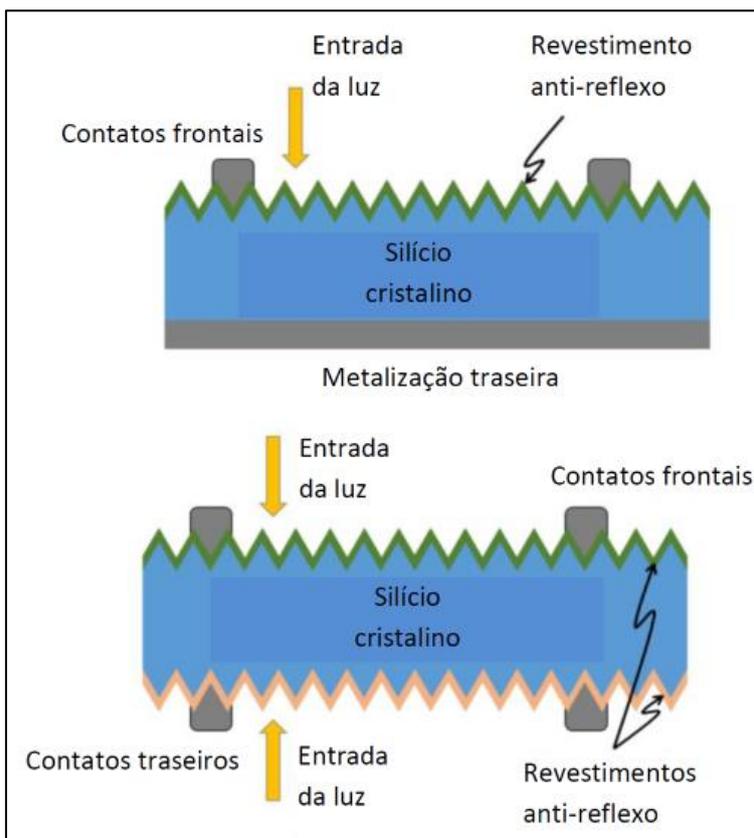
As células fotovoltaicas podem variar principalmente entre dois modelos, células de silício monocristalino e silício policristalino. A principal diferença entre os dois modelos são a eficiência e o método de fabricação, onde a célula de silício monocristalino é obtida a partir de fornos especiais onde são produzidas barras e realizados cortes de finas pastilhas, e a célula de silício policristalino que é produzida a partir da fusão do silício, conforme indica Alvarenga (2004).

2.3.2 Módulos Fotovoltaicos Bifaciais

Nos últimos anos, a evolução no rendimento dos módulos fotovoltaicos foi se estagnando, o que trouxe a busca por modificações nos módulos fotovoltaicos convencionais. Desta forma, surgiram os módulos fotovoltaicos bifaciais, que apresentaram grande ganho na eficiência, a diminuição na área ocupada e o ganho financeiro segundo Coelho et al., (2020).

O funcionamento dos módulos fotovoltaicos bifaciais é semelhante ao de um módulo fotovoltaico convencional. Como mostrado na Figura 8, a diferença está atrelada ao fato de o módulo bifacial ser capaz de receber luz dos dois lados, na parte frontal absorvendo diretamente a luz irradiada do sol e na parte traseira recebendo a luz refletida do solo em que o módulo está instalado (FERNÁNDEZ, 2020).

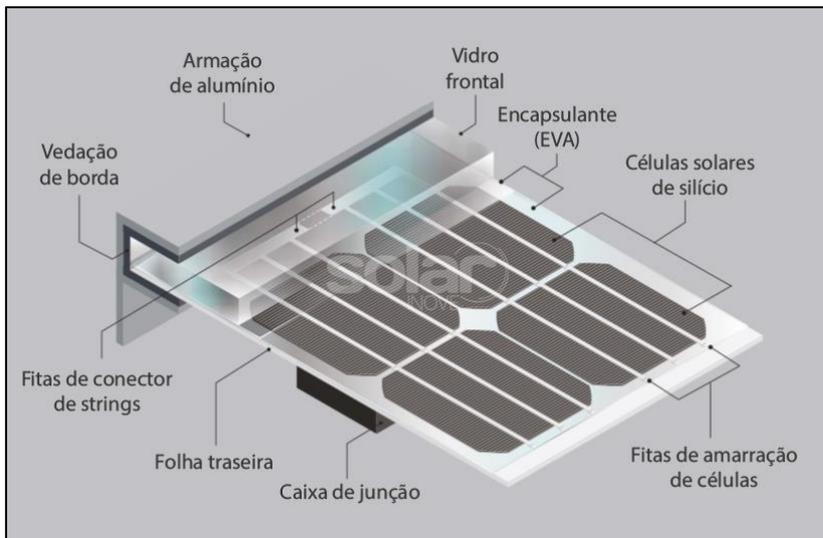
Figura 8 – Estrutura física Convencional x Bifacial



Fonte: Canal Solar (2019)

Como é possível observar na Figura 9, diferentemente do módulo fotovoltaico convencional, o módulo bifacial tem sua parte traseira uma lâmina de vidro, no lugar da lâmina plástica que forma a folha traseira, *backsheet*, do painel convencional.

Figura 9 – Estrutura do módulo bifacial



Fonte: Solar Inove (2022)

2.3.2.1 Rendimento Módulos Fotovoltaicos Bifaciais

A principal diferença entre os módulos fotovoltaicos convencionais e os bifaciais é o material de encapsulamento, onde o bifacial não cobre totalmente a célula fotovoltaica na parte de trás dos módulos. O índice de transparência na parte posterior dos módulos fotovoltaicos pode ter uma variação entre 70% e 80%, que é chamado de índice de bifacialidade, conforme afirma Zimmer (2022). Estes índices são indicados pelo fabricante do módulo fotovoltaico em seu *datasheet* (folheto de dados), essa forma, é possível saber com qual índice de bifacialidade em seu projeto.

Podemos notar na Tabela 3 que além do índice de bifacialidade dos módulos fotovoltaicos, um dos fatores que pode afetar diretamente no ganho de energia com módulos bifaciais é a superfície onde ele será instalado, podendo ter alterações dependendo do local de instalação.

Tabela 3 - Ganho de reflexão

Superfície	Albedo	Rendimento de ganho esperado
Água	5-8%	4-6%
Solo nu	10-20%	6-8%
Pastagem verde / cascalho	15-25%	7-9%
Terreno concretado / cascalho branco	25-35%	8-10%
Terra seca / duna de areia	35-45%	10-15%
Revestimentos refletivos	80-90%	23-25%
Neve fresca	80-95%	25-30%

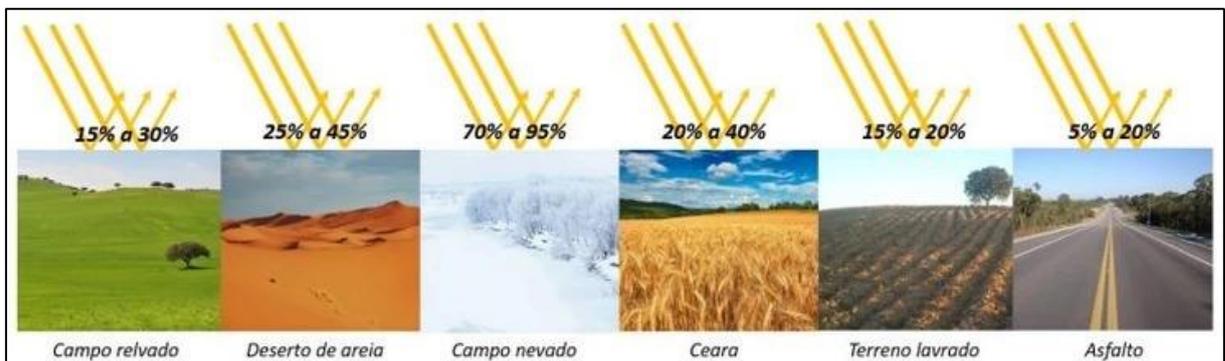
Fonte: Adaptado de Mesquisa et al. (2019) apud Zimmer (2022, p. 24)

2.3.2.1.1 Importância do albedo nos painéis bifaciais

Como é possível observar na Tabela 3, um dos fatores que interfere no rendimento do módulo e que varia de acordo com a superfície, é o efeito albedo. Segundo Yanagi (2006), o albedo consiste em uma medida que relaciona a quantidade de radiação solar que é refletida por um objeto com quantidade de radiação que incide sobre ele. A medida do albedo pode variar de 0 (zero) a 1 (um), sendo 0 (zero) quando há absorção total da radiação por um corpo e 1 (um) quando há reflexão total da radiação incidida sobre um corpo.

Essa relação pode ser transformada em porcentagem, multiplicando a medida do albedo por 100 (cem). Portanto, quanto maior o valor do albedo da superfície na qual o módulo bifacial encontra-se instalado, maior será o seu rendimento. O efeito do albedo em diferentes superfícies é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Albedo em diferentes superfícies



Fonte: Tempo de Aprender Clima de ensinar (2022)

Além do albedo, a quantidade de irradiância difusa que o módulo fotovoltaico recebe, pode ser afetado por outros fatores além da superfície de instalação dos módulos fotovoltaicos, como por exemplo o *Pitch* (distância entre mesas de módulos). O aumento do espaçamento entre fileiras implica que a área de superfície capaz de refletir a irradiância solar é maior, traduzindo em um fator de visão aumentado e, por sua vez, maior geração de energia na parte traseira (MUNIZ FILHO, 2021).

Outro fator importante que pode impactar na irradiância difusa sobre o módulo, é a altura que o módulo fotovoltaico se encontra da superfície de instalação. Quanto menor a altura do módulo, menor será a reflexão do sol sobre a superfície, e menor será a irradiância difusa recebida pelo módulo.

Todos estes parâmetros podem influenciar diretamente no rendimento de um módulo fotovoltaico bifacial, pode-se considerar então que além da fabricação do módulo fotovoltaico, a forma de instalação também pode impactar diretamente sobre o seu ganho.

Portanto, o entendimento dos tipos de irradiação é importante, tanto para conhecer as condições em que os módulos fotovoltaicos foram submetidos ao coletar seus dados técnicos, quanto para obter a melhor eficiência a partir de uma boa instalação.

Compreender o efeito do albedo em diferentes tipos de superfície também é essencial para avaliar o funcionamento de um módulo fotovoltaico bifacial, podendo assim, comparar o seu rendimento, com o de um módulo monofacial em diferentes localidades.

Logo, utilizando dos conhecimentos apresentados, é possível analisar o desempenho de módulos monofaciais e bifaciais em usinas fotovoltaicas distintas, considerando as diferentes características climáticas e de superfície, para a melhor análise dos dados obtidos.

3 METODOLOGIA

A pesquisa é a atividade concreta no processo de constituição e desenvolvimento científico, possibilitando a produção, identificação e descoberta do conhecimento, respostas para perguntas específicas e soluções de problemas. Esta atividade pauta-se fundamentalmente na exigência da escolha intencional dos métodos disponíveis, que conduzirão o desenvolvimento ideal para a compreensão do objeto analisado, também nomeável de realidade (Mussi et al., 2019).

A pesquisa neste trabalho, será uma pesquisa de campo-bibliográfica, onde a mesma será constituída pela coleta de dados reais e também possui caractere quantitativo, pois a mesma será realizada através da análise dos dados coletados, o que caracteriza em uma pesquisa quantitativa. Na abordagem quantitativa, a ênfase é na análise, pelo exame dos componentes separadamente (Mussi et al., 2019).

O desenvolvimento será realizado a partir da coleta de dados de usinas fotovoltaicas já existentes e operantes, tanto com módulos fotovoltaicos convencionais, quanto com módulos fotovoltaicos bifaciais, a fim de afirmar suas diferenças apontadas, neste trabalho durante a revisão bibliográfica. Após a coleta de dados, será possível compilar os mesmos, e analisar. De tal forma que possamos chegar em resultados esclarecedores.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo demonstraremos os procedimentos utilizados para atingir os objetivos traçados no início deste trabalho, apresentando as ferramentas que serão utilizadas e bem como a sua importância na obtenção dos resultados para análise.

Conforme posto no item 1.3, apresentaremos os resultados da utilização dos módulos fotovoltaicos bifaciais, seus ganhos e cuidados. Para isso, serão utilizados dados de usinas fotovoltaicas já instaladas, com módulos fotovoltaicos monofaciais, e a partir desta, realizar uma simulação em *software* para com módulos fotovoltaicos bifaciais, para apresentar as diferenças e seus possíveis ganhos.

O *software* a ser utilizado será o PVSYST®, que é um simulador bem difundido no mercado pelos profissionais da área. Este software utiliza dados no qual já foram abordados neste trabalho, como: albedo, irradiância difusa, irradiância total, entre outros. Para dar mais credibilidade a simulação, será mantido ao máximo as características da usina fotovoltaica que está em análise, substituindo apenas dados referentes a mudança dos módulos fotovoltaicos monofaciais para módulos fotovoltaicos bifaciais.

4.1 SIMULADOR PVSYST®

O PVSYST® é um simulador projetado para ser utilizado por arquitetos, engenheiros e pesquisadores como uma ferramenta para o estudo, análise e dimensionamento de projetos de sistemas fotovoltaicos.

O *software* possui diversos recursos em sua plataforma, permitindo, por exemplo, importar dados meteorológicos da região em análise, simular áreas de sombreamento, possui uma gama de componentes e suas devidas especificações técnicas, como: módulos fotovoltaicos e inversores, realiza cálculos para modelos de módulos fotovoltaicos, também disponibiliza relatórios para análise dos resultados obtidos, permitindo uma análise de viabilidade e de custos.

Vamos agora apresentar alguns destes recursos deste *software*, recursos os quais serão utilizados para simular a usina fotovoltaica em questão. Primeiramente vamos apresentar a página inicial deste *software*. Na Figura 11 é possível visualizar algumas ferramentas facilmente, como por exemplo a “Base de dados”.

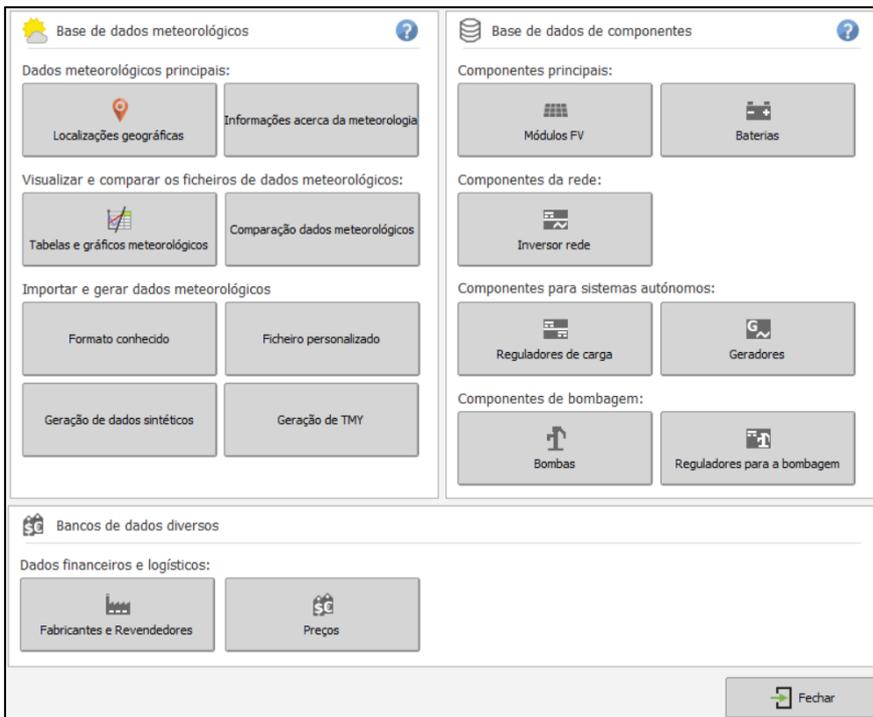
Figura 11 - Página inicial - PVSYST®



Fonte: Autores (2022)

Esta opção é de extrema importância para dar continuidade em qualquer tipo de simulação no *software*, pois esta é quem armazena uma grande gama de dados, tanto meteorológicos, quanto dados de equipamentos, como módulos fotovoltaicos, inversores fotovoltaicos, entre outros, conforme podemos notar na Figura 12.

Figura 12 - Página da base de dados - PVSYST®



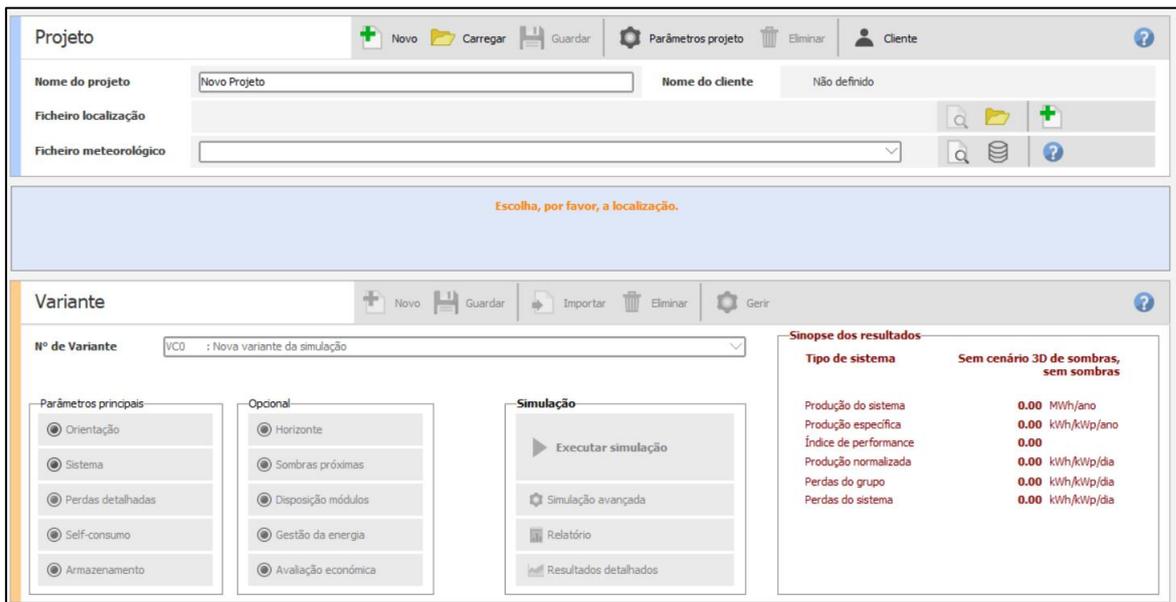
Fonte: Autores (2022)

É fácil notar que o *software* fornece outras opções além de sistemas voltados para energia fotovoltaica, porém vamos focar no que irá impactar diretamente nos resultados. Na Figura 12 é possível notar que temos 3 importantes entradas de dados:

- Módulos FV;
- Inversores rede;
- Localizações geográficas.

Voltado a Figura 11, nossa simulação será feita na aba “Acoplado a rede”. Nesta aba, será definido alguns parâmetros como orientação dos módulos fotovoltaicos, qual módulo e inversor fotovoltaico serão utilizados, perdas do sistema, sombras por horizonte, sombras a partir de desenho 3D, bifacialidade dos módulos, albedo, entre outros, conforme podemos verificar na Figura 13.

Figura 13 - Página "Acoplado a rede" - PVSYST®



Fonte: Autores (2022)

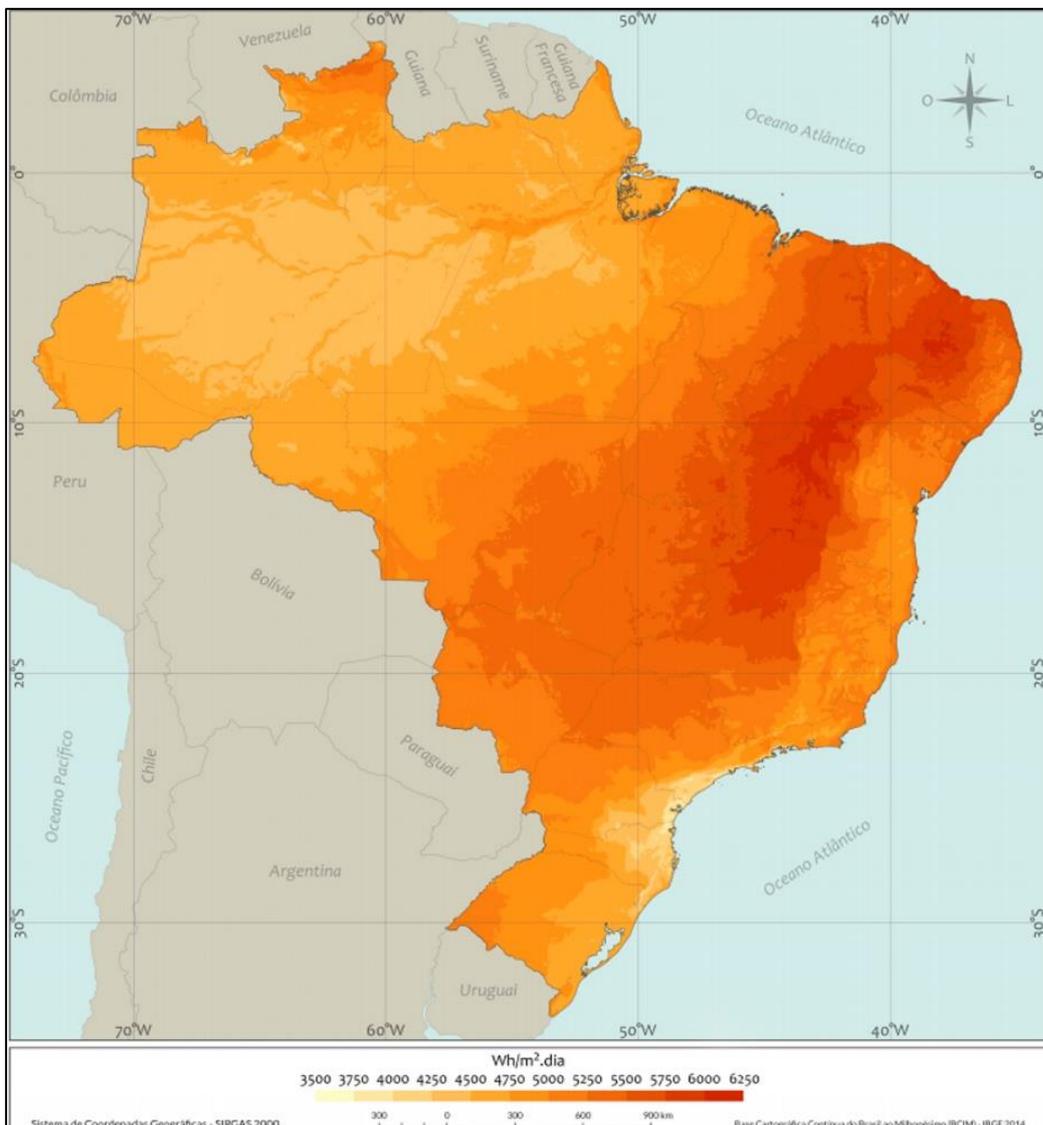
4.2 USINA FOTOVOLTAICO – AURORA I, II, III & IV

A usina fotovoltaica utilizada para análise é um projeto de grande porte, que fica localizada na cidade de Patrocínio Paulista/SP. Operando a pouco mais de 1 mês, possui

tecnologias atuais e baixas degradações dos equipamentos, passando mais credibilidade nos dados obtidos.

O local de instalação foi escolhido por ser um local que apresenta uma alta taxa de irradiação solar, segundo a base de dados METEONORM utilizado pelo *software* PVSYST®, uma média mensal de 164,66 kWh/m². Realizando uma comparação, utilizando a mesma base de dados, caso a usina fotovoltaica fosse instalada exatamente na UNISUL/PB, teria uma irradiação média mensal de 139,87 kWh/m², o que representaria 15,05% a menos. Este é um dos principais fatores na hora de definição da localização de um sistema fotovoltaico, pois dessa forma, você garante uma maior geração por m².

Figura 14 - Mapa de irradiação solar do Brasil



Fonte: América do Sol (2022)

De acordo com a base de dados do Atlas brasileiro de energia solar, a média anual de irradiação global da região exata de instalação da usina, para as coordenadas -20.624890 de latitude e -47.303367 de longitude, tem-se um valor de 5.050 Wh/m².dia de irradiação.

Na Figura 14, pode-se visualizar o mapa de irradiação solar do Brasil. Analisando a Tabela 4, é possível observar que a região sudeste do Brasil, onde a usina Aurora está localizada, já apresenta altos índices de irradiação solar, ficando atrás somente das regiões centro-oeste e nordeste.

Tabela 4 – Irradiação média por região brasileira

Potencial anual médio de energia solar	
Região	Radiação Global Média (em kWh/m².dia)
Nordeste	5,9
Centro-Oeste	5,7
Sudeste	5,6
Norte	5,5
Sul	5,0

Fonte: Boreal Solar (2022)

Ao todo a usina fotovoltaica ocupa uma área de 7 hectares, e seus módulos fotovoltaicos são instalados sobre *trackers* mono-fileiras, conforme podemos verificar na Figura 15.

Figura 15 - UFV AURORA



Fonte: Autores (2022)

A usina fotovoltaica AURORA é dividida em 4 subsistemas, porém elas possuem mesma marca e modelo dos módulos fotovoltaicos, inversores e *tracker*. A usina fotovoltaica é dividida da seguinte maneira:

- UFV AURORA I – 2.968 módulos fotovoltaicos de 435 Wp e 4 inversores de 175 kW mais 2 inversores de 150 kW;
- UFV AURORA II – 2.688 módulos fotovoltaicos de 435 Wp e 4 inversores de 175 kW mais 2 inversores de 150 kW;
- UFV AURORA III – 1512 módulos fotovoltaicos de 435 Wp e 3 inversores de 175 kW;
- UFV AURORA IV – 2.632 módulos fotovoltaicos de 435 Wp e 6 inversores de 175 kW;
- UFV AURORA V – 840 módulos fotovoltaicos de 435 Wp e 2 inversores de 175 kW;
- UFV AURORA VI – 2952 módulos fotovoltaicos de 435 Wp e 2 inversores de 175 kW.

Os módulos fotovoltaicos são da marca LONGI e do modelo R4-72HPH435M. Este módulo fotovoltaico é monocristalino e monofacial, possui uma eficiência de 20,0% conforme podemos verificar na Tabela 5.

Tabela 5 – Características Módulo LR4HBD-435M

Electrical Characteristics	STC: AM1.5		1000W/m ² 25°C		NOCT:AM 1.5	
	LR4-72HBD- 425M		LR4-72HBD- 430M		LR4-72HBD- 435M	
Module Type	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Testing Condition	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax/W)	425	317,4	430	321,1	435	324,9
Open Circuit Voltage (Voc/V)	48,7	45,6	48,9	45,8	49,1	45,9
Short Circuit Current (Isc/A)	11,22	9,06	11,3	9,13	11,36	9,18
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	40,4	37,7	40,6	37,9	40,8	38
Current at Maximum Power (Imp/A)	10,52	8,42	10,6	8,49	10,66	8,54
Module Efficiency (%)	19,6		19,8		20	

Fonte: Canadian solar (2022)

Tabela 6 – Características Inversor PVS-175-TL

Technical data and types	
Type code	PVS-175-TL
Input side	
Absolute maximum DC Input voltage ($V_{max,abs}$)	1500 V
Start-up DC input voltage (V_{start})	750 V (650...1000 V)
Operating DC input voltage range ($V_{demin...Vdcmx}$)	0.7 x V_{start} ...1500 V (min 600 V)
Rated DC input voltage (V_{dcr})	1100 Vdc
Rated DC input power (P_{dcr})	188000 W@30°C–177000 W@40°C
Number of independent MPPT	12
MPPT input DC voltage range ($V_{MPPTmin...V_{MPPTmax}}$) at P_{acr}	850...1350 V
Maximum DC input current for each MPPT (I_{SCmax})	22 A
Maximum input short circuit current for each MPPT (I_{SCmax})	30 A
Number of DC input pairs for each MPPT	2 DC inputs per MPPT
DC connection type	PV quick fit connector

Fonte: Fimer Spa (2022)

Tabela 7 – Características Inversor PVS-120-TL

Technical data and types	
Type code	PVS-120-TL
Input side	
Absolute maximum DC Input voltage ($V_{max,abs}$)	1000 V
Start-up DC input voltage (V_{start})	420 V (400...500 V)
Operating DC input voltage range ($V_{demin...Vdcmx}$)	369...1000 V
Rated DC input voltage (V_{dcr})	720 V
Rated DC input power (P_{dcr})	123000 W
Number of independent MPPT	6
MPPT input DC voltage range ($V_{MPPTmin...V_{MPPTmax}}$) at P_{acr}	570...850 V
Maximum DC input power for each MPPT ($P_{MPPT,max}$)	20500W [$570\text{ V} \leq V_{MPPT} \leq 850\text{ V}$]
Maximum DC input current for each MPPT (I_{SCmax})	36 A
Maximum input short circuit current for each MPPT (I_{SCmax})	50 A
Number of DC input pairs for each MPPT	4
DC connection type	PV quick fit connector

Fonte: Fimer Spa (2022)

Os subsistemas também contam com inversores da mesma marca e modelo, apenas alterando a potência entre 120 kW e 175 kW. Estes inversores são do tipo inverter strings, o qual é capaz de trabalhar com várias MPPT's independentes. Na Tabela 6 e Tabela 7, podemos visualizar as características técnicas destes equipamentos.

4.2.1 Albedo da usina

Como já visto ao longo do trabalho, um dos fatores importantes a ser observado e que impacta no rendimento do módulo fotovoltaico, é a medida do albedo. A superfície em que a usina Aurora se encontra, tem um efeito do albedo semelhante ao de um terreno lavrado, com folhagens baixas, secas e uma superfície de cor clara, como pode ser observado na Figura 16. O efeito do albedo para esse terreno tem uma relação de medida em torno de 15 a 20%. Ou seja, da radiação que incide sobre a superfície, cerca de 15 a 20% é refletida e pode ser aproveitada pela face traseira dos módulos bifaciais. Este dado será de extrema importância para as simulações que serão realizadas no *software*.

Figura 16 – Terreno da usina



Fonte: Autores (2022)

4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

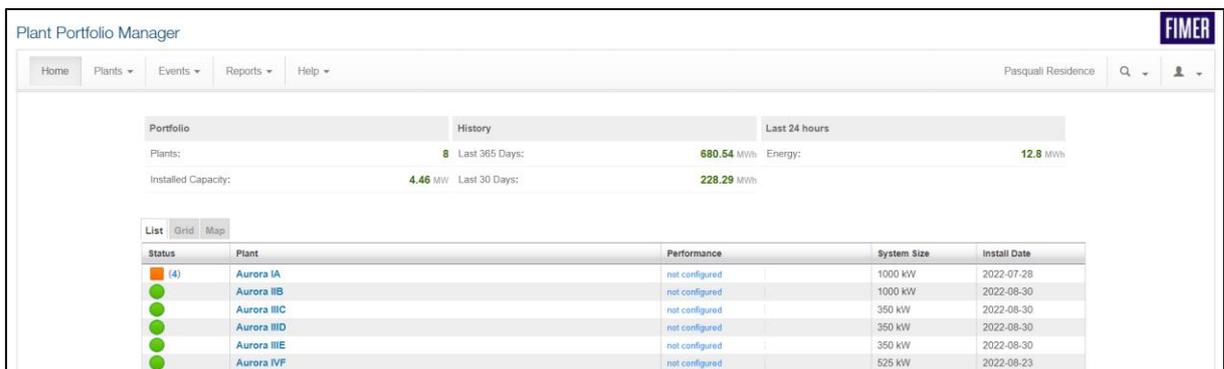
Para a análise da usina fotovoltaica, será realizado o levantamento de dados a partir da plataforma de monitoramento existente do próprio inversor fotovoltaico, nesta plataforma é

possível verificar dados como, tensão, corrente, potência, frequência, energia gerada, falhas etc. A visualização dos dados pode ser tanto do momento, quanto do histórico, assim permitindo realizar análises durante períodos e em um momento específico desejado.

Esta plataforma de monitoramento é aberta a qualquer pessoa física ou jurídica que tenha adquirido um inversor fotovoltaico da marca FIMER, e podem ser acessados de qualquer *browser*. Porém para estes dados estarem disponíveis nesta plataforma, a usina fotovoltaica deve estar devidamente conectada a internet.

Para apresentar os dados, é necessário entender como a plataforma funciona, e como recolher os mesmos. Na Figura 17 é possível visualizar a página inicial da plataforma, na mesma é apresentado todas as plantas existentes do cliente. A usina fotovoltaica Aurora é dividida conforme informado já anteriormente, porém para uma análise em maior escala, históricos de geração de energia e potência, iremos recolher os dados das mesmas e unificar os mesmos.

Figura 17 - Plataforma - Aurora Vision



Fonte: Aurora vision (2022)

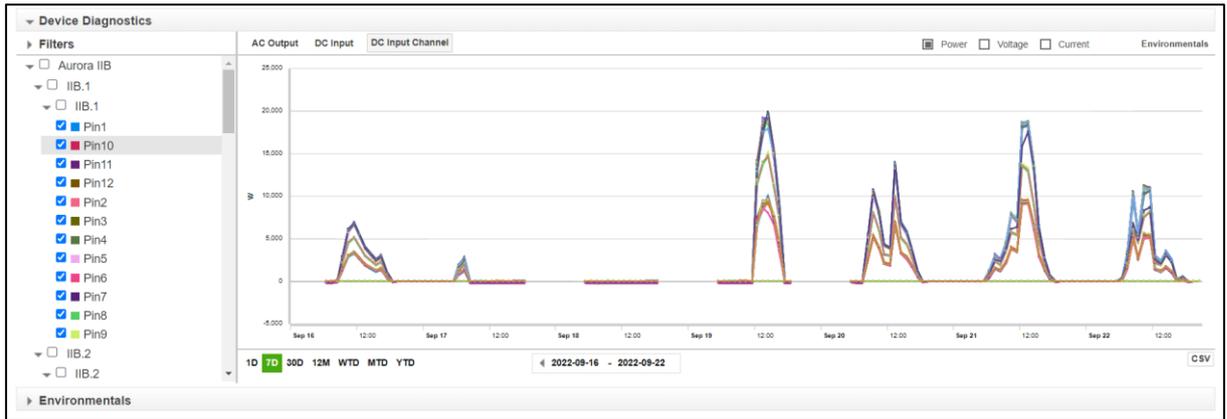
Em cada planta apresentada, é possível exportar os dados desejados em formatos de planilhas, permitindo unificar os dados das usinas fotovoltaicas, e analisar as mesmas em conjuntos.

Inicialmente iremos focar em recolher os seguintes dados da plataforma:

- Geração de energia diária;
- Geração de energia mensal;
- Corrente média, máxima e mínima dos módulos fotovoltaicos;
- Tensão média, máxima e mínima dos módulos fotovoltaicos;
- Potência instantânea e média.

Para exemplificar como serão recolhidos os dados dos mesmos, note na Figura 18 que possuímos uma série de *strings* selecionadas, e 3 opções de dados, potência, tensão e corrente. Para exportar os mesmos, basta deixarmos selecionados, e clicar no botão “CSV”, o qual vai realizar um *download* de todos os dados em forma de planilha.

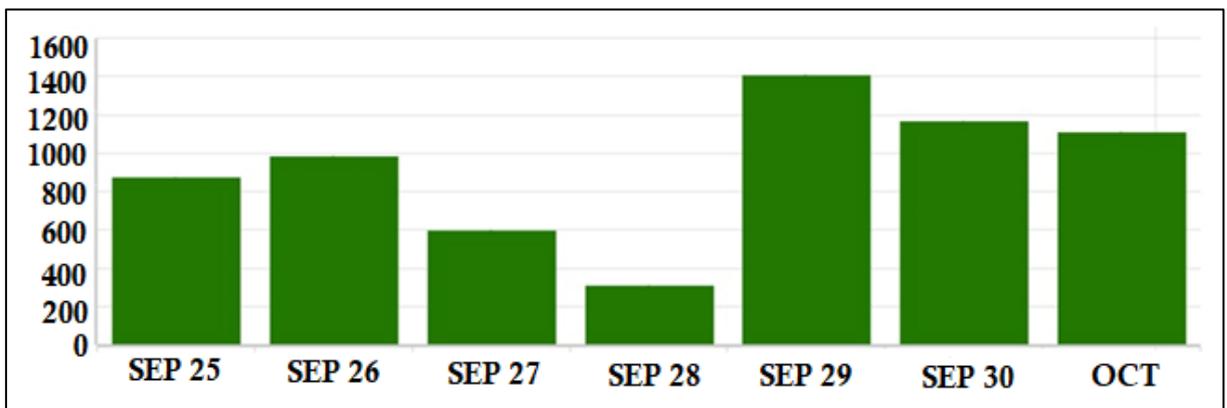
Figura 18 - Página de dados - Aurora Vision



Fonte: Aurora vision (2022)

Já na Figura 19 - Histórico de geração é possível notar que há um local específico onde podemos verificar a existência do histórico de geração de energia ao longo dos dias, semanas, meses e anos. Estes dados são recolhidos amostras num intervalo de 15 minutos diretamente do inversor fotovoltaico, o qual armazena todos os dados e envia ao monitoramento através de uma conexão à internet.

Figura 19 - Histórico de geração



Fonte: Aurora vision (2022)

A partir do acesso a este local no monitoramento, foi possível recolher a geração de energia das usinas fotovoltaicas no mês de setembro, o qual foi o primeiro mês de geração após o início de operação das usinas fotovoltaicas.

Tabela 8 - Aquisição de dados 1

Entity Name	Aurora IA	Aurora IIB	Aurora IIIC	Aurora IIID	Aurora IIIE	Aurora IIVF
Timestamp	kilowatt-hours	kilowatt-hours	kilowatt-hours	kilowatt-hours	kilowatt-hours	kilowatt-hours
01/09/2022	637	5010	1704	2004	2205	2643
02/09/2022	51	127	111	122	144	254
03/09/2022	0	0	0	0	0	0
04/09/2022	254	1108	363	462	524	615
05/09/2022	842	4186	1405	1671	1854	2211
06/09/2022	706	3346	1173	1334	1497	1789
07/09/2022	944	4455	1622	1826	2042	2446
08/09/2022	123	332	193	231	173	278
09/09/2022	689	2930	1096	1211	1341	1625
10/09/2022	720	3079	1149	1277	1303	1717
11/09/2022	521	2510	870	1018	1030	1361
12/09/2022	663	3028	1080	1186	1421	1613
13/09/2022	779	3803	1348	1496	1770	2025
14/09/2022	709	3209	1133	1261	1486	1693
15/09/2022	248	1010	344	382	449	552
16/09/2022	344	1393	468	523	624	754
17/09/2022	46	189	65	73	88	108
18/09/2022	0	0	0	0	0	0
19/09/2022	690	3025	1037	1156	1358	1673
20/09/2022	625	2552	851	866	1138	1388
21/09/2022	830	3388	1143	1234	1520	1855
22/09/2022	513	2082	706	674	941	1144
23/09/2022	1576	6769	2387	2158	3099	3820
24/09/2022	228	1427	478	394	640	778
25/09/2022	867	3851	1324	1461	1725	2122
26/09/2022	979	4121	1415	1312	1836	2279
27/09/2022	591	2439	819	813	1087	1320
28/09/2022	305	1277	420	404	559	678
29/09/2022	1402	6023	2147	2078	2711	3401
TOTAL	16882	76669	26851	28627	34565	42142

Fonte: Aurora vision (2022)

Para a devida apresentação dos dados, foi necessária uma análise para que possam ser utilizados nas comparações que serão realizadas neste trabalho. Nessa primeira aquisição de dados, há 3 principais informações apresentadas, geração de energia diária, dia e usina fotovoltaica, e a partir dos mesmos vamos adquirir 2 dados, geração total mensal por usina fotovoltaica e geração mensal total.

Na Tabela 8, é possível verificar a energia gerada por dia em cada usina fotovoltaica, a diferença se dá por consequência das diferentes potências das usinas fotovoltaicas. Nota-se que os valores apresentados são em quilowatts-horas e para cada dia completo há apenas uma medição, a qual é a somatória da geração diária, e não uma média.

A partir da Tabela 8, vamos analisar o dia 23/09, o qual foi o dia mais significativo de geração de energia no mês para todas as 6 usinas fotovoltaicas, e neste dia, vamos realizar a aquisição de dados diretamente relacionados aos módulos fotovoltaicos, como por exemplo, corrente média e máxima de uma *string*, tensão média e máxima de uma *string*, para verificar a máxima capacidade dos módulos fotovoltaicos no período apresentado.

Para o dia escolhido, foram recolhidos dados de tensão e corrente para comparação com os dados apresentados no *datasheet* do módulo fotovoltaico utilizado, a fim de mostrar veracidade nos dados recolhidos.

Na Figura 9, pode-se verificar os valores médios e máximos para cada usina fotovoltaica e os dados já apresentados anteriormente do próprio *datasheet*. É possível notar que os valores máximos encontrados num período de 1 dia, são próximos aos apresentados em *datasheet*.

Com isso é possível também definir uma margem de erro de $\pm 6,60\%$ da tensão se compararmos o valor do *datasheet* com a média, e $\pm 1,62\%$ se analisarmos com o valor máximo encontrado. Já para a corrente é possível verificar que para os valores médios é encontrado um valor de $\pm 30,46\%$ de erro, o que indica que os módulos fotovoltaicos possuem grande variação de corrente no decorrer do dia, o que se justifica, pois os valores de corrente foram adquiridos num intervalo das 06:45 às 18:15 horas. Porém verifica-se que para o valor máximo encontrado de corrente, é encontrado uma margem de erro de $\pm 7,96\%$, o qual se apresenta o valor mais coerente a utilizar.

Os valores apresentados tanto na Tabela 8 quanto na Figura 9, serão base para a comparação do que foi encontrado na realidade na usina fotovoltaica, e a simulação que será realizada e apresentada com os mesmos parâmetros, porém utilizando um módulo fotovoltaico bifacial.

Tabela 9 - Dados adquiridos

Usina	Tensão média por módulo	Tensão máxima por módulo	Corrente média por módulo	Corrente máxima por módulo
Aurora IA	38,03	42,31	6,76	8,62
Aurora IIB	35,92	38,56	7,5	10
Aurora IIIC	37,88	40,93	7,42	10,01
Aurora IIID	39,14	43,65	7,63	10,28
Aurora IIIE	38,29	41,07	7,38	9,53
Aurora IVF	38,26	41,04	7,55	10,11
Valor do <i>datasheet</i>	40,6		10,6	
Erro encontrado	6,60%	1,62%	30,46%	7,96%

Fonte: Autores (2022)

4.4 SIMULAÇÃO

Para realizar a simulação, deve-se verificar alguns parâmetros já encontrados na usina fotovoltaica instalada e replicar para a simulação, para que seja a mais realista possível. Essas características serão mantidas fielmente para que não possa tender ou realçar qualquer ganho de valor.

Sendo essas características:

- Localização da usina fotovoltaica;
- Disposição dos módulos fotovoltaicos;
- Quantidade de inversores fotovoltaicos;
- Modelo do inversor fotovoltaico utilizado;
- *Tracker* instalado;
- Perdas aplicadas ao grupo gerador;
- Quantidade e potência de módulos (alterando apenas para um modelo bifacial).

A fim de atender um dos objetivos deste trabalho, será apresentado agora o módulo fotovoltaico bifacial que será utilizado na simulação para comparação à usina fotovoltaica existente. Conforme já apresentado na Tabela 5 os módulos utilizados na usina fotovoltaica foram da marca LONGI e potência de 435 Wp, diante desta informação, iremos utilizar também

módulos fotovoltaicos da LONGI de 435 Wp, porém bifaciais. Pode-se verificar todas as características técnicas do mesmo na Tabela 10.

Tabela 10 – Módulo utilizado

Electrical Characteristics	Module Type		Ganho		
	LR4-72HBD-435M		5%	10%	15%
Testing Condition	STC	NOCT	STC	STC	STC
Max. Power (Pmax/W)	435	324,9	456,75	478,5	500,25
Open Circuit Voltage (Voc/V)	49,1	45,9	49,1	49,1	49,2
Short Circuit Current (Isc/A)	11,36	9,18	11,93	12,50	13,06
Voltage Max. Power (Vmp/V)	40,8	38	40,8	40,8	40,9
Current Max. Power (Imp/A)	10,66	8,54	11,19	11,73	12,26
Module Efficiency (%)	20				
Índice de bifacialidade (%)	70±5				

Fonte: Autores (2022)

Primeiramente pode-se verificar que o grande impacto que o módulo sofre ao ser bifacial é o ganho direto na corrente e mantendo quase que a mesma tensão de operação. Desta forma, é possível manter a mesma quantidade de módulos em série, pois não teremos aumento no nível de tensão significativos, mas é necessário ter atenção a máxima corrente de entrada que o seu inversor fotovoltaico suporta, pois este valor terá uma significativa alteração.

Esta corrente vai ser influenciada diretamente pelo albedo existente no local, e conforme já apresentado anteriormente, possuímos um albedo com reflexão em torno de 15% a 20%, portanto em nossa simulação aplicamos um albedo de 0.2, conforme pode-se verificar na Figura 20.

Figura 20 - Índice de albedo aplicado

Irradiação incidente no solo

Porção direta no solo De acordo com a posição do sol, m

Fator difuso no solo % A partir do modelo 2D

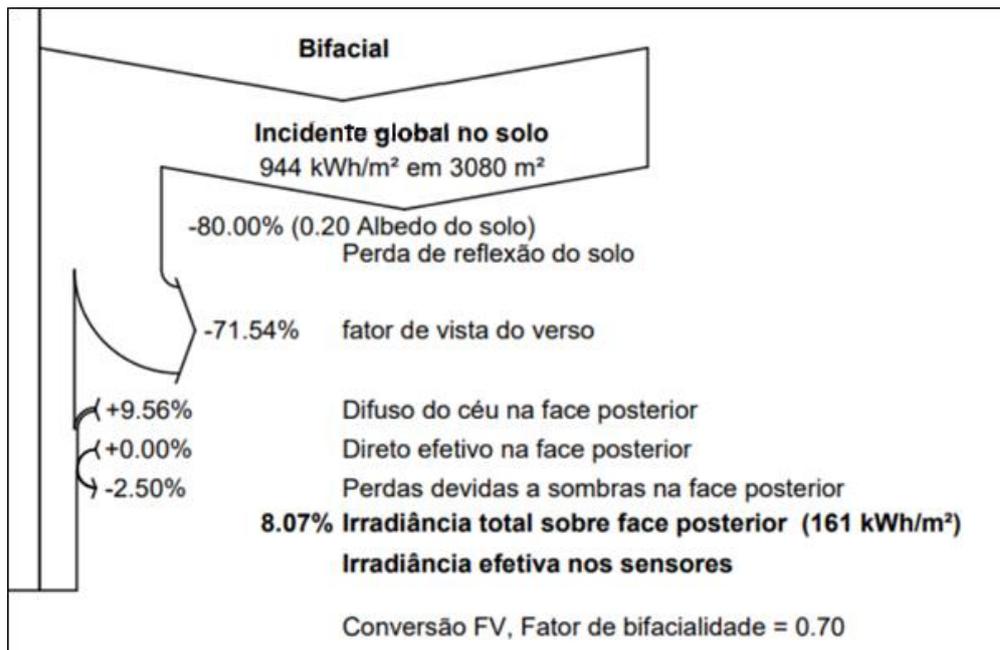
Fração transparente do shed % não sensível

Albedo do solo Valores mensais

Fonte: Autores (2022)

Após manter os valores de outras variáveis idênticas, para chegar o mais próximo possível à realidade, podemos realizar a simulação do sistema fotovoltaico no PVSYST®. Logo após a simulação do PVSYST® podemos retirar alguns dados do relatório gerado. Notamos que na Figura 21 é apresentado uma perda de 80% referente ao albedo, isso indica que apenas 20% da irradiação que chega ao solo, é refletida para a parte de trás do módulo fotovoltaico.

Figura 21- Resultado de perdas



Fonte: Autores (2022)

Também pode-se verificar que 8,07% da irradiação que é aplicada diretamente ao solo, absorvida pela parte posterior dos módulos fotovoltaicos, e também o fator de bifacialidade de 0,70 que é um dado fixo do módulo fotovoltaico.

Após a simulação completa da usina fotovoltaica no *software*, foi possível adquirir alguns dados exportados em formato .CSV do *software* e tratar os mesmos para que fiquem possíveis de serem analisados e apresentados.

Na Tabela 11 é possível verificar os dados de tensão média e máxima, e corrente média e máxima. Para os valores de tensão, que se mantem praticamente constantes com a variação do ganho, foram encontrados erros de $\pm 7,87\%$ para a tensão média por módulo e $\pm 0,83\%$ para a tensão máxima por módulo fotovoltaico.

Porém para a corrente, foram encontrados erros de $\pm 47,81\%$, $\pm 50,21\%$ e $52,37\%$ para a corrente média comparada com o valor do *datasheet* com ganhos de 5%, 10% e 15% respectivamente. Já para a corrente máxima, foram encontrados erros de $\pm 9,38\%$, $\pm 4,35\%$ e \pm

0,16%. O que indica primeiramente, que assim como nos dados adquiridos da usina fotovoltaica com módulo fotovoltaico convencional, para o software também deverá ser analisada a corrente máxima, e não a média, pois a mesma apresenta um erro muito discrepante devido a grande alteração da corrente do módulo fotovoltaico ao decorrer do dia. Porém deixamos essa comparação para o próximo capítulo.

Tabela 11 - Dados simulados

Usina	Tensão média por módulo	Tensão máxima por módulo	Corrente média por módulo	Corrente máxima por módulo
Usina com módulo bifacial	37,59	40,46	5,84	12,24
Valor do <i>datasheet</i> (ganho de 5%)	40,8		11,19	
Valor do <i>datasheet</i> (ganho de 10%)	40,8		11,73	
Valor do <i>datasheet</i> (ganho de 15%)	40,8		12,26	
Erro encontrado (ganho de 5%)	7,87%	0,83%	47,81%	9,38%
Erro encontrado (ganho de 10%)	7,87%	0,83%	50,21%	4,35%
Erro encontrado (ganho de 15%)	7,87%	0,83%	51,37%	0,16%

Fonte: Autores (2022)

4.5 COMPARAÇÃO SIMULADOR X PLANTA REAL

Para dar mais credibilidade aos dados encontrados a partir da simulação realizada em *software*, vamos comparar diretamente os erros encontrados tanto na usina fotovoltaica já em operação com os módulos fotovoltaicos convencionais. Primeiramente antes da comparação direta, é possível notar que na Tabela 11, que os valores simulados são mais próximos dos valores com ganho de 15% apresentados em *datasheet*, e a partir do mesmo, é apresentado que para um ganho de 15%, os módulos fotovoltaicos podem chegar a uma potência de 500,20 Wp, e a partir da simulação foi encontrado uma potência máxima de 495,23 Wp por módulo fotovoltaico.

Na Tabela 11 é possível visualizar que os erros são muitos baixos, tanto para corrente quanto para a tensão, e também nota-se que os valores são em sua maioria abaixo dos valores apresentados no *datasheet*, o que indica uma simulação mais conservadora.

A partir dos dados coletados, e apresentados já neste trabalho, a Tabela 12 foi criada, nela podemos notar que assim como na comparação com o *datasheet*, os valores de tensão se mantêm próximos aos valores dos módulos fotovoltaicos convencionais. Já a corrente máxima encontrada, há um ganho direto de 20,29%, e para a potência máxima, o ganho direto é de 18,74% comparado com a média de corrente máxima das usinas fotovoltaicas.

Tabela 12 - Comparativo - Simulação x Planta real

	Tensão média por módulo	Tensão máxima por módulo	Corrente máxima por módulo	Potência máxima
Usina com módulo bifacial	37,59	40,46	12,24	495,23
Aurora IA	38,03	42,31	8,62	364,51
Aurora IIB	35,92	38,56	10,00	385,64
Aurora IIIC	37,88	40,93	10,01	409,69
Aurora IIID	39,14	43,65	10,28	448,60
Aurora IIIE	38,29	41,07	9,53	391,18
Aurora IVF	38,26	41,04	10,11	414,79
Média/usinas	37,92	41,26	9,76	402,40
Média das usinas/Valores sim	-0,88%	-1,98%	20,29%	18,74 %

Fonte: Autores (2022)

A partir destes valores, podemos apresentar alguns ganhos em potência da usina fotovoltaica em seu total. Aplicando o módulo fotovoltaico sugerido diretamente na usina fotovoltaica, a mesma possuiria os seguintes valores:

- UFV AURORA I – 2.968 módulos fotovoltaicos de 435 Wp, totalizando 1.469,16 kWp e 4 inversores de 175 kW mais 2 inversores de 150 kW;
- UFV AURORA II – 2.688 módulos fotovoltaicos de 435 Wp, totalizando 1.330,56 kWp e 4 inversores de 175 kW mais 2 inversores de 150 kW;
- UFV AURORA III – 1.512 módulos fotovoltaicos de 435 Wp, totalizando 748,44 kWp e 3 inversores de 175 kW;
- UFV AURORA IV – 840 módulos fotovoltaicos de 435 Wp, totalizando 415,80 kWp e 2 inversores de 175 kW;

- UFV AURORA V – 840 módulos fotovoltaicos de 435 Wp, totalizando 415,80 kWp e 2 inversores de 175 kW;
- UFV AURORA VI – 952 módulos fotovoltaicos de 435 Wp, totalizando 471,24 kWp e 2 inversores de 175 kW.

Com esta comparação, é possível apontar os ganhos reais sobre os módulos fotovoltaicos convencionais, e apresentar os resultados concretos através da mesma.

4.6 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, será apresentado os resultados obtidos através da coleta de dados da usina fotovoltaica, da simulação da usina com módulos fotovoltaicos e da comparação das duas situações.

Primeiramente a partir da Tabela 9 e Tabela 11, por possuir erros próximos tanto para os dados adquiridos diretamente da usina fotovoltaica, quanto para a simulação do sistema fotovoltaico em comparação ao *datasheet* dos equipamentos, podemos afirmar que a simulação do sistema fotovoltaico tem tanta veracidade e confiabilidade quanto os dados coletados. O que indica que foi correto utilizar estes dados utilizados para apresentar os ganhos esperados.

Com a confirmação da veracidade e confiabilidade dos dados adquiridos e simulados, é possível atender apresentar resultados e análises que vão de encontro com os objetivos iniciais deste trabalho.

Um dos objetivos iniciais, era apresentar as principais diferenças entre os módulos fotovoltaicos convencionais e bifaciais. As características físicas e estruturais dos mesmos já foram apresentados neste trabalho, porém após a apresentação da Tabela 12, fica claro que uma das principais diferenças técnicas dos mesmos, é o ganho direto de corrente que os módulos fotovoltaicos bifaciais apresentam, e desta forma podemos afirmar que o seu ganho de potência máxima, é devido a este aumento significativo de corrente.

Outro objetivo apresentado inicialmente neste trabalho, é apontar os ganhos reais na utilização dos módulos fotovoltaicos bifaciais. Um dos principais ganhos que podemos apresentar neste tópico, é a potência máxima adicional através da aplicação dos módulos fotovoltaicos bifaciais, chegando num valor de 588,06 kWp. O que representa um ganho direto de 13,79% de potência máxima, e na área de energia solar, sabemos que a potência máxima da usina fotovoltaica implica diretamente na capacidade de geração da mesma. O ganho de geração

não será diretamente proporcional ao ganho de potência dos módulos fotovoltaicos, estes vão depender de outros dados da usina fotovoltaica, e neste trabalho o objetivo é analisar apenas os módulos fotovoltaicos, e não o conjunto da usina fotovoltaica.

Dando sequência nos objetivos deste trabalho, devemos apontar os devidos cuidados na utilização dos módulos fotovoltaicos bifaciais, a partir dos dados obtidos. A principal atenção que deverá ser tomada com a utilização deste equipamento, é resultado do próprio ganho do mesmo, pois o aumento da corrente dos módulos fotovoltaicos pode ser um empecilho no momento de definir um sistema fotovoltaico, pois com o ganho de corrente, o inversor fotovoltaico deverá suportar uma maior corrente de entrada. Para a usina fotovoltaica usada como base de dados em questão, não foi necessário a substituição dos inversores fotovoltaicos, pois os mesmos suportaram a corrente máxima de entrada dos módulos fotovoltaicos bifaciais utilizados em questão.

Por fim, para definir para definir em quais situações pode-se utilizado os módulos fotovoltaicos bifaciais, deve-se levar em conta que os módulos fotovoltaicos bifaciais, não deveram ter um custo de aquisição e instalação maior que 13,79%. Para obter o devido resultado, foi realizado uma consulta de mercado simples, para encontrar o valor de alguns módulos fotovoltaicos convencionais e bifaciais, e apresentar a diferença de custos dos mesmos.

Na Figura 22 é possível verificar que podemos encontrar módulos fotovoltaicos bifaciais com valores próximos a R\$ 1.100,00 e módulos fotovoltaicos convencionais com valores até mais altos que o mesmo. Portanto nota-se uma viabilidade financeira na aplicação destes módulos fotovoltaicos em usinas fotovoltaicas em solo, aonde as mesmas terão grande ganho de potência conforme já apresentado.

Figura 22 - Consulta de mercado

The image shows a screenshot of an e-commerce website. On the left, there is a product listing for 'Módulo Solar Sunova - 450w Bifacial' with a price of R\$1.099,90. The Sunova logo is visible. Below the product name, it says '9BB Half-Cell' and 'EFICIÊNCIA MÁXIMA 20,70%'. There are icons for Visa and other payment methods, and a 'Comprar' button. On the right, there is a larger product listing for 'Painel Solar Fotovoltaico 450W - OSDA ODA450-36-MHT' with a price of R\$1.199,00. It includes details about discounts (7% for PIX, 5% for card) and financing options. A 'COMPRAR' button is also present.

Fonte: Opu solar & Neo solar (2022)

Por fim, fica nítido que a utilização dos módulos fotovoltaicos em usinas fotovoltaicas em solo com *trackers* é uma ótima opção, pois a mesma pode proporcionar aumento da potência da usina, menor ocupação de área, menor custo, maior geração de energia e maior retorno financeiro.

Para apresentar estes resultados e informações, no decorrer dos trabalhos, foram encontradas algumas dificuldades. A principal que é possível relatar para apoiar futuros trabalhos, foi a falta de confiança nas empresas para abrir os dados de suas usinas fotovoltaicas, porém alterou em muito pouco o alinhamento deste trabalho. Outra situação que podemos relatar, é o trabalho intenso em compilar os dados para que pudessem ser utilizados da melhor maneira possível neste trabalho. Por fim, uma última dificuldade encontrada, foi em adquirir os dados através do *software* PVSYST®, pois este sempre visa apresentar os resultados de uma usina fotovoltaica completa, e não apenas dos módulos fotovoltaicos.

5 CONCLUSÃO

A busca crescente por novas fontes sustentáveis de geração de energia, também fez com que a tecnologia das fontes já existentes fosse aprimorada. Por tanto, o aperfeiçoamento de uma fonte renovável como a energia solar, vêm se tornando cada vez mais demandada. Um exemplo de uma melhoria para um sistema fotovoltaico é o uso dos módulos bifaciais.

Este trabalho teve como objetivo principal apresentar as vantagens na utilização de módulos fotovoltaicos bifaciais, abordando os ganhos reais que esse módulo traz sobre os monofaciais e os cuidados que devem ser tomados em sua utilização. Para análise, foi utilizada uma usina fotovoltaica já em operação que possui módulos fotovoltaicos monofaciais. Através de um simulador foi realizada a comparação, caso a mesma usina tivesse seus módulos substituídos por bifaciais.

Mesmo com as limitações que a aquisição de dados e a utilização do *software* acarretaram, foi possível concluir que a utilização de módulos bifaciais traz ganhos relativamente vantajosos, visto que ocupando uma mesma área, a substituição dos módulos monofaciais por bifaciais, proporcionaram um aumento na potência máxima da usina fotovoltaica, assim o tornando um melhor custo-benefício.

Para continuar a evolução das tecnologias e estudos sobre o tema, é notável que este trabalho pode ter algumas sequências e dessa forma validar ainda mais este estudo. Uma opção para a sequência seria realizar um estudo sobre uma usina fotovoltaica com módulos já bifaciais, por outro lado, também seria intrigante, a análise do impacto dos módulos fotovoltaicos na usina fotovoltaica como um todo, e não analisar apenas os módulos fotovoltaicos. Por fim é possível notar que o trabalho abre frente para vários outros estudos relacionados a engenharia elétrica, fontes renováveis e energia solar.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Carlos Alberto. **PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA**. 2004. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2004.

ANEEL (Brasil). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**: sigla. SIGA. 2022.

Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 31 maio 2022.

BRONZATTI, Fabricio Luiz. **MATRIZES ENERGÉTICAS NO BRASIL: CENÁRIO 2010-2030**. 2008. 15 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rio de Janeiro, 2008.

CANTOR, Guillermo Andrés Rodríguez. **INFLUÊNCIA DOS FATORES CLIMÁTICOS NO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM REGIÕES DE CLIMA TROPICAL**. 2017. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CAPRIGLIONE, Paulo Sergio. **A Energia Renovável na Matriz Energética Brasileira**. 2006. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Finanças e Economia Empresarial, Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 2006.

CARNEIRO, Joaquim. **MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CARACTERÍSTICAS E ASSOCIAÇÕES**. 2010. 18 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Física, Universidade do Minho, Braga, 2010.

CARVALHO, Joaquim Francisco de. **O DECLÍNIO DA ERA DO PETRÓLEO E A TANSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA PARA UM MODELO SUSTENTAVEL**. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

COELHO, Guilherme Aguiar. **ANÁLISE COMPARATIVA DA REDUÇÃO DA ÁREA DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PROPORCIONADA POR**

MÓDULOS BIFACIAIS. Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, v. 1, n. 1, p. 3-3, jan. 2020.

DEMONTI, Rogers. **PROCESSAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.** 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

EMPALUX (Brasil). **Componentes do Painel Fotovoltaico.** 2021. Disponível em: <https://empalux.com.br/componentes-do-painel-fotovoltaico/>. Acesso em: 31 maio 2022.

FALCÃO, Ângelo Wesley de Sousa. **Os reflexos da crise hídrica brasileira na estrutura de custos das empresas do setor de energia elétrica.** Revista Abcustos, Ceará, v. 1, ago. 2019.

FERNÁNDEZ, Eloi Fernández y (org.). **O sol vai voltar amanhã:** um espectro de análises sobre a energia fotovoltaica. Rio de Janeiro: Lexikon, 2020.

GALVÃO, Jucilene. **Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas.** 2015. 68 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MARQUES, Priscila. **Situação crítica de escassez hídrica atinge reservatórios das principais hidrelétricas do Brasil.** 2021. Disponível em: <https://omaringa.com.br/noticias/geral/situacao-critica-de-escassez-hidrica-atinge-reservatorios-das-principais-hidreletricas-do-brasil/>. Acesso em: 31 maio 2022.

MORAES, Caio. **Célula Fotovoltaica:** tudo que você precisa saber. Tudo que você precisa saber. 2020. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 31 maio 2022.

MUNIZ FILHO, Genilson Costa. **Uma Proposta de Metodologia de Cálculo para Estimação de Perdas Horárias de uma Usina Fotovoltaica com Módulos Bifaciais.** 2021. 104 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mestrado Profissional em Energia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

MUSSI, Ricardo Franklin de Freitas. **Pesquisa Quantitativa e/ou Qualitativa: distanciamentos, aproximações e possibilidades.** Revista Sustinere, Rio de Janeiro, dez. 2019.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna de; RUNTHER, Ricardo. **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos: Inpe, 2006.

PORTAL SOLAR (Brasil). **Como Funciona o Painel Solar Fotovoltaico (Placas Fotovoltaicas).** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em: 31 maio 2022.

PORTAL SOLAR (Brasil). **Efeito fotovoltaico X efeito fotoelétrico:** o que são e quais as diferenças. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/efeito-fotovoltaico-x-efeito-fotoeletrico-o-que-sao-quais-diferencas>. Acesso em: 31 maio 2022.

PORTAL SOLAR (Brasil). **Energia Fotovoltaica.** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>. Acesso em: 31 maio 2022.

PORTAL SOLAR (Brasil). **PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO BIFACIAL.** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/painel-solar-fotovoltaico-bifacial.html/amp>. Acesso em: 31 maio 2022.

PVSYST (Suíça). **Simulador PVsyst:** logiciel photovoltaïque. Logiciel Photovoltaïque. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/>. Acesso em: 03 out. 2022.

QUANTA GERAÇÃO (Brasil). **Energia Solar:** 4 fatores que impactam na geração. 4 fatores que impactam na geração. 2021. Disponível em: <https://quantageracao.com.br/energia-solar-4-fatores-que-impactam-na-geracao/>. Acesso em: 31 maio 2022.

RAMOS, Cristina de Moura. **Procedimentos para Catacterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos.** 2006. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOL, América do. **Potencial solar do Brasil.** Disponível em: <https://americadosol.org/potencial-solar-no-brasil/mapa/>. Acesso em: 10 out. 2022.

SOLAR INOVE (Brasil). **Painel Solar Bifacial**: entenda mais. Entenda Mais. 2022. Disponível em: <https://blog.solarinove.com.br/painel-solar-bifacial/>. Acesso em: 31 maio 2022.

SOLAR, Boreal. **Potencial de energia solar**: melhores regiões brasileiras para captação da luz solar. melhores regiões brasileiras para captação da luz solar. Disponível em: <http://borealsolar.com.br/blog/2016/10/26/potencial-de-energia-solar-quais-as-melhores-regioes-brasileiras-para-captacao-da-luz-solar/>. Acesso em: 15 out. 2022.

SOLAR, Canadian. **Datasheet módulo LR4HBD-435M**. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/>. Acesso em: 10 out. 2022.

SOLAR, Neo. **Módulo solar 450w OSDA**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/>. Acesso em: 10 out. 2022.

SOLAR, Opus. **Módulo bifacial Sunova 450w**. Disponível em: <https://loja.opussolar.com.br/>. Acesso em: 10 out. 2022.

SPA, Fimer. **Datasheet inversores PVS**. Disponível em: <https://www.fimer.com/>. Acesso em: 10 out. 2022.

TEMPO DE APRENDER CLIMA DE ENSINAR (Brasil). **Você sabe o que é albedo?** 2020. Disponível em: <https://www.climadeensinar.com.br/post/2020/05/20/voc%C3%AA-sabe-o-que-%C3%A9-albedo>. Acesso em: 31 maio 2022.

VIAN, Ângelo. **Energia Solar Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2021.

VILLALVA, Marcelo. **Entenda os módulos fotovoltaicos bifaciais**: conheça os módulos solares bifaciais e quais são suas vantagens. Conheça os módulos solares bifaciais e quais são suas vantagens. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/modulos-fotovoltaicos-bifaciais/>. Acesso em: 31 maio 2022.

VISION, Aurora. **Software monitoramento Aurora**. Disponível em: <https://www.auroravision.net/ums/v1/loginPage?redirectUrl=https%2F%2Fwww.auroravision.net%2Fdash%2Fhome.jsf&cause=ERROR>. Acesso em: 01 out. 2022.

YANAGI, Silvia de Nazaré Monteiro. **Albedo de uma floresta tropical amazônica:** medições de campo, sensoriamento remoto, modelagem, e sua influência no clima regional. 2006. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - Mg, 2006.

ZILLES, Roberto; MACÊDO, Wilson Negrão; GALHARDO, Marcos André Barros; OLIVEIRA, Sérgio Henrique Ferreira de. **Sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ZIMMER, Anderson. **Módulos fotovoltaicos: Fronteiras tecnológicas e um estudo comparativo.** 2022. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2022.