

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ERICK CHANHI MARONI

**CONDIÇÕES PARA MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

APUCARANA

2022

ERICK CHANHI MARONI

**CONDIÇÕES PARA MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Conditions for maximizing electric energy production in photovoltaic panels

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Bruno de Nadai Nascimento

APUCARANA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ERICK CHANHI MARONI

**CONDIÇÕES PARA MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30 de novembro de 2022

Bruno de Nadai Nascimento
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Matheus Rodrigues de Oliveira
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rogério Marcos Da Silva
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

APUCARANA

2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, ao orientador Bruno de Nadai Nascimento que me auxiliou na realização Trabalho de Conclusão de Curso.

Ao Wilson Barcelos Maroni que é meu pai, que sempre me motivou ao sucesso, e diversas vezes falou para mim “Estude para o futuro do Erick”.

A minha mãe, Rosimar Chanhi Pires, que sempre foi solícita e preservou a minha educação.

A minha irmã, Nayara Chanhi Maroni, que me ajudou quando estive em momentos difíceis.

Aos meus amigos da UTFPR que me apoiaram e passaram por diversos momentos comigo.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Apucarana que sempre possuiu os recursos necessários para a busca de conhecimentos para concluir o Trabalho de Conclusão de Curso.

Temos um grande problema se não entendermos
o planeta que queremos salvar.
(SAGAN, 1997)

RESUMO

Os módulos fotovoltaicos possuem uma grande capacidade de geração de energia no Brasil, já que este país apresenta uma grande incidência de irradiação. Outro fator que corrobora com a ideia de implantação de placas fotovoltaicas é o alto custo na tarifação da energia elétrica das concessionárias e os impactos ambientais causados por formas de geração de energia que prejudicam o ambiente. Este fato impulsiona e viabiliza investimentos do governo brasileiro em geração distribuída. Dessa forma, existe a necessidade de compreender o comportamento do sistema fotovoltaico quando influenciado pelo meio ambiente. Nesse sentido, o método aplicado é na estimação dos parâmetros das placas fotovoltaicas por meio da iteração de Gauss-Seidel com a intenção de quantificar e qualificar o efeito da irradiância, temperatura, latitude, longitude e outros fatores que influenciam na eficiência das placas solares. Durante este estudo foi aplicado diferentes modelos de placas fotovoltaicas para obter conclusões convergentes. Por fim, o objetivo é validar a possível forma de criar condições para maximização da produção de energia elétrica em painéis fotovoltaicos através de algoritmos que mostram todas as influências externas dos módulos fotovoltaicos. Outra aplicação dos algoritmos deste projeto foi a otimização da quantidade de módulos por *strings* que um inversor pode suportar, acarretando na elevação do rendimento da geração de energia dos módulos fotovoltaicos.

Palavras-chave: iteração de Gauss-Seidel; irradiância; temperatura; eficiência das placas solares

ABSTRACT

Photovoltaic modules have a great power generation capacity in Brazil, since this country has a high incidence of irradiation. Another factor that supports the idea of installing photovoltaic panels is the high cost of charging electricity from utilities and the environmental impacts caused by forms of energy generation that harm the environment. This fact boosts and enables investments by the Brazilian government in distributed generation. Thus, there is a need to understand the behavior of the photovoltaic system when influenced by the environment, and for that, it is necessary to comply with the parameters of the photovoltaic panels through the Gauss-Seidel iteration with the intention of quantifying and qualifying the effect of irradiance, temperature, latitude, longitude and other factors that influence the efficiency of solar panels. During this study, different models of photovoltaic panels were applied to obtain convergences. Finally, the objective is to validate the possible way to create conditions for maximizing the production of electric energy in photovoltaic panels through algorithms that show all the external influences of the photovoltaic modules. Another application of the algorithms of this project was the optimization of the number of modules per string that an inverter can support, resulting in the output of the energy generation yield of the photovoltaic modules.

Keywords: gauss-seidel iteration; irradiance; temperature; solar plate efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura física de junção pn para uma célula fotovoltaica de silício	13
Figura 2 - Junção <i>pn</i> em equilíbrio térmico	14
Figura 3 - Ilustração básica do sistema fotovoltaico <i>On grid</i>	16
Figura 4 - Circuito equivalente do modelo de diodo único.....	19
Figura 5- Fluxograma da Iteração de Gaus-Seidel	23
Figura 6 - Comportamento da irradiância do modulo CS7N-650MB-AG	26
Figura 7 - Comportamento da irradiância do modulo SQ80	27
Figura 8 - Comportamento da irradiância do modulo PV-MF165EB3	27
Figura 9 - Comportamento da irradiância do modulo PV-MLU255HC	28
Figura 10 - Curva característica de PV variando a temperatura (Modelo CS7N-650MB-AG)	30
Figura 11 - Curva característica de PV variando a temperatura (Modelo SQ80)	31
Figura 12 - Curva característica de PV variando a temperatura (Modelo PV-MF165EB3)	31
Figura 13 - Curva característica de PV variando a temperatura (Modelo PV-MLU255HC)	32
Figura 14 - Curva característica da potência de PV variando a temperatura (Modelo CS7N-650MB-AG).....	33
Figura 15 - Curva característica da potência de PV variando a temperatura (Modelo SQ80)	33
Figura 16 - Curva característica da potência de PV variando a temperatura (Modelo PV-MF165EB3)	34
Figura 17 -- Curva característica da potência de PV variando a temperatura (Modelo PV-MLU255HC).....	34
Figura 18 - Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo CS7N-650MB-AG).....	35
Figura 19- Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo SQ80)	36
Figura 20 - Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo PV-MF165EB3)	36
Figura 21 - Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo PV-MLU255HC).....	37
Figura 22 - Curva característica do módulo da Canadian apresentado pelo <i>datasheet</i>	38
Figura 23 - Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo PV-MF165EB3)	42
Figura 24 - Curva característica da irradiância sobre a eficiência (Modelo PV-MF165EB3)	43

Figura 25 - Curva característica da potência do PV sobre a influência da temperatura (Modelo PV-MF165EB3).....	44
Figura 26 - Curva característica da eficiência do PV sobre a influência da temperatura (Modelo PV-MF165EB3).....	45
Figura 27 - Curva característica em três dimensões do PV evidenciando a potência de saída (Modelo PV-MF165EB3)	46
Figura 28 - Curva característica em três dimensões do PV evidenciando a sua eficiência (Modelo PV-MF165EB3)	47
Figura 29 - Gráfico da tensão de cada <i>string</i> comparado com a tensão do inversor	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
1.2	JUSTIFICATIVA	9
1.3	OBJETIVOS	10
1.3.1	OBJETIVO GERAL	10
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	TEORIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	12
3	MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO EQUACIONAMENTO DO PAINEL	19
4	PROPOSTA DE MAXIMIZAÇÃO DO GANHO ENERGÉTICO	48
4.1	OBJETIVOS ALCANÇADOS	48
4.2	CÁLCULO DO VOC	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A energia gerada pelo sol tem sido aproveitada inesgotavelmente tanto como fonte de calor quanto fonte de luz, na atualidade é uma das alternativas energéticas mais promissoras para gerar a energia elétrica, já que a energia é imprescindível para o progresso do ser humano. Um fato curioso sobre o Sol, é que a energia provinda do mesmo é derivada de praticamente todas as outras energias, ou seja, a maioria das energias tem origem da energia do Sol (Pinho; Galdino, 2014).

Vale ressaltar que a energia do Sol é responsável por alguns ciclos biogeoquímicos como o ciclo da água, que é devido ao fato de conseguir evaporar a água, e por consequência dessa evaporação propicia o represamento da água que é usado em hidroelétricas para a geração de eletricidade. Através da irradiação solar ocorre a circulação atmosférica, ocasionando os ventos, e com isso, pode-se dizer que a energia eólica é uma manifestação indireta da energia solar, devido a formação dos ventos ser feita pela conversão da radiação solar em energia cinética, isso ocorre a partir da balança entre as diferenças de latitudes onde são emitidas a radiação solar incidente e a radiação terrestre. As energias provindas do carvão, gás natural e petróleo são produzidas através de resíduos de animais e plantas que alcançaram o seu desenvolvimento através da energia solar. A energia que é oriunda da matéria orgânica como a cana de açúcar, é feita a partir da fotossíntese, e dessa maneira absorve energia solar para se desenvolver, essa energia da matéria orgânica é transformada em combustível pelas usinas para gerar energia elétrica, assim confirmando a importância da energia solar (Pinho; Galdino, 2014).

A Organização das Nações Unidas (ONU) é um órgão internacional que tem como uma de suas responsabilidades preservar o meio ambiente. Tendo isso em vista, a ONU registrou o protocolo de Kyoto que busca diminuir os impactos ambientais ocasionados pelo desenvolvimento industrial e do consumo do planeta, (M. C. O. Souza; Corazza, 2017). Com isso, a preocupação com a sustentabilidade energética e ambiental ficou mais evidente, e a busca de energias limpas foram pautadas como solução. As energias mais limpas que mais se destacam são as providas da hidroelétrica, biomassa, fotovoltaica e entre outras (Heppelmann et al., 2006). Como

a energia solar possui uma fonte inesgotável e por ser limpa é considerada uma das energias mais atraentes atualmente, outro fator que está favorecendo a energia solar é alta nas tarifas devido aos impactos da pandemia de COVID-19, aumento do dólar, elevação do consumo nas residências e pela diminuição do nível dos reservatórios de água. Mediante a esse cenário deve-se impulsionar os investimentos em sistemas fotovoltaicos em todo o país. De acordo com o diretor comercial da TechLux, Fabio Delgado, nos últimos meses houve aumento sucessivos na tarifação de energia pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o que vai impulsionar a venda de painéis solares pelo país, já que essa fonte solar é um dos melhores recursos para ajudar na diminuição do custo da conta de luz (Casarin, 2021; Zilli, 2021).

Entretanto os módulos fotovoltaicos apresentam um rendimento abaixo do que se pode chegar. De acordo com o professor Sandro Márcio Lima da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul as placas funcionam com apenas 20% de carregamento de carga da potência nominal. Logo, é preciso encontrar meios alternativos que possam elevar a eficiência desse recurso. De acordo com o professor Lima, uma forma para isso é melhorar a eficiência de conversão de energia solar para elétrica a partir de mecanismos tecnológicos. Essa solução, o que mais impressiona, além de melhorar na eficiência não ocasionara nenhum aumento significativo de custo para o cliente. Dessa forma, nota-se que existe a importância de uma fundamentação teórica para o melhor entendimento de todo o modulo fotovoltaico, com a finalidade de obter o melhor rendimento possível na geração de energia (Ribeiro, 2020).

1.2 Justificativa

A cada ano que passa a instalação de energia solar fotovoltaica está aumentando em todo o mundo, essa fonte de energia é considerada uma das mais notórias. Esse fato se sobressai já que todos os meses mais de 50.000 novas casas no mundo utilizam sistemas fotovoltaicos, assim, todas essas casas saíram da escuridão (Nazmul, 2018). Existe diversos projetos com intensão de instalar painéis fotovoltaicos em diversos países, já que a maioria dos países utilizam fontes de energia não limpas. Dessa forma a intenção é diminuir a emissão de poluentes no ambiente, deixando-o mais sustentável, e a energia solar pode ajudar por ser uma das energias mais limpas e por possuir uma fonte inesgotável, o Sol (Energética, n.d.; Shongwe; Hanif, 2015).

A partir disso, houve o avanço da tecnologia de sistemas fotovoltaicos (PV) e com os subsídios de diversos governos fizeram a geração de energia usando PV ser economicamente viável. Através disso, sucedeu um crescimento industrial mundial de 40% por ano nos sistemas de geração fotovoltaicos, com esse crescente uso da energia solar existe a necessidade dos equacionamentos fotovoltaicos afim de propiciar o maior rendimento possível, otimizar o design e dimensionamento do painel fotovoltaico, e com isso, maximizar a capacidade de geração de energia (Chatterjee et al., 2011; Shongwe; Hanif, 2015).

Atualmente no Brasil, a capacidade de energia solar é limitada e existe a previsão a curto prazo para que a mesma seja mais favorável devido à redução do preço da tecnologia PV. O governo brasileiro é impulsionado para aplicações de energia solar, já que existe um aumento nas tarifas de energia elétrica e uma pressão relacionado a proteção ambiental e climática por meio de ONGs e da população (Project; Moore, 2017).

A viabilidade econômica é o maior obstáculo que precisa ser superado antes da inserção generalizada de energia solar na rede elétrica. Uma forma de amenizar o problema econômico é a criação de mais projetos viáveis de energia renovável, um exemplo de projeto bom é a imersão de leilões exclusivos de energia renovável. Geralmente a aquisição de novos programas de geração no Brasil ocorrem normalmente através de leilões públicos que foram organizados pelo governo. Um fator que contribui para a expansão de energia solar é o fato que as usinas que geram energia limpa se aproximam de ingressar em mais leilões específicos para tecnologias de geração que não poluem, tornando os painéis um pouco mais atrativos, em contrapartida possuem uma tarifa um pouco maior devido a sua tecnologia o que desfavorece, contudo, existe mais aplicações que contribuem o uso da energia solar do que desfavorecem (Project; Moore, 2017).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um estudo sobre a energia solar aplicada em modelos fotovoltaicos, tendo em vista a modelagem matemática do sistema, além de

correlacionar as influências que a geração dessa energia pode sofrer aos meios externos e a validação do algoritmo que emula as características de um sistema fotovoltaico comparados com os módulos fabricados a partir do datasheet do mesmo.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos propostos para esse trabalho são:

- Realizar um estudo acerca da energia solar e apresentar o motivo que essa energia obteve um substancial aumento.
- Implementar um modelo matemático das placas fotovoltaicas.
- Estudar os fatores que influenciam a eficiência do módulo fotovoltaico.
- Validar o modelo implementado com dados fornecidos pelo fabricante.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que o primeiro se remete a introdução, que é uma abordagem mais sucinta sobre os painéis fotovoltaicos e como são e serão importantes no futuro.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica dos painéis fotovoltaicos e como está relacionado sua estrutura física com a sua teoria.

O Capítulo 3 refere-se a parte do modelo matemático dos módulos fotovoltaicos, e os resultados obtidos através dessas equações, que são os gráficos e curvas.

A influência da radiação e do ângulo de inclinação da placa fotovoltaica, baseando-se nas equações encontradas no Capítulo 3 são comentadas no Capítulo 4.

Por fim, as referências desse trabalho apresentadas no Capítulo 5.

2 TEORIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

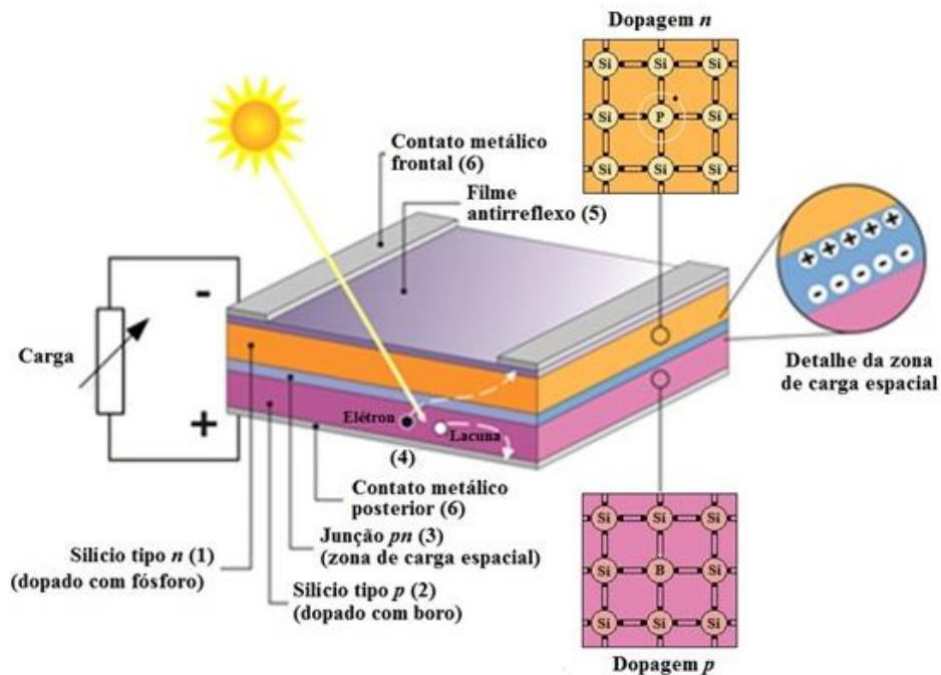
O modelo do diodo único é composto de uma fonte de corrente, um diodo, a resistência série em paralelo com a resistência shunt. As células PV são constituídas por camadas de semicondutores, como o silício que é um material usualmente utilizado nos painéis fotovoltaicos.

O processo da geração de energia ocorre quando a radiação dos fótons emerge sobre a célula solar. E quando isso acontece a radiação é absorvida por utilizar matérias semicondutores, os elétrons que estão no semicondutor se excitam. Dessa forma, os elétrons se movimentam, esse fenômeno que acontece é denominado de Efeito Fotoelétrico.

A partir desse fenômeno é gerado um sistema elétrico funcional, pois a corrente movimenta-se em uma direção e, portanto, a eletricidade gerada, e possui uma corrente contínua. Esses processos são ilustrados na Figura 1 (IN, 1998).

Outro fator importante a se ressaltar é o efeito fotovoltaico que faz a conversão da radiação solar em energia elétrica. Para esse processo ocorrer é necessária uma célula fotovoltaica que é o mecanismo encarregado de converter a energia provinda do sol em energia elétrica. Os módulos fotovoltaicos são conhecidos como painéis solares ou placa solares e são compostos pelo conjunto de células fotovoltaicas encapsuladas (IN, 1998; SOUZA, [s. d.]).

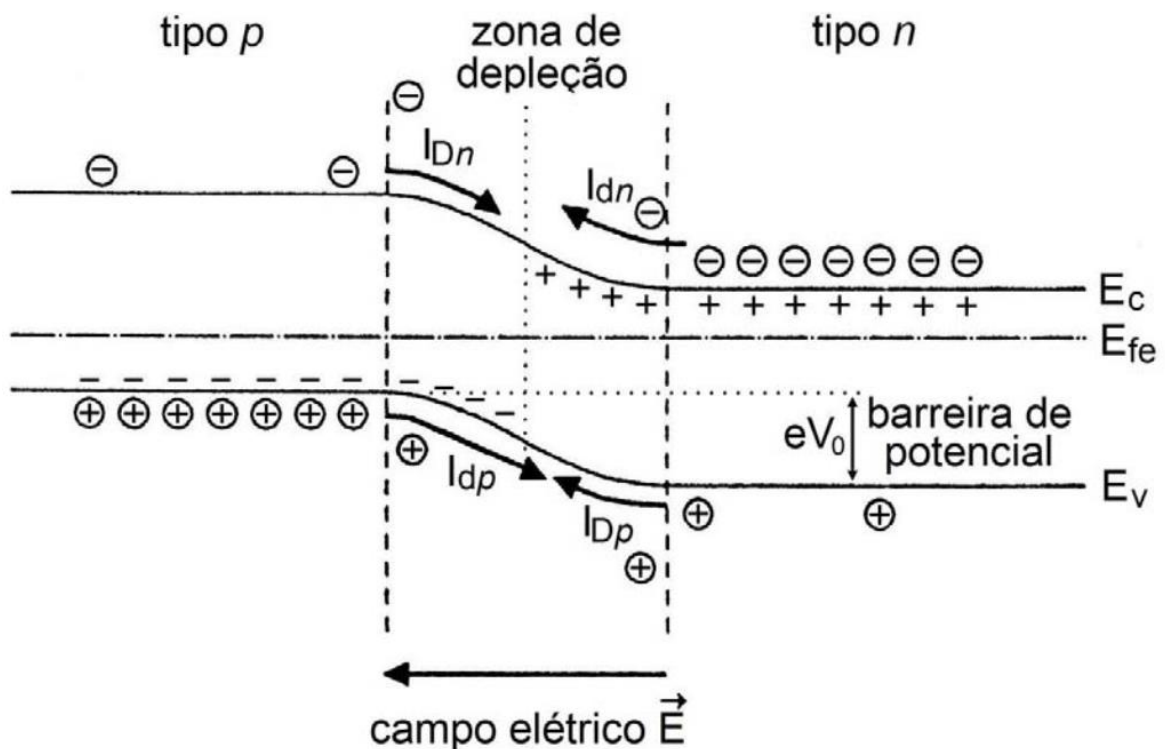
Figura 1 - Estrutura física de junção pn para uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos (2014)

Para a junção pn existe uma diferença de potencial entre os espaços entre p e n que é cabível dizer que esta diferença resulta em um potencial químico total para os elétrons (Diferença no nível Fermi). Quando ocorre o contato entre esses materiais, acontece o equilíbrio dos níveis de Fermi dos materiais, ou seja, esse nível se iguala, o que ocasiona o fluxo inicial de portadores e pelo campo elétrico estabelecido devido a diferença de potencial existente, e dessa forma, esse fluxo é responsável por estimular a corrente fotogerada conforme a Figura 2 demonstra pela zona de depleção. (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 2 - Junção *pn* em equilíbrio térmico



Fonte: Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos (2014)

Para tornar os sistemas solares mais eficientes foi feito um estudo com a necessidade de conhecer como funciona seu comportamento alterando diferentes fatores, e a partir disso, o desempenho do painel solar depende destes fatores, como por exemplo a temperatura, poeira, fatores ambientais, umidade, design da placa, inclinação perante ao solo, eficiência das células no painel solar, latitude, longitude e irradiação (NAZMUL, 2018). Nessa pesquisa, foram evidenciados temperatura, design da placa, inclinação perante ao solo eficiência das células no painel solar, latitude, longitude, irradiação e temperatura.

No começo da fabricação das células fotovoltaicas o tipo escolhido era preferencialmente o silício *P-type* e sua fabricação desenvolveu-se de forma mais rápida devido a sua elevada tolerância a danos causados pela radiação cósmica em comparação ao *N-type*, tornando ideal na utilização de aplicações aeroespaciais (VILLALVA, 2020). Dessa forma, há um aumento nas indústrias que produzem as células solares do tipo P e assim continuaram até os dias de hoje. As células do tipo P possuem algumas vantagens como as temperaturas mais baixas necessárias para as difusões de fósforo para formar a junção P-N, comparado na ocorrência das

difusões de boro que são fundamentais para as células do tipo N, juntamente com a ocorrência de que as difusões de fósforo proporcionam a remoção competente de impurezas metálicas do silício policristalino. Sendo assim, a fabricação de células do tipo P são mais simples e também gastam menos energia, tornando painéis mais baratos. Entretanto, as células do tipo N possuem características que a favorecem como:

- Menor o LID (Light Induce Degradation): É uma degradação ocasionado com pelo contato do boro com o oxigênio, e como as células do tipo N utilizam geralmente o fósforo para o doping acaba diminuindo essa degradação.
- Menor o PID (Potencial Indução da Degradação): O PID é uma degradação que está relacionada pelo potencial induzido, que provém das imperfeições do vidro, e já que não possui o elemento boro que degrada o módulo essa imperfeição do vidro torna-se menor.
- Coeficiente de temperatura: É menos afetado por altas temperaturas sobre as células.
- Maior coeficiente de bifacialidade: As placas fotovoltaicas do tipo N, geralmente possuem seu coeficiente ligeiramente maior que os módulos fotovoltaicos do tipo P. Isso remete-se a sua capacidade de conversão por ter um desempenho melhor (JEAN, 2021).

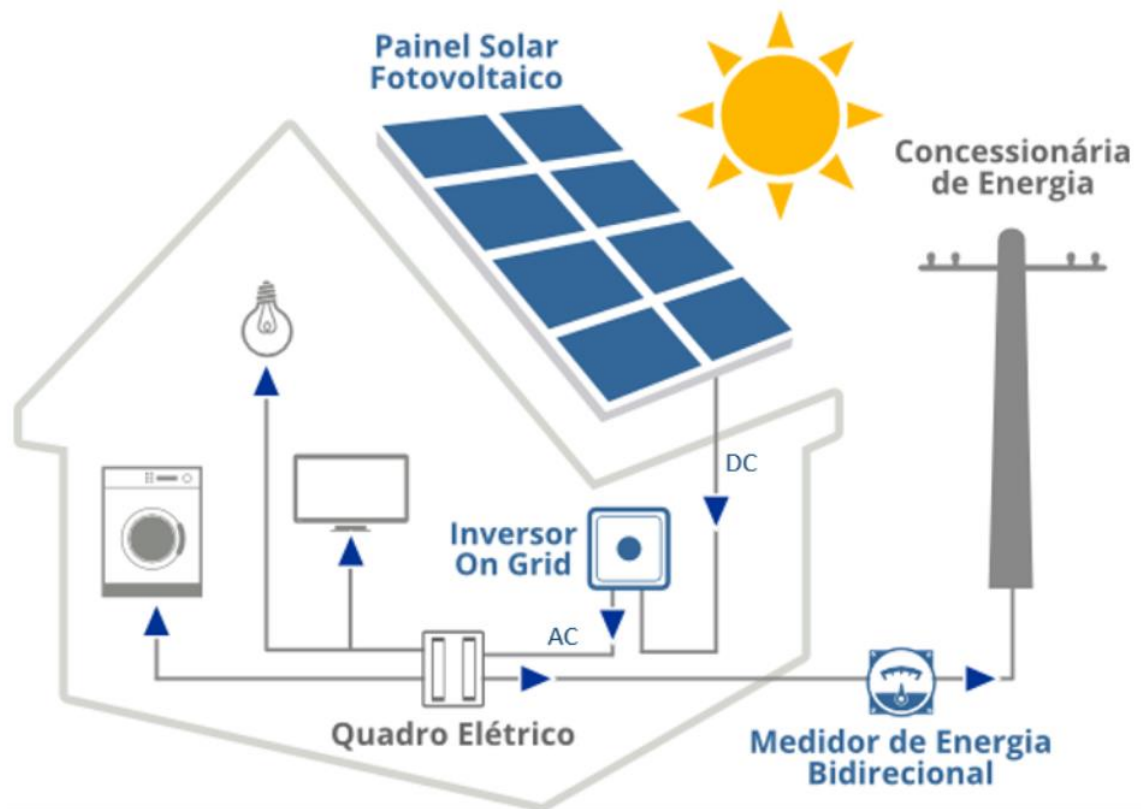
O último tópico acima (Maior coeficiente de bifacialidade) refere-se à existência de células fotovoltaicas tanto na parte frontal quanto na parte traseira dos módulos fotovoltaicos. Isso significa que existe dois tipos de módulos fotovoltaicos e nessa pesquisa foi utilizado esses tipos para conseguir observar essa diferença. As placas fotovoltaicas que contém células fotovoltaicas apenas na parte frontal são denominados módulos monofaciais, e os que possuem células fotovoltaicas tanto na parte frontal quanto na parte traseira são chamados de módulos bifaciais (JEAN, 2021).

A finalidade de introduzir células fotovoltaicas na parte traseira é aumentar irradiância, isso porque é factível arrecadar uma parcela de energia incidente, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos, esse fenômeno de espalhamento é conhecido como irradiância difusa (JEAN, 2021).

Observando essas vantagens é notório dizer que os módulos fotovoltaicos do tipo N possuem um potencial de desempenho maior quando comparados aos tipos P. Entretanto, é difícil a adoção total do silício N no lugar do tipo P. Já que no mercado o tipo N é muito mais caro, logo as placas fotovoltaicas mais utilizadas são do tipo P (VILLALVA, 2020).

O sistema fotovoltaico é composto por grupo gerador, um bloco de condicionamento de potência e, arbitrariamente, uma seção de armazenamento. O grupo gerador possui arranjos fotovoltaicos, feitos por painéis solares em diferentes associações, o cabeamento elétrico é o que os une e o alicerce proporciona o suporte. O bloco de condicionamento de potência pode possuir conversores CC-CC, inversores, controladores de carga (caso haja armazenamento), um seguidor de ponto de potência máxima (SPPM) e vários outros dispositivos de controle, proteção e supervisão. Por último, a seção de armazenamento que é formada através de acumuladores elétricos (baterias), também podendo ser outras maneiras de armazenamento de energia (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 3 - Ilustração básica do sistema fotovoltaico *On grid*



Fonte: Inversor solar: Tudo o que você precisa saber está aqui (2019)

A Figura 3 mostra um sistema fotovoltaico simplificado, onde faz uma representação do sistema fotovoltaico instalado em uma residência. Como pode ser notado o sistema mostrado é *On-Grid*, o que significa que está conectado na rede da concessionária. Uma vantagem é que a energia produzida além da consumida é enviada para concessionária, e em compensação a concessionária de energia fornece créditos de energia que são abatidos nas próximas faturas de energia. Existe também os sistemas que não estão conectados à rede da concessionária denominado sistemas *Off-Grid*, são sistemas independentes da rede elétrica, esses sistemas *Off-Grid* geralmente são usados em áreas remotas ou em regiões rurais, já que não estão conectados à rede é necessário um meio de armazenar para depois ser utilizada (MINHA CASA SOLAR - L&F COMÉRCIO, 2019).

O inversor de frequência é essencial para o sistema fotovoltaico funcionar, já que esse dispositivo possui a função de fornecer energia elétrica em corrente alternada (CA), através de alguma fonte de energia elétrica em corrente contínua (CC). No caso da Figura 3, essa energia é provida dos módulos fotovoltaicos, mas poderia vir de qualquer sistema que consegue fazer o armazenamento de baterias, devido as baterias conseguem fazer o armazenamento de energia em corrente contínua (PINHO; GALDINO, 2014). Através da Figura 3 é visto que após a energia solar ser gerada pelos módulos fotovoltaicos é levada para o inversor, que faz a transformação da corrente contínua em corrente alternada, e em seguida é distribuída para o consumo dos equipamentos utilizado e também conectado ao quadro da rede que leva para ao medidor de energia bidirecional com a intenção de medir o quanto de energia é vendido para a concessionaria, por fim, é levado para a rede da concessionaria.

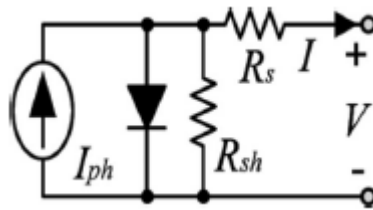
Em um sistema de painéis solares usualmente as placas são caracterizadas pela potência elétrica máxima, entretanto diversas características compatíveis com a aplicação a ser escolhida deve ser considerada. A potência de máxima do painel solar é feita nas condições padrão de ensaio (STC, do inglês *Standard Test Conditions*), que considera a temperatura da célula a 25° C em uma irradiância solar de 1,0 kW/m² isso sob uma distribuição espectral padrão para AM 1,5. Essa condição é importante, já que em que diversas fichas de dados (*datasheets*) de módulos fotovoltaicos possuem dados em STC, que é um indicativo que este padrão é seguido em diversos

países, e através dessa condição é possível fazer uma estimativa da potência do modulo solar (PINHO; GALDINO, 2014).

3 MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO EQUACIONAMENTO DO PAINEL

O Capítulo 2 ressaltou a importância e as características de um sistema fotovoltaico. Além de discorrer sobre o modelo que emula as características de um PV. O circuito equivalente do modelo do diodo único é demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Circuito equivalente do modelo de diodo único



Fonte: Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods (2015)

A Figura 4 consiste de um circuito que possui uma fonte de corrente, um diodo em paralelo com essa fonte e resistências em paralelo e em série. É possível estabelecer uma relação de tensão e corrente a partir da lei dos nós de Kirchoff, dessa forma, essa relação pode ser escrita como dado na Equação 1:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{N_s * V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Na Equação 1, I representa a corrente do módulo fotovoltaico, I_{ph} corresponde à corrente fotogerada, I_0 é a corrente reversa do diodo, V é a tensão do módulo fotovoltaico, R_{sh} é a resistência do shunt, R_s é a resistência em série, N_s é o número de células conectadas em série no módulo e V_t que é a tensão térmica de junção que está relacionada por constantes.

A modelagem matemática tem a finalidade de proporcionar condições que demonstram o comportamento do módulo fotovoltaico, com isso é possível validar como esse sistema sofre variações em condições ambientais diferentes (irradiação solar e temperatura). Essa modelagem é feita em duas etapas, sendo que a primeira é na estimação dos parâmetros e a segunda é utilizar esses parâmetros que foram estimados nas equações que foram definidas para produzir os gráficos que representam a atuação das placas fotovoltaicas variando a irradiância e temperatura (SHONGWE; HANIF, 2015).

A estimação de parâmetros é feita a partir do método de iteração Gaussiana considerando três condições de operação para o módulo fotovoltaico, essas condições são:

- Circuito aberto: Nessa condição os terminais de saída do PV não são conectados, e dessa forma a corrente que flui na saída será zero. Por outro lado, a tensão de circuito aberto (V_{oc}) estará no ponto máximo (SHONGWE; HANIF, 2015).
- Curto circuito: Ocorre quando os terminais de saída do painel fotovoltaico são ligados juntos, formando um curto de forma que a tensão de saída do painel fotovoltaico seja zero, e assim, a corrente de curto-circuito (I_{sc}) seja a maior possível (SHONGWE; HANIF, 2015).
- Ponto de máxima potência sucede quando atinge a potência máxima no sistema, e isso acontece quando a corrente de saída do painel fotovoltaico é igual a corrente I_{mp} (Corrente para máxima potência) e a tensão de saída de PV é igual ao V_{mp} (Tensão para máxima potência). Em adição desse método há também a derivada da potência em relação a tensão que é igual a zero ($\frac{d P_{mp}}{d V_{mp}} = 0$) (SHONGWE; HANIF, 2015).

A modelagem matemática nesse sistema consiste em cinco parâmetros. Para encontrar esses parâmetros foi utilizado as condições supracitadas acima e algumas manipulações matemáticas na Equação 1. Dessa forma, utilizando o método do curto-circuito é possível equacionar a corrente reversa do diodo de acordo com o exposto na Equação 2:

$$I_o = \frac{I_{sc}R_{sh} + I_{sc}R_s - V_{oc}}{R_{sh} \exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right)} \quad (2)$$

Para o encontrar a equação de V_t , basta utilizar manipulações matemáticas, como substituições de equações e isolar as variáveis desejadas para utilizar na Equação de V_t . Após isso, aplica-se a condição de Ponto de máxima potência na Equação 1, e substitui a Equação 2 na Equação 1, e em seguida, isola-se V_t , acarretando na Equação 3.

$$V_t = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s - V_{oc}}{N_s \ln \left(\frac{I_{sc}R_{sh} + I_{sh}R_s - V_{oc} - V_{mp} - I_{mp}R_s - I_{mp}R_s}{I_{sc}R_{sh} + I_{sc}R_s - V_{oc}} \right)} \quad (3)$$

A corrente fotogerada vem da condição de circuito aberto e isolando I_{ph} na Equação 1 resulta na Equação 4.

$$I_{ph} = \frac{V_{oc}}{R_{sh}} + I_o \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

Para encontrar a resistência em série foi utilizado a condição do Ponto de máxima potência em conjunto de manipulações matemáticas, como igualar a Equação 3 com a Equação 4 aplicada no Ponto de máxima potência. Com a finalidade de encontrar esse parâmetro de forma mais eficiente, com isso, a expressão é denotada abaixo:

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{mp} + N_s V_t \ln(E)}{I_{mp}} \quad (5)$$

Onde E equivale.

$$E = \frac{N_s V_t R_{sh} I_{mp} - N_s V_t V_{mp} + N_s V_t I_{mp} R_s}{V_{mp} I_{sc} R_s + V_{mp} I_{sc} R_{sh} - V_{mp} V_{oc} + I_{mp} R_s V_{oc} - I_{mp} R_s I_{sc} R_s - I_{mp} R_s R_{sh} I_{sc}}$$

Para encontrar a resistência shunt de forma mais efetiva, foi feito a condição de curto-circuito com a adição da derivada da corrente em relação a tensão, assim obtendo a inclinação da corrente em relação a tensão, dessa forma a equação que rege seu comportamento é mostrada a seguir:

$$R_{sh} = \frac{N_s R_{sh} V_t + N_s R_s V_t + (R_s R_{sh} I_{sc} + R_s I_{sc} R_s - R_s V_{oc}) \exp \left(\frac{I_{sc} R_s - V_{oc}}{N_s V_t} \right)}{N_s V_t + (I_{sc} R_{sh} + I_{sc} R_s - V_{oc}) \exp(N_s V_t)} \quad (6)$$

A partir das equações dos parâmetros foi utilizado um algoritmo em MATLAB para implementar o método de Iteração Gauss-Seidel, com o objetivo de determinar os valores dos cinco parâmetros, com isso a partir dos valores das placas fotovoltaicas dos datasheets e com as equações que relacionam essas variáveis os parâmetros que resultaram são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Os cinco parâmetros em STC do modulo fotovoltaico

Parâmetros	CS7N-650MB-AG	SQ80	PV-MF165EB3	PV-MLU255HC
I_o	0,00000004206851	0,0000000001112	0,000000009298	0,00000211
I_{ph}	18,3900633	4,8513204	7,3618129	8,890274
V_t	0,0193827	0,024721662	0,03343764	0,02066444
R_s	0,0017223	0,36872233	0,2536225	0,01546576
R_{sh}	500,0422840	1354,3592	1029,6759	501,7918

Fonte: Autoria própria (2022)

Um fator importante é que foi considerado os parâmetros na Condição de Teste Padrão “STC”. Logo, cada variável que possui o subíndice STC será considerado que tenha esse valor de temperatura e irradiância padrões.

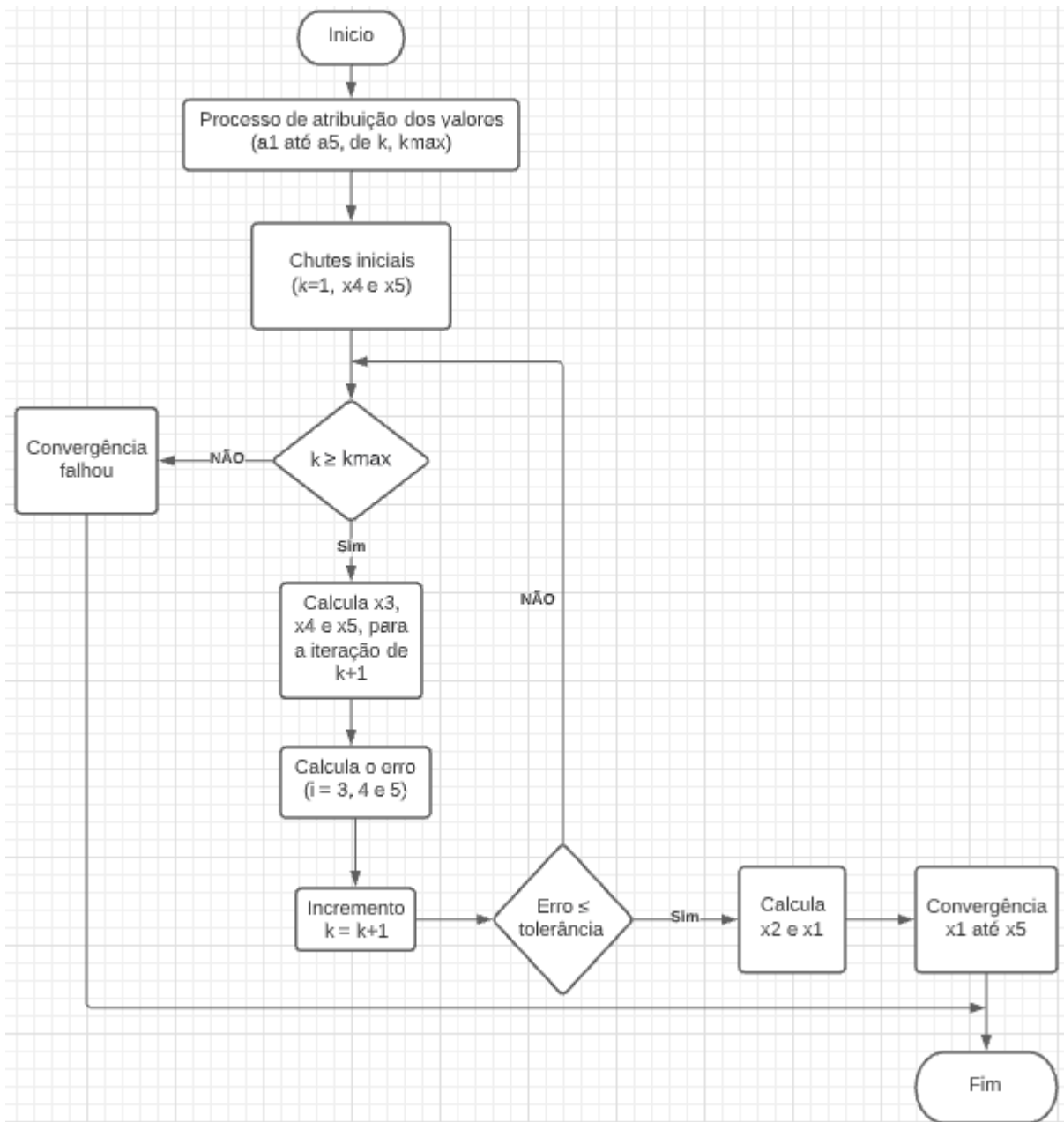
O fluxograma representativo é apresentado na Figura 5. Para facilitar e otimizar o processo do programa foi feito uma transformação de variáveis que é representado pela Tabela 2.

Tabela 2 – Lista das transformações das variáveis

Transformação	Nome dos Parâmetros transformados
$I_{sc} = a1$	Corrente de curto-circuito
$V_{oc} = a2$	Tensão de circuito aberto
$V_{mp} = a3$	Tensão no ponto máximo de potência
$I_{mp} = a4$	Corrente no ponto máximo de potência
$n = a5$	Número de células em série no módulo
$I_{ph} = x1$	Corrente fotogerada
$V_t = x3$	Tensão de junção
$R_s = x4$	Resistência em série
$R_{sh} = x5$	Resistência em paralelo
$I = y1$	Corrente de saída
$V = y2$	Tensão de saída
$P = y3$	Potência de saída
$I_{ph,G} = x11$	Corrente fotogerada dependente da irradiação

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 5- Fluxograma da Iteração de Gaus-Seidel



Fonte: Autoria própria (2022)

O comportamento de um sistema fotovoltaico possui uma tensão não linear e características de tensão que são dependentes da radiação solar incidente, da temperatura que a célula se encontra e dos parâmetros de junção positivo-negativo. Logo, a operação das placas fotovoltaicas é geralmente sobre as mudanças nas condições atmosféricas, que serão afetadas pela temperatura e irradiância quando estão sendo empregados. A produção de energia do módulo fotovoltaico é afetada por essas condições, e dessa forma, são imprescindíveis e precisam ser consideradas para a modelagem das placas solares. Na modelagem adotada das equações que

envolvem a resistência serie e a resistência shunt são constantes a variação de temperatura e irradiação, e isso é evidenciado nas Equações 5 e 6. Com isso, é possível notar que não sofre alterações na temperatura e na irradiância. Contudo, os parâmetros considerados que se modificam com a alteração da temperatura e irradiância são I_{ph} e I_o . Dessa forma, utiliza-se uma técnica de modelagem que é composta por uma combinação de equações para trazer e avaliar o comportamento desses parâmetros mediante as variações da irradiância e temperatura. Com isso, a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito podem ser expressas pelas Equações 7 e 8 (SHONGWE; HANIF, 2015):

$$V_{oc}(T) = V_{oc} + K_v \Delta T \quad (7)$$

$$I_{sc}(T) = I_{sc} + K_I \Delta T \quad (8)$$

Sendo que K_v na Equação 7 é um coeficiente de temperatura da tensão, K_I na Equação 8 é o coeficiente de temperatura da corrente e o ΔT é a variação da temperatura no módulo fotovoltaico, essa variação é definida pela diferença de temperatura que o módulo está menos a temperatura no teste padrão, conforme é mostrado na Equação 9.

$$\Delta T = T - T_{STC} \quad (9)$$

As temperaturas precisam estar em Kelvin e a temperatura em STC é de 25° C, ou seja, 298 K.

A partir dos valores encontrados na Tabela 1 foi notado que os valores da resistência shunt são muito altos, logo na Equação 2 é colocado R_{sh} em evidência e todos os números divididos pelo mesmo são considerados iguais a zero, dessa forma, a corrente de saturação reserva do diodo é expressa na Equação 10.

$$I_o = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) - 1} \quad (10)$$

Conforme mostra a Equação 7 e na Equação 8, a corrente I_{sc} e a tensão V_{oc} são dependentes da temperatura, dessa forma, acarretando na Equação (9).

$$I_o = \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc} + K_v \Delta T}{N_s V_t}\right) - 1} \quad (11)$$

A corrente gerada pelo efeito fotoelétrico é dependente da temperatura também, com isso, pode ser expressa algebricamente sendo dependente da mesma, e isso é feito através da substituição da Equação 7 na Equação 4 conforme a Equação 12.

$$I_{ph} = \frac{V_{oc} + K_v \Delta T}{R_{sh}} + I_o \left[\exp\left(\frac{V_{oc} + K_v \Delta T}{N_s V_t}\right) - 1 \right] \quad (12)$$

A irradiância possibilita a produção da corrente fotogerada que é diretamente proporcional a irradiância, além de ser uma função da temperatura, dessa forma, a corrente fotogerada é dada por:

$$I_{ph}(G) = G(I_{ph}) \quad (13)$$

Onde G é a irradiância, e através dos dados obtidos a melhor forma de enxergar o comportamento da corrente fotogerada (I_{ph}) é substituindo na Equação 12 a Equação 13, que dessa forma, resulta na Equação 14.

$$I_{ph} = G \left(\frac{V_{oc} + K_v \Delta T}{R_{sh}} + I_o \left(\exp\left(\frac{V_{oc} + K_v \Delta T}{N_s V_t}\right) - 1 \right) \right) \quad (14)$$

Para uma equação mais simplificada da equação fotogerada utiliza-se a Equação 10 para I_o e a partir de algumas manipulações matemáticas, a equação que rege o comportamento da corrente fotogerada é demonstrada na Equação 15.

$$I_{ph} = G(I_{ph,STC} + K_I \Delta T) \quad (15)$$

Foi escolhido as Equações 3, 5, 6, 11 e 15 na implementação do algoritmo, e dessa forma, as mesmas regem o comportamento do módulo fotovoltaico. Essa primazia foi devido a facilidade de trabalhar com essas equações, além de conseguir observar como impactam no sistema. Dessa forma, foi simulado o comportamento do módulo fotovoltaico através de gráficos e tabelas projetados. Entretanto, para conseguir simular o comportamento das placas fotovoltaicas são necessários parâmetros essenciais dos modelos estudados que são encontrados nos *datasheets*. Essas informações são demonstradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros retirados dos datasheets para 25° C

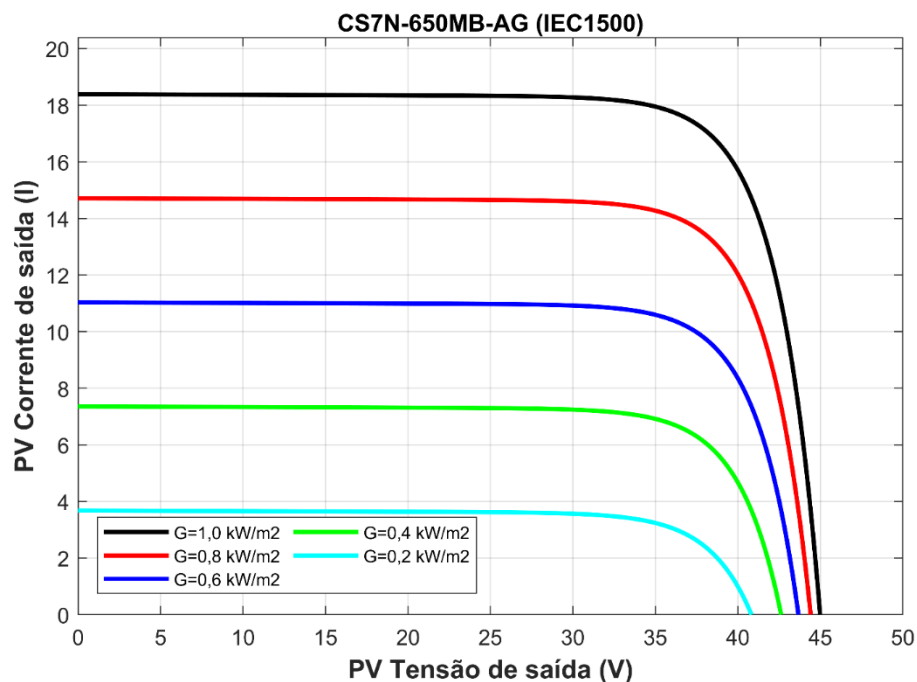
Parâmetros	CS7N-650MB-AG	SQ80	PV-MF165EB3	PV-MLU255HC
I_{sc} (A)	18,39	7,36	7,36	8,89
V_{oc} (V)	45,00	21,8	30,4	37,8
I_{mp} (A)	17,16	4,58	6,83	31,2
V_{mp} (A)	37,90	17,5	24,2	8,18
N_s	132	36	50	120
K_I (A/°C)	0,0005	0,0014	0,00057	0,00056
K_v (V/°C)	-0,0026	-0,081	-0,00346	-0,00350

Fonte: Mitsubishi e Kyocera e Powermax e Fallis (2003 e 2009 e 2004 e 2013)

As empresas fabricantes de módulos utilizadas foram Canadian (CS7N-650MB-AG), Shell Solar (SQ80), Mitsubishi Eletric (PV-MF165EB3 e PV-MLU255HC). Cada um desses módulos possui características diferentes, conforme é mostrado na Tabela 3.

A partir dos dados dos *datasheets* é possível observar o comportamento de saída da tensão em relação a corrente de saída do módulo fotovoltaico variando a irradiância, conforme é mostrado nas Figuras 6 a 10.

Figura 6 - Comportamento da irradiância do modulo CS7N-650MB-AG



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 7 - Comportamento da irradiância do módulo SQ80

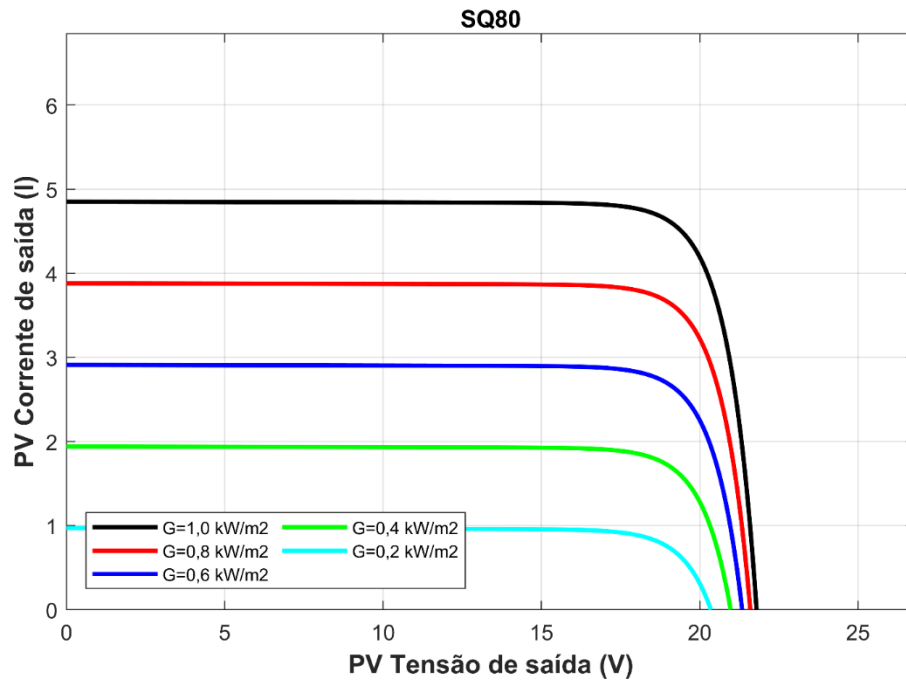


Figura 8 - Comportamento da irradiância do módulo PV-MF165EB3

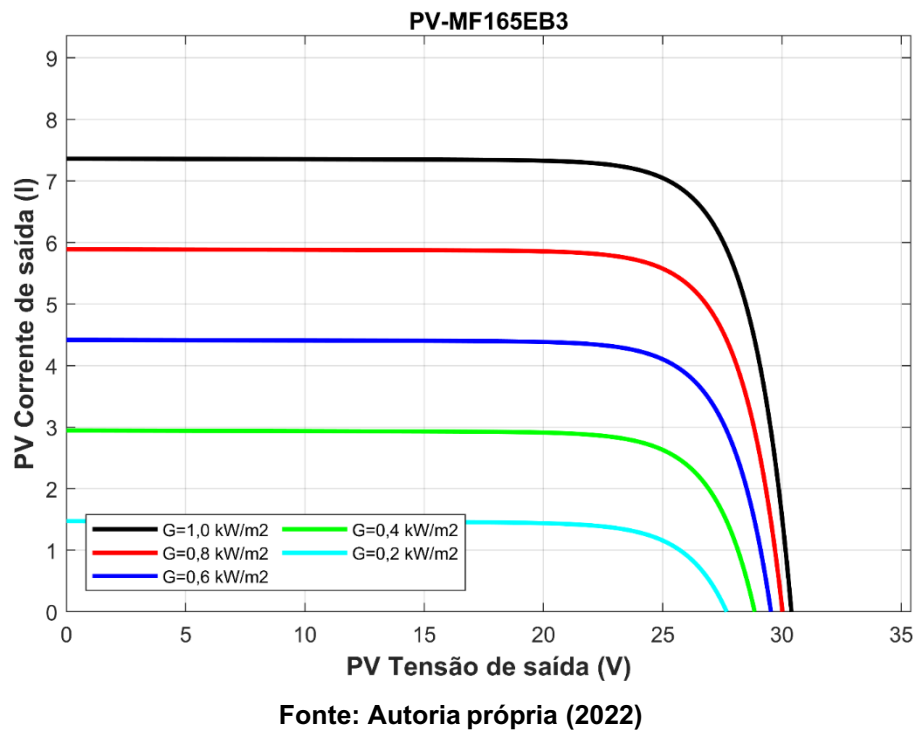
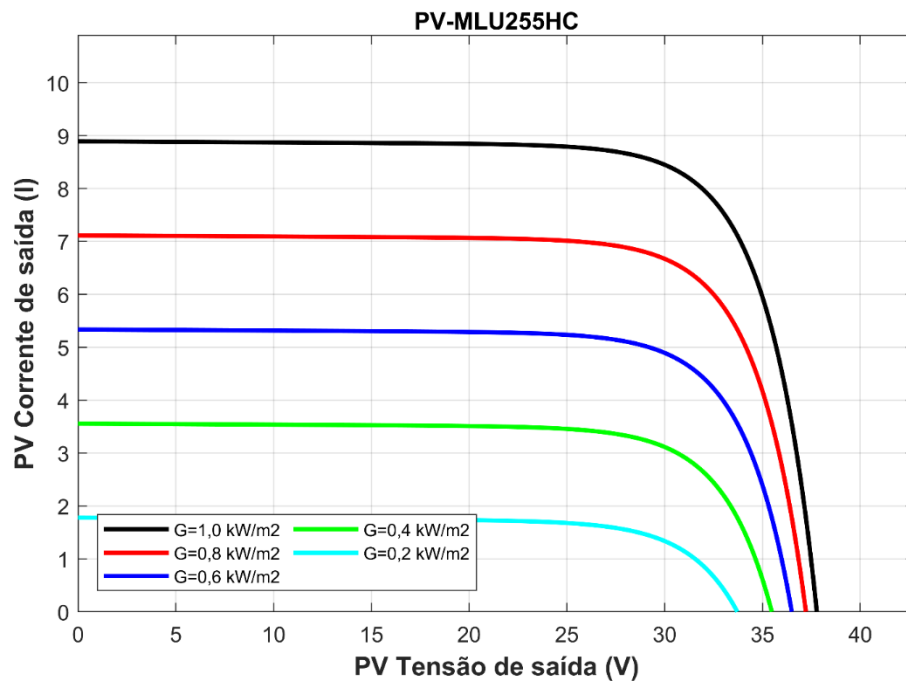


Figura 9 - Comportamento da irradiância do módulo PV-MLU255HC



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir dos dados dos *datasheets* é possível observar o comportamento de saída da tensão em relação a corrente de saída do módulo fotovoltaico variando a irradiância, conforme é mostrado nas Figuras 6 a 10.

É possível notar entre os modelos acima dos módulos fotovoltaicos que o CS7N-650MB-AG possui a maior tensão de saída e a maior corrente de saída, além de possuir aproveitamento ligeiramente melhor quando se varia a irradiância em relação aos outros modelos. Um dos motivos para a placa fotovoltaica da Canadian ter um desempenho melhor é porque é um modelo bem mais recente comparado aos outros, e porque é um módulo bifacial, assim, consegue absorver irradiância direta (parte frontal) e difusa (parte traseira).

Outra análise que pode ser feita é em ao número de células encontrado em cada placa fotovoltaica (N_s). A partir da Tabela 3 é mostrado que conforme aumenta o número de células, a corrente (I_{mp}) e a tensão (V_{mp}) de operação do módulo também aumentam, logo são parâmetros proporcionais, esse argumento é válido apenas quando as células fotovoltaicas possuem a mesma tecnologia.

Esse fato é evidenciado em cada gráfico apresentado acima com exceção do módulo Canadian que é muito mais recente que os outros. E isso ocorre mesmo

variando a irradiância, já que os módulos que possuem um menor N_s não ultrapassam em termos de corrente e tensão as placas fotovoltaicas com um maior número de células. Um fator importante a se ressaltar é que a temperatura dos módulos foi mantida a 25 °C para os resultados obtidos acima.

Em vista, que foi observado como a irradiância pode alterar o sistema, será visto como a temperatura pode modificar a saída de corrente e de tensão. A temperatura também faz variar a tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito, e esses dois parâmetros dependem da tensão de saída, dessa forma, é necessário primeiro descobrir os mesmos a partir da temperatura, as equações que regem esses comportamentos são as Equações 7 e 8, e variando a temperatura acarretou nos valores mostrados nas Tabelas 4 a 8.

Tabela 4 - Característica de PV à 20° C

Parâmetros para 20° C	CS7N-650MB-AG	SQ80	PV-MF165EB3	PV-MLU255HC
I_{sc} (A)	18,2500	4,90032	7,35896	8,88747
V_{oc} (V)	45,6756	22,2146	26,0920	38,1836

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 5 - Característica de PV à 30° C

Parâmetros para 30° C	CS7N-650MB-AG	SQ80	PV-MF165EB3	PV-MLU255HC
I_{sc} (A)	18,4900	4,8863	7,36466	8,89307
V_{oc} (V)	44,4594	21,4072	27,3221	37,3779

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 6 - Característica de PV à 40° C

Parâmetros para 40° C	CS7N-650MB-AG	SQ80	PV-MF165EB3	PV-MLU255HC
I_{sc} (A)	18,7220	4,8723	7,37036	8,89867
V_{oc} (V)	43,2432	20,5998	28,5522	36,5671

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 7 - Característica de PV à 50° C

Parâmetros para 50° C	CS7N-650MB-AG	SQ80	PV-MF165EB3	PV-MLU255HC
I_{sc} (A)	18,9500	4,8583	7,37606	8,90427
V_{oc} (V)	42,0720	19,7924	27,3221	35,7564

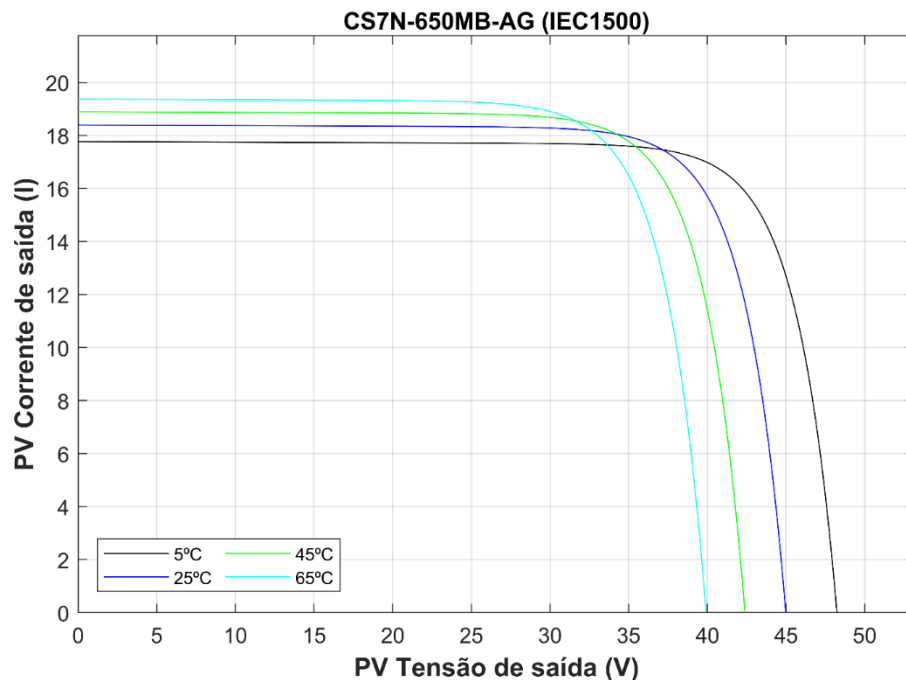
Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 8 - Característica de PV à 60° C

Parâmetros para 60° C	CS7N-650MB-AG	SQ80	PV-MF165EB3	PV-MLU255HC
I_{sc} (A)	19,0600	4,8443	7,38176	8,90987
V_{oc} (V)	41,4864	18,9632	26,0920	34,9456

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir dos resultados obtidos nas tabelas acima, é possível fazer uma comparação com as Figuras 10 a 13. Já que I_{sc} são os pontos das curvas que as tensões são zero (ponto no eixo x que é igual a zero) e para o V_{oc} são os valores dos pontos no gráfico quando a corrente é igual a zero nas curvas apresentadas, ou seja, é quando o valor do eixo y é zero. Através disso, é possível confirmar os valores dados nas tabelas a partir das curvas das Figuras de 10 a 13, que são as representações dos modelos das placas fotovoltaicas variando a temperatura.

Figura 10 - Curva característica de PV variando a temperatura (Modelo CS7N-650MB-AG)

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 11 - Curva característica de PV variando a temperatura (Modelo SQ80)

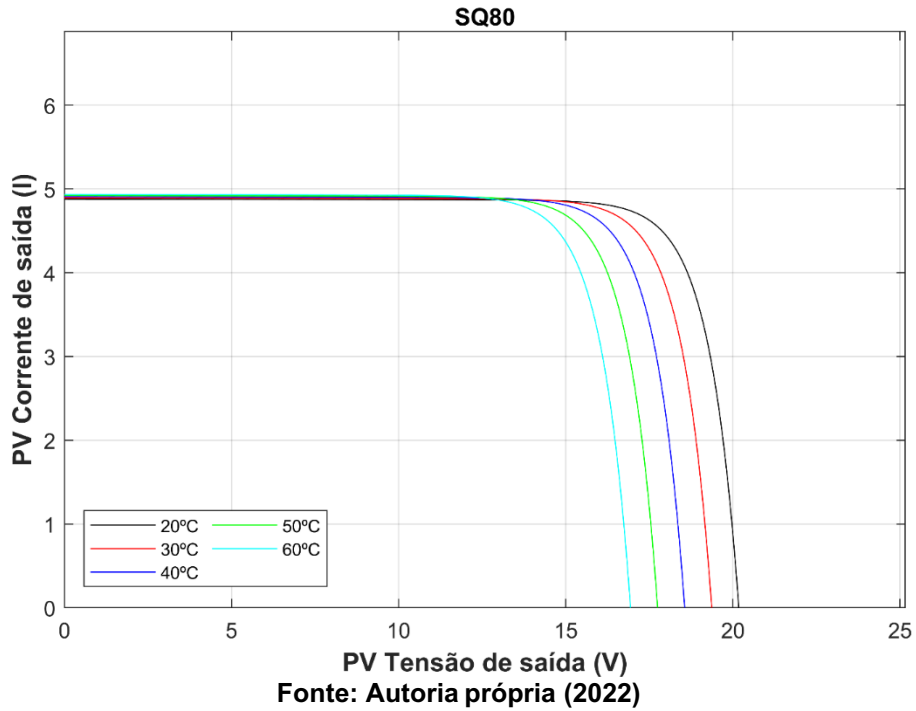


Figura 12 - Curva característica de PV variando a temperatura (Modelo PV-MF165EB3)

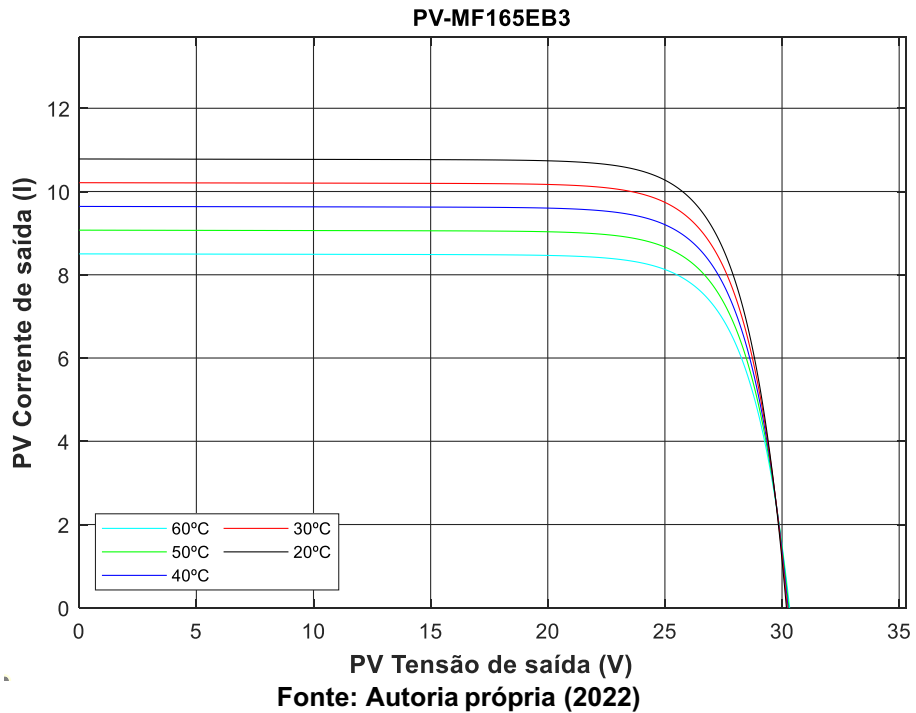
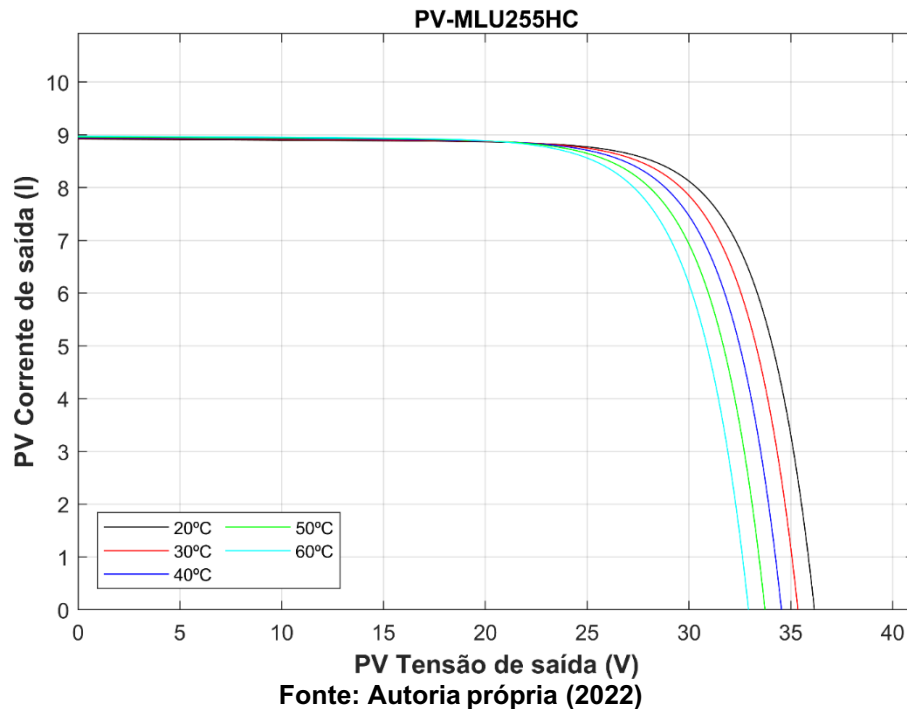


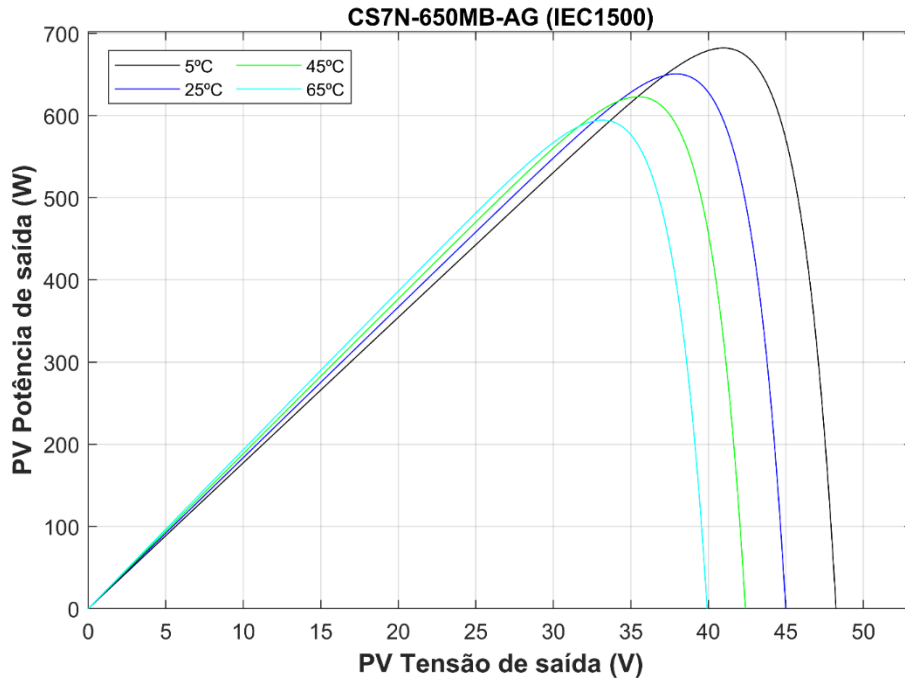
Figura 13 - Curva característica de PV variando a temperatura (Modelo PV-MLU255HC)



Através dos gráficos e das tabelas obtidas é possível observar que conforme a temperatura aumenta a tensão de saída abaixa de forma significativa. Este fato ocorre para todos os modelos apresentados neste trabalho. Apesar que cada modelo apresenta um comportamento muito semelhante. É perceptível que para gerar os maiores valores de tensão e corrente de saída o modelo da Mitsubishi (PV-MLU255HC) conseguiu valores mais altos, com isso pode-se dizer que obteve um melhor aproveitamento nessas temperaturas.

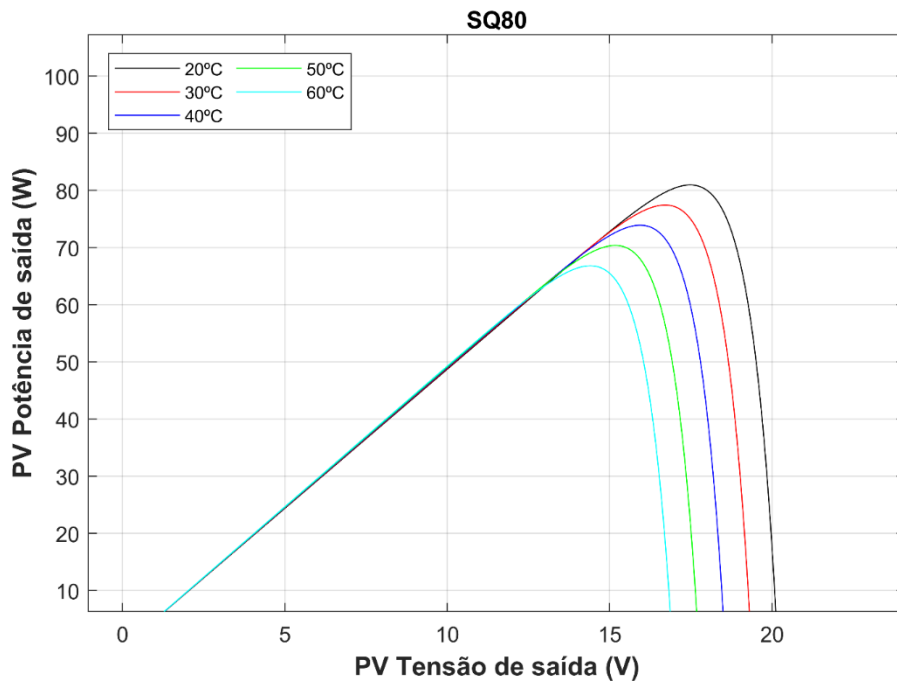
Foi notado que a temperatura pode modificar a corrente e a tensão de saída do sistema fotovoltaico, e através desse fato altera a potência de saída do sistema, já que a potência de saída é dada pelo produto da corrente de saída pela tensão de saída, dessa forma, o comportamento da potência em relação a tensão quando se varia a temperatura é mostrado na Figura 14 a 17.

Figura 14 - Curva característica da potência de PV variando a temperatura (Modelo CS7N-650MB-AG)



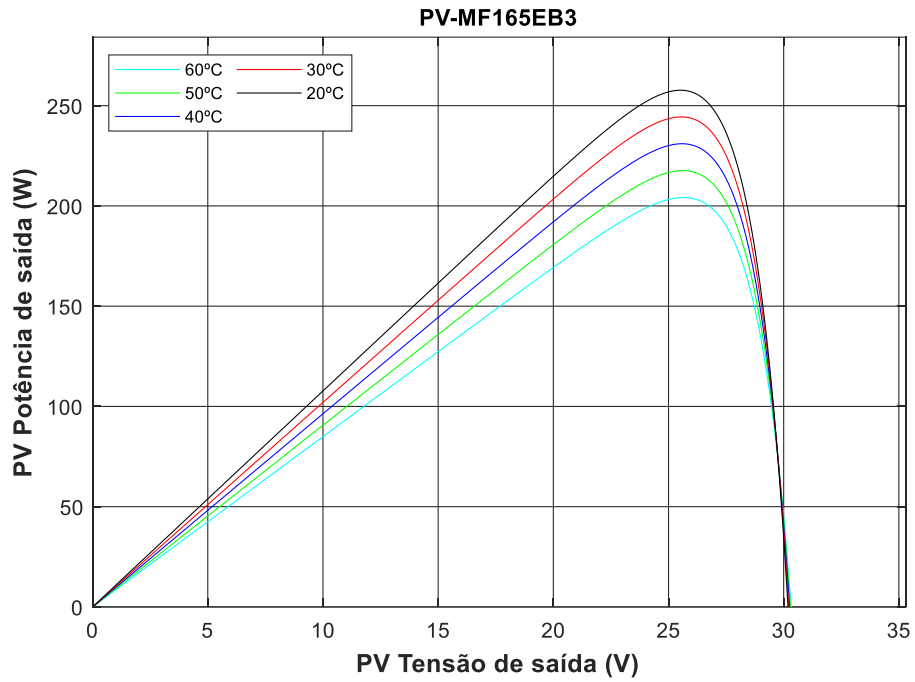
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 15 - Curva característica da potência de PV variando a temperatura (Modelo SQ80)



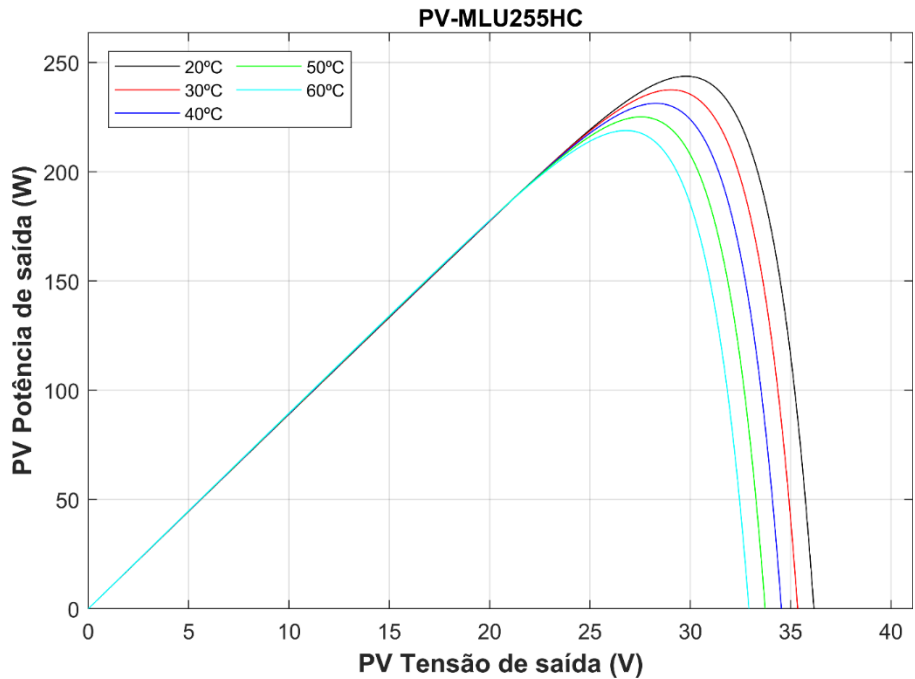
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 16 - Curva característica da potência de PV variando a temperatura (Modelo PV-MF165EB3)



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 17 -- Curva característica da potência de PV variando a temperatura (Modelo PV-MLU255HC)

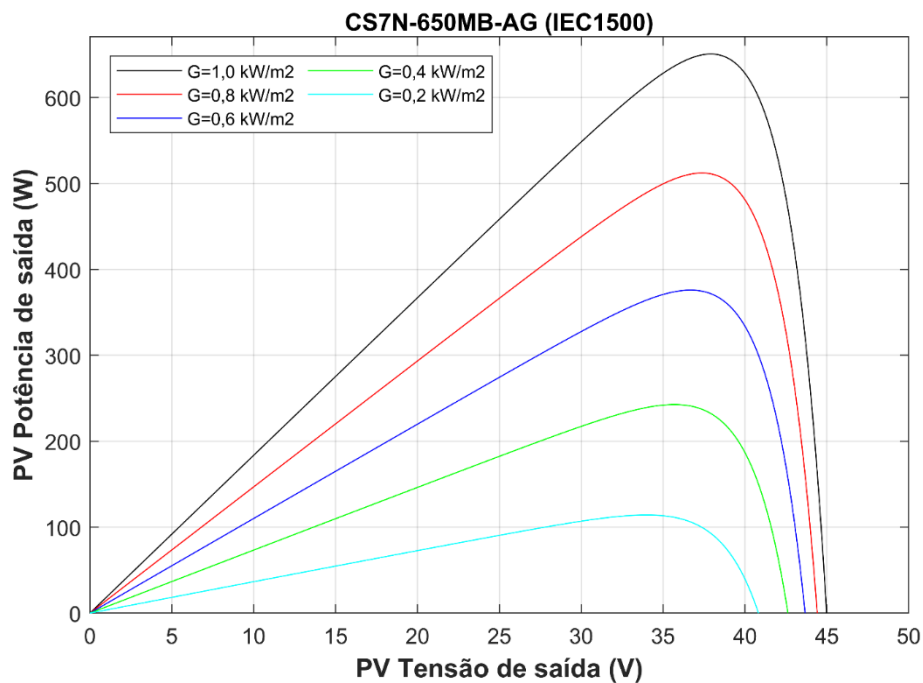


Fonte: Autoria própria (2022)

Nos gráficos apresentados da potência variando a temperatura é notado que os modelos possuem comportamento muito semelhante. Um fato importante que vale ressaltar é que a temperatura quando é diminuída a potência dos módulos fotovoltaicos aumentam, logo pode-se dizer que a potência é inversamente proporcional a temperatura.

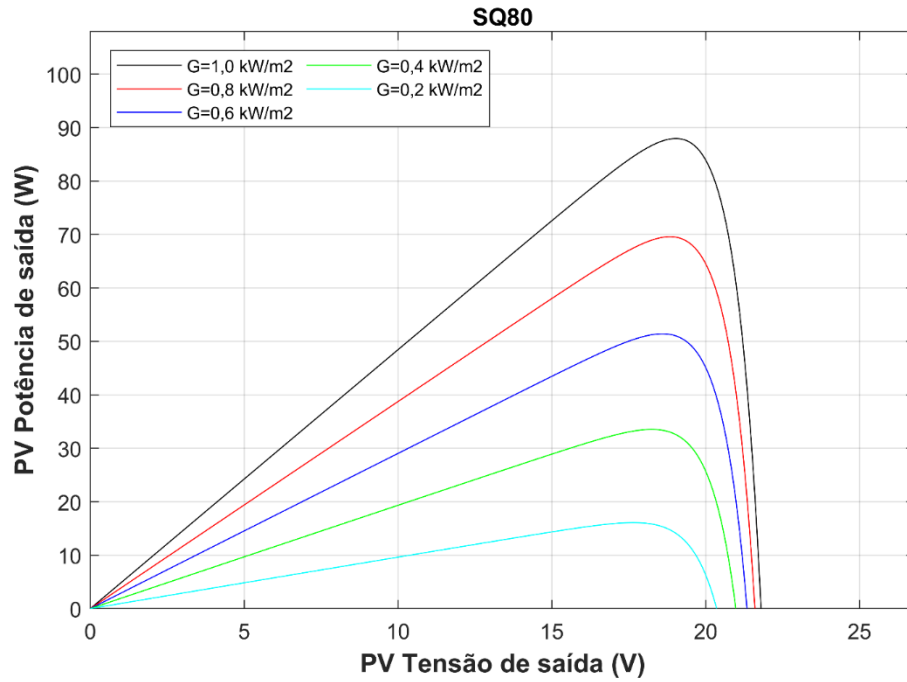
Conforme visto, a tensão e a corrente de saída também variam com a irradiância e conseqüentemente faz variar a potência. O comportamento da potência nas placas fotovoltaicas é importante para determinar a capacidade do equipamento, em vista disso, os gráficos da variação da irradiância são contemplados neste trabalho.

Figura 18 - Curva característica da potência de PV variando a irradiância (Modelo CS7N-650MB-AG)



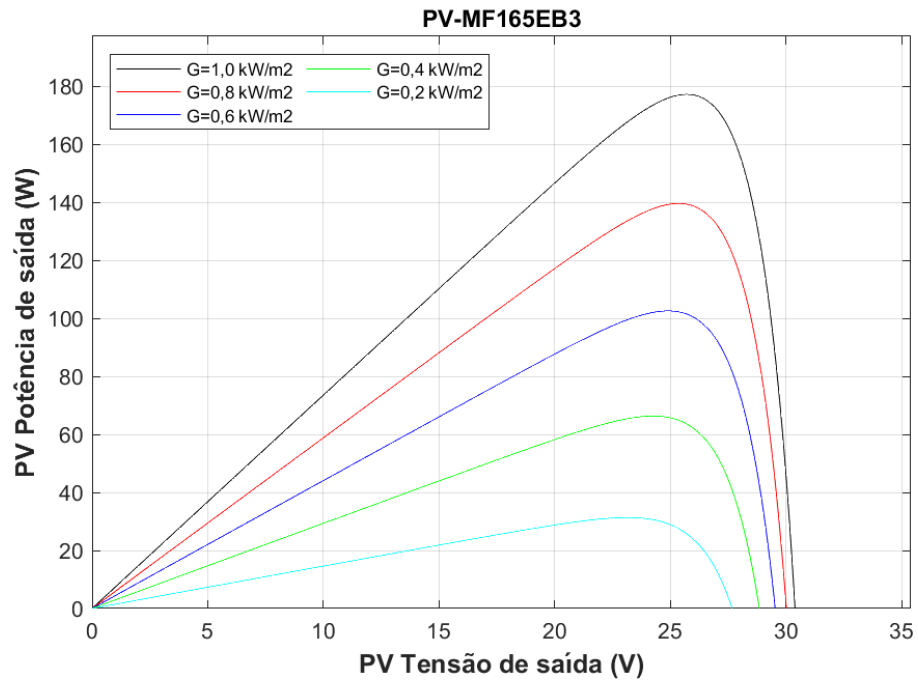
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 19- Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo SQ80)



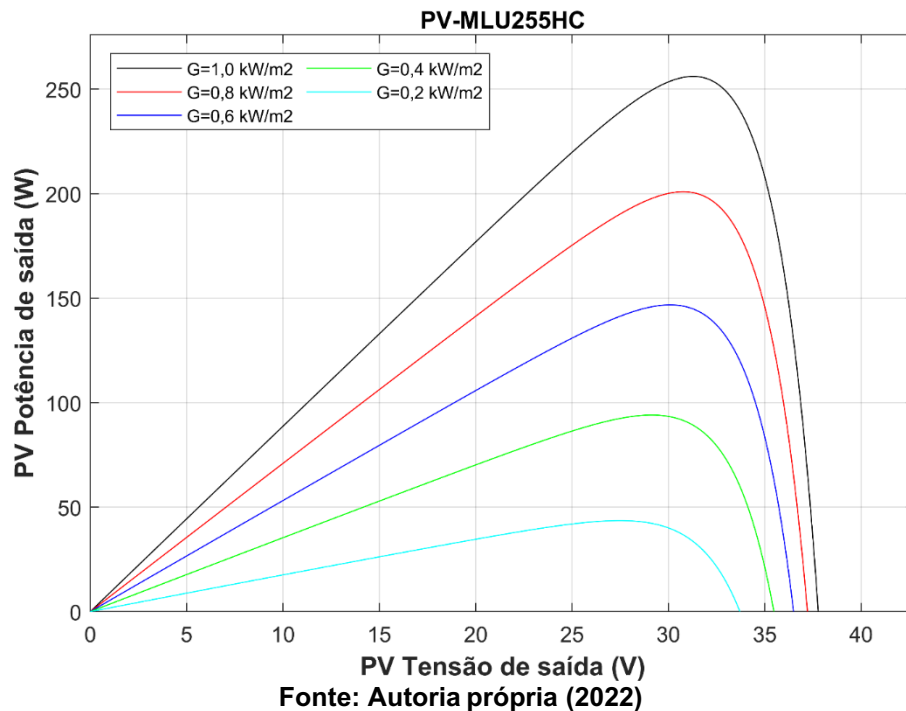
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 20 - Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo PV-MF165EB3)



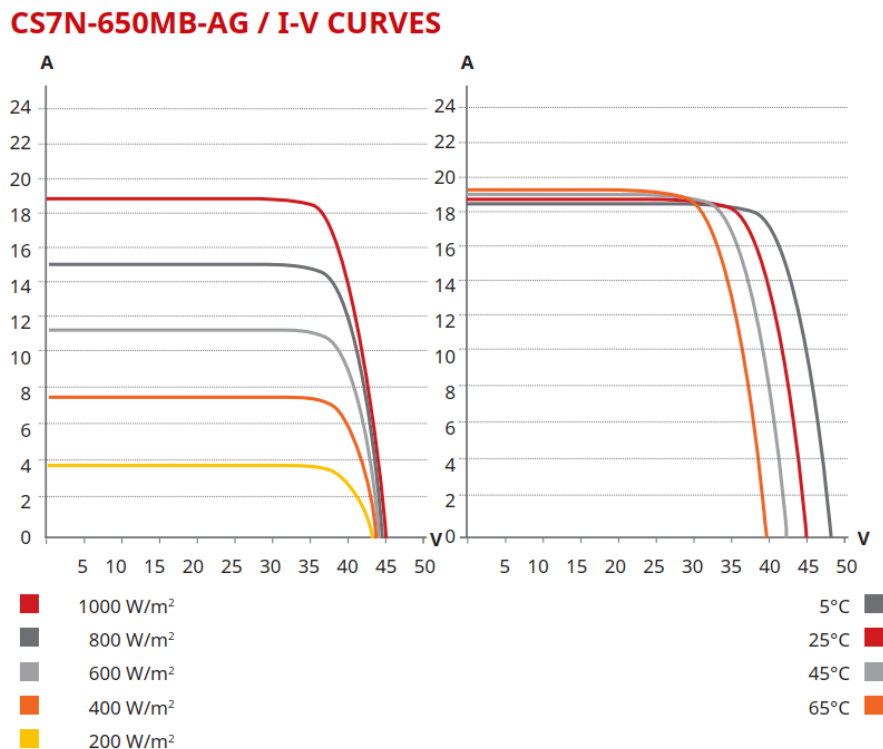
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 21 - Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo PV-MLU255HC)



Um fator observado nas curvas apresentadas de potência pela tensão é que quando se varia a irradiância também modifica a potência, dessa forma, é constatado uma proporcionalidade em relação a irradiância, que conforme aumenta a irradiância eleva-se a potência. Esse fato é comprovado pela Equação 15, já que a corrente é proporcional a irradiância, sendo que a potência é proporcional a corrente pois a mesma é igual ao produto da tensão pela corrente, dessa forma, a potência também é proporcional a irradiância. Uma validação que foi feita a partir desses resultados foi observar os gráficos do *datasheets* e comparar com os gráficos obtidos, dessa forma, concluindo se os gráficos gerados estão corretos. Um exemplo apresentado na Figura 22 é do módulo Canadian CS7N-650MB-AG.

Figura 22 - Curva característica do módulo da Canadian apresentado pelo *datasheet*



Fonte: Autoria própria (2022)

Observando as Figuras 6 e 10 é percebido que os resultados foram muito semelhantes, tanto em comportamento quanto em valores absolutos, entretanto não é possível afirmar que atingiu os mesmos valores já que o *datasheet* não apresenta esses valores em uma tabela.

A partir dos resultados obtidos é notado que temperatura e irradiância em conjunto causam grandes impactos na obtenção da potência de um sistema fotovoltaico. Tendo em vista, um estudo para melhorar o aproveitamento da potência é alterar a inclinação do ângulo para obter o melhor desempenho do módulo fotovoltaico. Entretanto, mudar o ângulo todos os dias para atingir as melhores radiações possíveis no dia é inviável para sistemas de baixa potência, já que é muito caro esse processo e demanda a energia para operar, já que os seguidores do sol possuem um valor elevado, assim elevando as despesas de capital (CAPEX - *capital expenditure*). Uma solução possível é determinar um ótimo ângulo por um período de tempo para a máxima de irradiação. É feito uma estimativa da irradiação solar na maior parte das realizações práticas solares que é determinada baseando-se no padrão atmosférico. O ângulo de inclinação pode ser definido como o ângulo entre a superfície do horizonte e coletor. Foi considerado uma radiação extraterrestre total diária que é captada numa

superfície que está para sul, e com isso gerando um ângulo β devido a inclinação do horizonte e dessa forma a radiação diária pode expressa pela Equação 16 (NAZMUL, 2018).

$$I_d = \frac{24}{\pi} S_{constant} \left[1 + 0,034 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right] [\cos(\varnothing - \beta) \cos(\delta) \text{sen}(h_{ss}) + h_{ss} \text{sen}(\varnothing - \beta) \text{sen}(\delta)] \quad (16)$$

Sabendo que radiação solar total diária da superfície inclinada depende dos seguintes parâmetros.

$$\delta = -23,45 \cos\left((n + 10,5) \left(\frac{360}{365}\right)\right) \quad (17)$$

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \varnothing \tan \delta) \quad (18)$$

Onde os parâmetros são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros da inclinação de PV

Parâmetros das Equações (16), (17) e (18)	Nome dos Parâmetros das Equações
I_d	Radiação solar total diária da superfície inclinada
$S_{constant}$	Constante solar
δ	Declinação angular
h_{ss}	Ângulo do pôr do sol
\varnothing	Latitude do local
β	Ângulo de inclinação
n	Número de dias do ano

Fonte: Autoria própria (2022)

No mercado de painéis fotovoltaicos existe diversas tecnologias de módulos cada um com sua peculiaridade, de acordo com o Mahmoud que apresentou um trabalho no IEEE sobre as diferenças desses módulos fotovoltaicos, o módulo monocristalino tem a maior eficiência de conversão de todas as tecnologias fotovoltaicas comerciais, isso significa que está à frente dos tipos de módulo policristalino e de tecnologias de filmes finos como módulos feito de células de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS), células de Telureto de Cádmio (CdTe) e células silício amorfo (a-Si) (BAGHERITABAR, 2018). Este fato é evidenciado na Tabela 10 que relata aproximadamente capacidade de conversão de energia solar em elétrica.

Tabela 2 - Comparação da eficiência das células

Células	Eficiência
Monocristalino	26,7%
Policristalino	22,3%
CIGS	21,7%
CdTe	21%
a-Si	10,2%

Fonte: Autoria própria (2022)

A alta eficiência do módulo monocristalino é atribuível à falta de locais de recombinação no cristal único e melhor absorção de fótons devido à sua cor preta em comparação com a tonalidade azul característica do policristalino (BAGHERITABAR, 2018).

Todas essas composições possuem de células mostradas na Tabela 10 possuem um tipo de célula, que podem ser *P-type* ou *N-type*. O fator que difere o tipo é o processo de dopagem (Difusão ou implantação de íons) na fabricação do lingote com o qual os *wafers* são fabricados. Os *wafers* são uma fina fatia de material semiconductor que serão transformadas em células fotovoltaicas (MACDONALD, 2012).

Segundo a IEC 60904 valor máximo da eficiência de um módulo em STC é caracterizado pela Equação 19.

$$\eta = \frac{P_0}{E A_c} \quad (19)$$

Sendo que os parâmetros da Equação 19 são mostradas pela Tabela 11.

Tabela 31 - Parâmetros da eficiência PV

Símbolos da Equação 19	Nome dos Parâmetros
η	Eficiência
P_0	Potência de saída
E	Irradiância
A_c	Área do coletor

Fonte: Autoria própria (2022)

Utilizando a Equação 19 é possível descobrir a eficiência dos módulos um exemplo que será validado é do módulo PV-MF165EB3. Dessa forma, usa-se os dados fornecidos pelo datasheet para encontrar a eficiência do painel, conforme é mostrado na Equação 20.

$$\eta = \frac{P_0}{E A_c} = 100 \cdot \frac{165}{1000 \cdot 1580 \cdot 800 \cdot 10^{-6}} = 13,1\% \quad (20)$$

Esse valor representado da Equação 20 foi multiplicado por 100 para que represente em porcentagem a sua eficiência. O resultado encontrado de 13,1% é o mesmo encontrado no datasheet do fabricante do módulo, isto significa que a equação utilizada que rege o comportamento de eficiência é válida para essa análise. Empregando o algoritmo de simulação para obter a potência de saída nas mesmas condições que usado para o cálculo da eficiência. Dessa forma, mudando apenas a potência de saída conforme é expressado pela Equação 21.

$$\eta = \frac{P_0}{E A_c} = 100 \cdot \frac{178}{1000 \cdot 1580 \cdot 800 \cdot 10^{-6}} = 14,1\% \quad (21)$$

É notado que existe uma diferença de 1,0% entre os cálculos da eficiência o que representa 7% de acréscimo da Equação 21 para a Equação 20. Um dos possíveis motivos dessa diferença está relacionada após a fabricação do módulo, pois ocorre diversos ensaios e podem prejudicar. Um deles é o *flash test*, que coloca o módulo em condições de alto estresse com uma baixa e alta intensidade de irradiância e temperatura. Com finalidade de determinar sua classe de potência nominal, ocasionando uma degradação decorrente. Dessa forma, é uma perda de desempenho do painel fotovoltaico, essa perda é conhecida como *LID (Light Induced Degradation)* que surge nas primeiras horas de exposição do sol. A perda LID tem correlação também com a qualidade de fabricação do wafer (MOTTA, 2017). Outra degradação que ocorre no módulo fotovoltaico estudado é relacionada ao efeito de dopagem que ocorre com o elemento Boro, e isso significa que o contato com o boro com o oxigênio faz com que tenha uma degradação contínua (CANAL SOLAR, 2022).

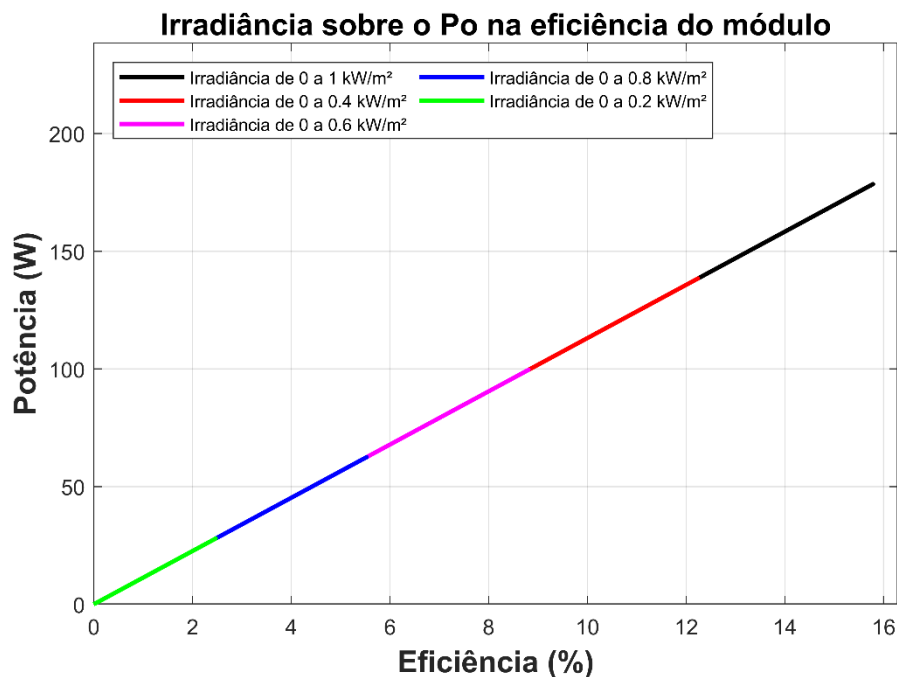
Para a validação dos resultados gerados é feito o estudo da eficiência do módulo SQ80, que possui características diferentes ao estudo anteriormente. Assim como a Equação 21, a Equação 22 também está na condição STC, e demonstra a eficiência do módulo a partir da potência de saída, irradiância e área do coletor.

$$\eta = \frac{P_0}{E A_c} = 100 \cdot \frac{62}{1000 \cdot 1200 \cdot 527 \cdot 10^{-6}} = 9,8\% \quad (22)$$

O datasheet da placa fotovoltaica expressa uma eficiência de 12,7% o que representa uma diferença de 2,9% ao mostrado na Equação 22. Essa diferença é justificada devido ao fabricante considerar diversas perdas que não foram considerados na Equação 22, como o LID e o LETID.

Observando apenas a Equação 19 é visto que a eficiência é inversamente proporcional a potência de saída, entretanto este fato não está correto, já que a corrente fotogerada aumenta conforme a irradiância isso foi evidenciado pela Equação 15, e, ilustrado pela Figura 23.

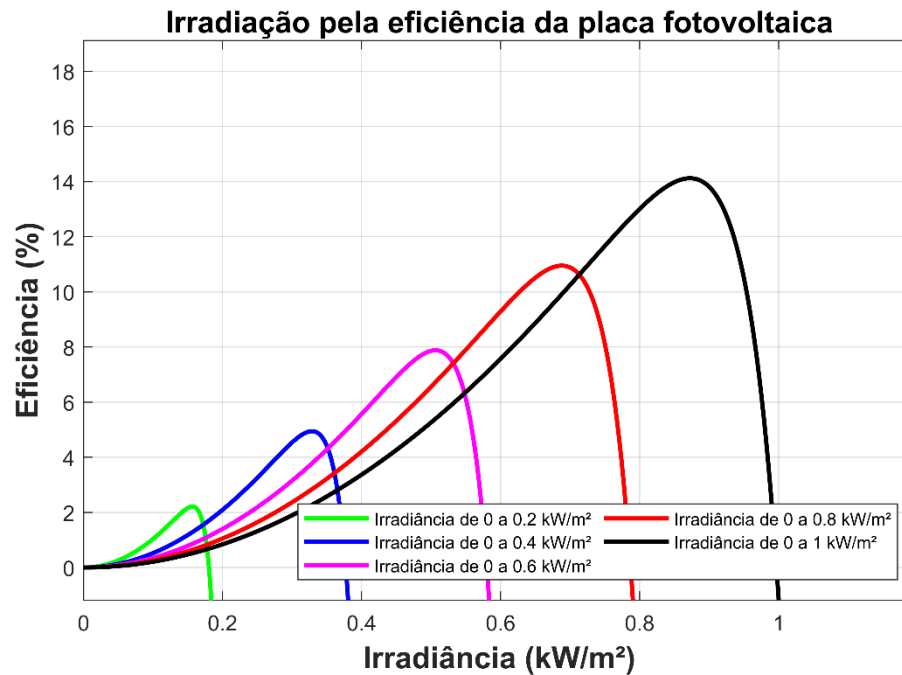
Figura 23 - Curva característica da potência de PV variando a irradiação (Modelo PV-MF165EB3)



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 23 ratifica que a eficiência é proporcional a potência de saída e a irradiância e também mostra a curva característica da eficiência sobre a potência. Outro gráfico importante é a curva característica da eficiência sobre a potência para enfatizar e compreender como o comportamento do módulo fotovoltaico, que é representado pela Figura 24.

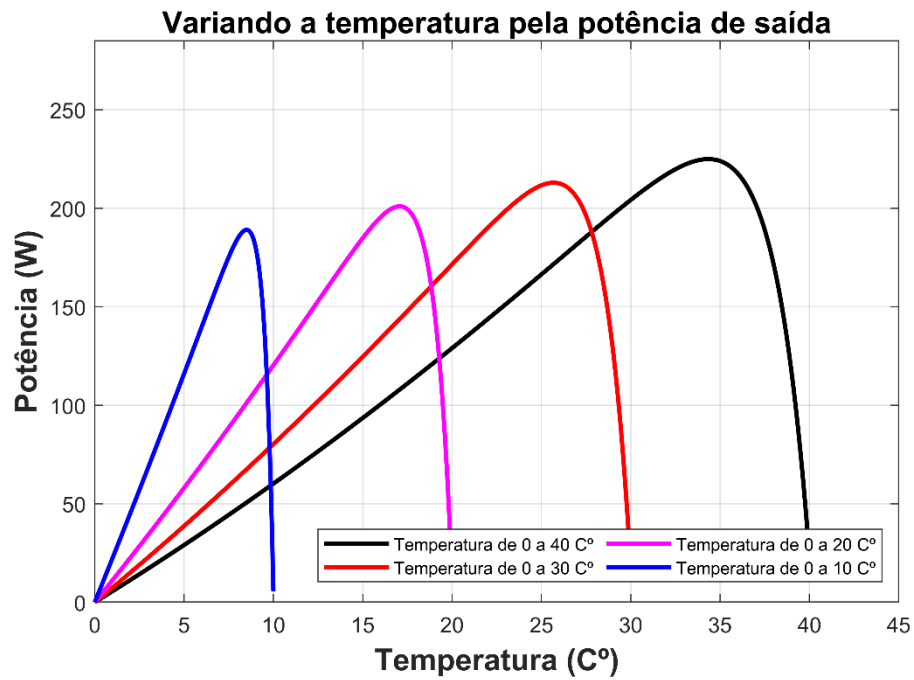
Figura 24 - Curva característica da irradiância sobre a eficiência (Modelo PV-MF165EB3)



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com a Figura 24 é notado que a eficiência máxima do módulo chegou a 14,1% que é o mesmo valor encontrado a partir da Equação 21. Como a potência de saída do painel fotovoltaico é influenciada com a temperatura e isso foi evidenciado pelas Figuras 13 a 17, entretanto foram gráficos com temperaturas fixas e o que ocorre na prática são módulos que se enquadram em temperaturas variadas, e este fenômeno é demonstrado através da Figura 25.

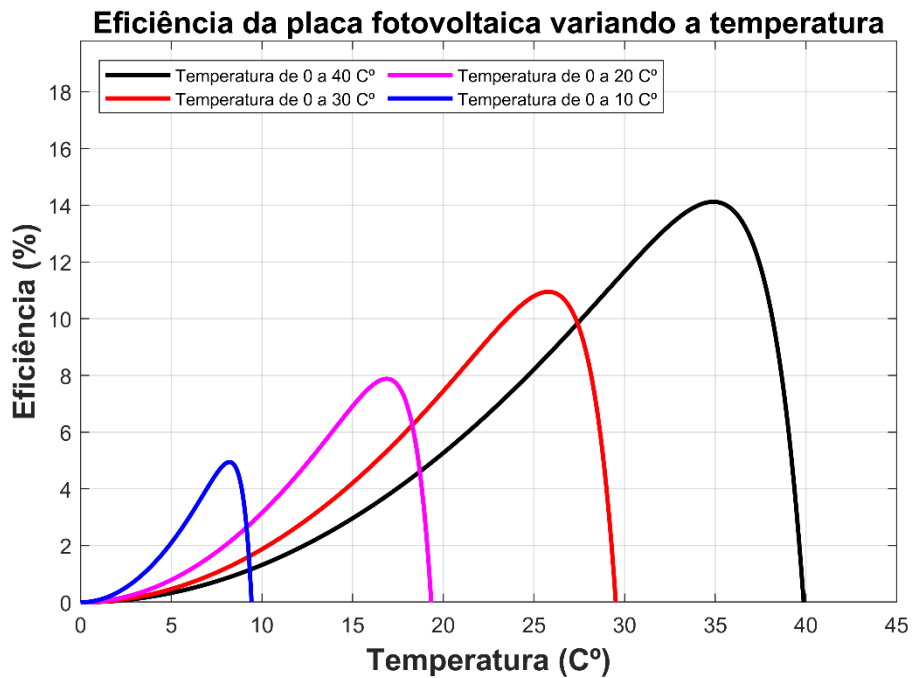
Figura 25 - Curva característica da potência do PV sobre a influência da temperatura (Modelo PV-MF165EB3)



Fonte: Autoria própria (2022)

Vale ressaltar que para a Figura 25 foi mantido a irradiância de $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ para ter uma comparação mais fidedigna as Figuras 23 e 24. Outro resultado atrelado a Figura 25 é a Figura 26 que possui a finalidade de observar o comportamento da eficiência do PV sofrendo variações na temperatura.

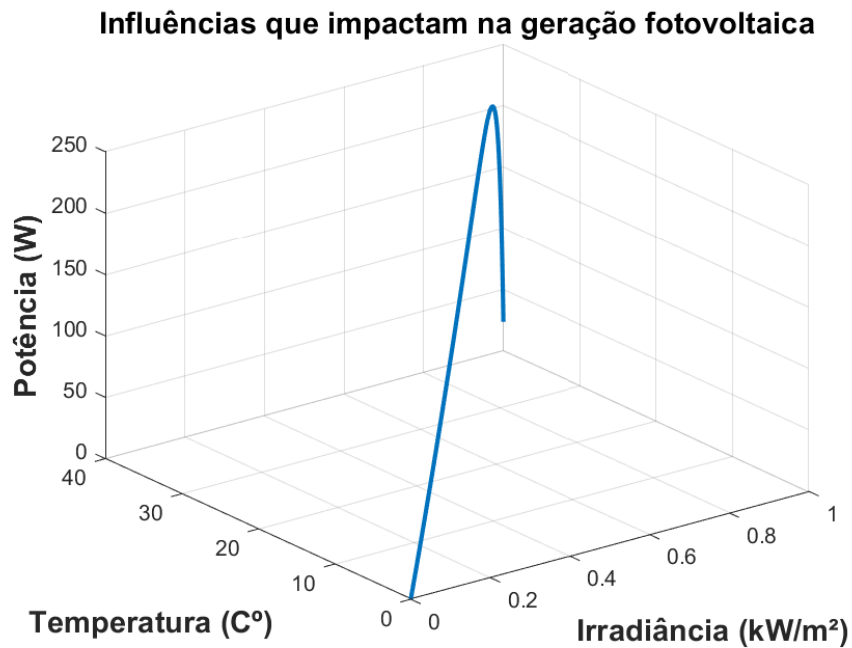
Figura 26 - Curva característica da eficiência do PV sobre a influência da temperatura (Modelo PV-MF165EB3)



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 26 também foi mantido o padrão de irradiância a $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ e, com isso, é notado que para todas as Figuras mostradas anteriormente foi constatado que a eficiência máxima chegou a 14,1%, que calculado e demonstrado pela Equação 21, assim, um gráfico que compõe o comportamento do sistema do diodo único em três dimensões sendo elas potência, temperatura da célula e irradiância é representado pela Figura 27, que foi demonstrado com uma variação de temperatura de 0 a 40 C° e uma irradiação variando de 0 até $1 \text{ kW}/\text{m}^2$.

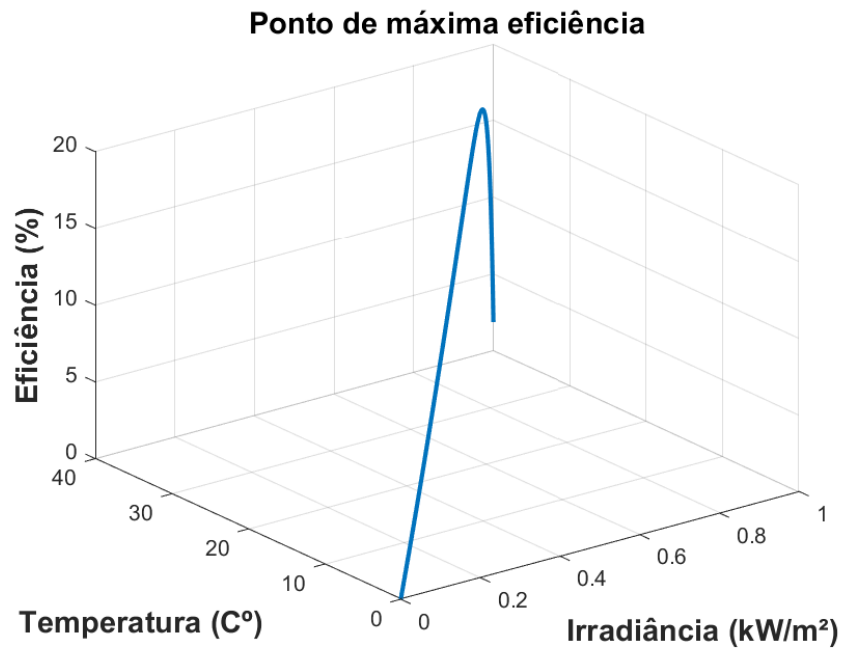
Figura 27 - Curva característica em três dimensões do PV evidenciando a potência de saída (Modelo PV-MF165EB3)



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da Figura 27 é notado que tanto a temperatura da célula quanto a irradiância impacta demasiadamente na potência de saída do módulo e através desse gráfico foi possível observar ratificar o comportamento da potência de saída através dessas variáveis. Um fator importante para entender como a eficiência aumenta de acordo com as suas variáveis é através da Figura 28, pois é um gráfico que varia a temperatura da célula e irradiância igualmente a Figura 27, entretanto, mudando o eixo z para a eficiência com a finalidade de captar o máximo ponto de eficiência de um módulo fotovoltaico.

Figura 28 - Curva característica em três dimensões do PV evidenciando a sua eficiência (Modelo PV-MF165EB3)



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir das Figuras 27 e 28 é possível compreender e analisar como é o comportamento de um módulo fotovoltaico, além de notar que o sistema do diodo único e o cálculo de eficiência estão validados, pois os dados do fabricante acarretaram em informações muito semelhantes ou até mesmo iguais, essas informações podem ser validadas através dos *datasheet* dos módulos.

4 PROPOSTA DE MAXIMIZAÇÃO DO GANHO ENERGÉTICO

De acordo com a ANEEL, os consumidores brasileiros podem gerar eletricidade por meio de energia renovável ou cogeração qualificada e até mesmo fornecer o excedente de eletricidade à rede de distribuição local. Esta é a geração de energia elétrica micro e minigeração distribuídos, essa inovação possibilita combinar economia financeira, consciência social e ambiental e desenvolvimento autossustentável. Os benefícios potenciais que esse modelo pode proporcionar ao sistema elétrico justificam os incentivos à geração distribuída. Isso inclui postergação de investimentos na expansão do sistema de transmissão e distribuição, baixo impacto ambiental, minimização de perdas, redução da carga da rede e diversificação da matriz energética (LAMIN, 2022).

4.1 Objetivos alcançados

Segundo a CRESESB (Centro de Referência em Energia Eólica e Solar), o desempenho das células fotovoltaicas é afetado pela irradiância incidente e sua distribuição espectral, e também pela temperatura de operação. Na condição de radiação solar concentrada, isso significa que um equipamento óptico, que é necessário para obter um nível de irradiância superior ao natural, entretanto para esse caso a temperatura precisa ser controlada, a eficiência da célula fotovoltaica pode ser melhorada. No caso de alta irradiância, se a célula fotovoltaica não for projetada para essas condições, a resistência em série se tornará um fator que poderá reduzir a eficiência. Outro fator que influencia é quando o valor da radiação solar é baixo, e desse modo, a resistência paralela pode reduzir ainda mais a energia gerada.

No Capítulo 3 é denotado como o sistema fotovoltaico sofre diversas influências pelo meio. Na Equação 15 deixa notório como a temperatura e a radiação afeta a eficiência dos módulos fotovoltaicos, e a partir dos equacionamentos que foram apresentados foi possível encontrar o comportamento de diversas placas fotovoltaicas para visualizar esses impactos. Dessa forma, conclui-se que conforme maior irradiância aumenta a eficácia do sistema e com o aumento da temperatura o rendimento do módulo fotovoltaico diminui. Ainda no mesmo capítulo, é proposto um método para melhorar eficiência do sistema fotovoltaico alterando o ângulo de

inclinação dos painéis fotovoltaicos para obter a melhor eficiência dentro de um determinado período de tempo.

4.2 Cálculo do V_{oc}

O estudo da tensão de circuito aberto é realizado com o objetivo de determinar a quantidade máxima de módulos por *string* que é possível inserir nos arranjos de um sistema fotovoltaico, em outras palavras é o número máximo de *strings* que passam pelos módulos em um sistema que gera energia solar.

Este cálculo visa aproveitar o máximo que o inversor pode suportar, pois aumenta a potência CC, já que é inserido mais placas fotovoltaicas, e dessa maneira, eleva-se produção de energia. Mesmo que mantenha a mesma quantidade de inversores haverá um aumento na relação CC/CA, isso significa, um aumento de produção de energia, entretanto ocasiona perdas por efeito limitador de potência (*clippings*), o que diminui a produção de energia, logo é necessário um estudo para determinar um ponto ótimo para aumentar a produção de energia. Vale ressaltar que em muitos inversores existe um limite para essa relação CC/CA, logo o ideal é confirmar com o fabricante o quanto o inversor pode trabalhar com segurança, pois esse parâmetro pode variar para cada modelo. Outra maneira de se aproveitar desse estudo é aumentar o número de inversores, que abaixa um pouco a relação CC/CA, mas aumenta o valor limitante do inversor, e dessa maneira é possível produzir mais energia.

Essa análise utiliza-se dados da série histórica do local (Dados da irradiância e temperatura ambiente) que descreve o perfil meteorológico e solarimétrico do local. Esses dados são adquiridos por dados de satélite através do NSRDB (National Solar Radiation Database), e são utilizados para descobrir a temperatura da célula, e posteriormente a tensão de circuito aberto. A Equação 23 relata o comportamento da temperatura da célula que é contemplada na base de estudo do *software* PVsyst que é um programa que simula arranjos fotovoltaicos (ROSS RG, 1980, 1986).

Todo sistema fotovoltaico é composto por uma configuração elétrica, com características do módulo, inversores, estrutura fixa ou seguidora (*Tracker*) e quantidade de *strings*. Para a montagem do sistema é necessário saber as quantidades relativas de cada elemento citado acima e suas combinações. Dessa

forma, é preciso determinar a quantidade módulos por inversor, módulos por *strings*, *strings* por inversor e a quantidade de inversores no sistema. O sistema dependendo da região pode diferenciar sua configuração elétrica, já que em determinadas regiões possuem condições ambientais diferentes, assim proporcionando potências mais elevadas ou menores.

O primeiro passo para esse estudo de otimização de um arranjo fotovoltaico é descobrir a temperatura do módulo fotovoltaico, e para isso, a Equação 23 descreve esse comportamento.

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot \left(G_{inc} \cdot \frac{1}{[1 - E_{fi}]} \right) \quad (23)$$

Onde os parâmetros da Equação 23 são encontrados na Tabela 12.

Tabela 42 - Parâmetros da temperatura da célula

Símbolos da Equação 23	Nome dos Parâmetros	Unidades
T_{cell}	Temperatura da célula	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C
$NOCT$	Temperatura nominal da célula de operação	°C
G_{inc}	Irradiância incidente do plano do módulo fotovoltaico	$W \cdot m^{-2}$
E_{fi}	Eficiência de conversão do módulo fotovoltaico	%

Fonte: Autoria própria (2022)

Para determinar a tensão de circuito aberto é necessário descobrir a corrente de saturação reversa do diodo, e seu equacionamento é demonstrado através da Equação 24.

$$I_0 = \frac{I_{stc}}{\frac{q \cdot V_{oc_{stc}}}{e \cdot n \cdot k \cdot T_{stc}} - 1} \quad (24)$$

Com isso, a tensão de circuito aberto é representada pela Equação 25.

$$V_{oc} = I_0 \cdot [1 + C_V] \cdot (T_{cell} - 25) \quad (25)$$

No sistema fotovoltaico é provável que ocorra oscilações que representam picos de V_{oc} dessa forma, é acrescido um fator de projeto para que o sistema tenha uma certa segurança. Com isso, a tensão de circuito aberto possui um valor máximo, que é mostrado na Equação 26 (GREEN, [s. d.]; RODRIGUES, 2011).

$$V_{oc_{max}} = V_{oc} * FP \quad (26)$$

As constantes e variáveis que determinam a tensão de circuito aberto máxima são definidas através da Tabela 13.

Tabela 53 - Parâmetros da tensão de circuito aberto

Simbologia	Nome dos Parâmetros para o V_{oc}	Unidades
I_0	Corrente de saturação de polarização reversa do diodo	A
I_{stc}	Corrente de curto-circuito	A
e	Número de Euler	Adimensional
q	Constante da carga elementar	C
k	Constante de Boltzmann	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot k^{-1}$
T_{stc}	Temperatura STC em K	K
C_V	Coefficiente de temperatura da tensão de circuito aberto	$K/^\circ C$
FP	Fator de segurança	Adimensional
$V_{oc_{stc}}$	Irradiância incidente do plano do módulo fotovoltaico	V
n	Eficiência de conversão do módulo fotovoltaico	Adimensional

Fonte: Autoria própria (2022)

Após descobrir o valor máximo que a tensão de circuito aberto pode chegar na entrada do inversor (V_{inv}) daquela região, descobre-se o valor máximo de módulos por strings (n_{mod}) que é estabelecido através da Equação 27.

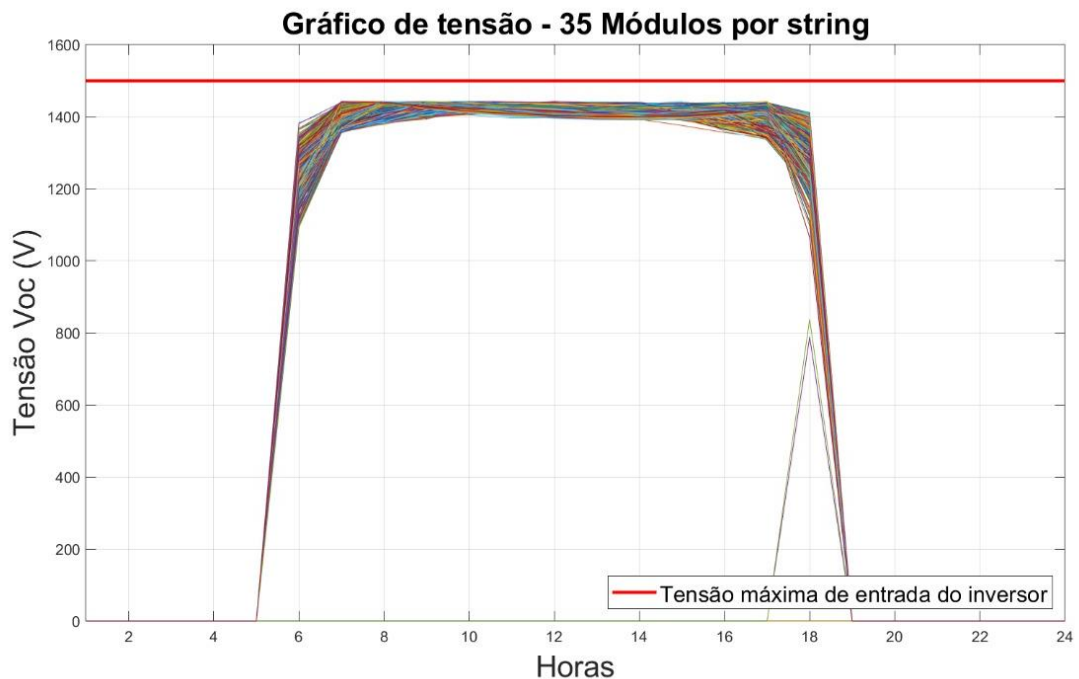
$$n_{mod} = \frac{V_{inv}}{V_{oc_{max}}} \quad (27)$$

É elaborado um estudo a partir de um algoritmo para o cálculo da temperatura do módulo e posteriormente, para definição do comprimento máximo da *string*. Em seguida é concretizado um comparativo graficamente a partir da tensão máxima de entrada e do valor máximo que a tensão de circuito aberto, e assim, é possível fazer uma análise mais crítica do número de módulos por *string* é possível inserir.

Para esse cálculo do V_{oc} foi utilizado o inversor SUN2000-215KTL-H3 e o módulo fotovoltaico da CS7N-650MB-AG, outro fato importante, é que os dados da série histórica foram na região do interior do Ceará, mas poderia ser qualquer outro lugar, assim como os equipamentos utilizados. Vale ressaltar que os dados baixados são totalmente de graça, entretanto são limitados na latitude -20° , ou seja, através dessa base de dados é possível baixar e em seguida gerar qualquer série histórica acima da latitude -20° . Com isso, utiliza-se a Equação 23 para descobrir a temperatura do módulo, e com isso, é possível obter a tensão de circuito aberto a partir da Equação 26, resultando em um $V_{oc_{max}} = 41,904$ V. O n_{mod} descobre-se através da Equação 27 que foi obtido 35 módulos por *string*.

Após descobrir esses parâmetros faz a multiplicação entre eles, do $V_{oc_{max}}$ com a quantidade de módulos por strings, que resulta na tensão de cada *string* (V_{string}). A tensão em cada *string* resultou em 1463,4 V. Esse valor não pode ultrapassar a tensão de entrada do inversor, pois caso ultrapassar poderá danificá-lo. A Figura 29 ilustra o comportamento desse estudo.

Figura 29 - Gráfico da tensão de cada *string* comparado com a tensão do inversor



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da Figura 29 é possível comparar os valores da V_{string} com a tensão máxima de entrada do inversor, que é representado no gráfico pela linha vermelha. Para cada dado horário da série histórica é plotado uma curva de V_{string} , assim, gerando diversas curvas diferentes, já que o clima está em constante mudança. Dessa forma, é possível definir com precisão os valores da V_{string} na região.

Outro fator importante é que nenhuma curva da V_{string} não atingiu o máximo da tensão máxima de entrada do inversor, que é representado pela linha vermelha. Contudo, conclui-se que é exequível os 35 módulos por *string* para garantir a máxima tensão no arranjo fotovoltaico sem danificar nenhum equipamento. Vale ressaltar que, tal quantidade de n_{mod} é admissível e específica para o local, não sendo recomendado utilizar a mesma quantidade para demais localidade sem análise prévia.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia solar é uma das energias mais visadas atualmente, por ser renovável e possuir uma fonte inesgotável, o Sol. Outro fator que a deixou mais atrativa foi em 2020, pois houve um crescimento de mais de 70% das instalações. Isso foi impulsionado pelas crises hídricas e consequente o aumento das tarifas.

Por esse motivo, é imprescindível buscar maneiras para melhorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos para acarretar a viabilidade econômica, bem como gerar otimização do espaço utilizado e aumentar a eficiência do processo de geração.

Dessa forma, busca-se maneiras efetivas de compreender o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, com a intenção de melhorar a geração e eficiência que é considerada baixa nos dias atuais. Nesse sentido, esse trabalho contempla os princípios da geração fotovoltaica, baseada no modelo do diodo único que é um dos mais utilizados atualmente, pela sua precisão e simplicidade.

Em relação ao sistema fotovoltaico foi feita a modelagem e o equacionamento do modelo do diodo único. Os resultados obtidos foram validados a partir de diversos *datasheets* de módulos fotovoltaicos, e se observou que os resultados obtidos possuem grande correlação com dados fornecido pelos fabricantes. Isso foi evidenciado a partir de gráficos de corrente, tensão, potência e eficiência. Além disso, foi relatado como são feitos os cálculos dessas variáveis.

Um dos fatores importantes abordados são maneiras de melhorar a eficiência energética, como a mudança do tipo de módulo empregado no sistema (Tipo N e Tipo P), inclinação da placa fotovoltaica e o estudo de tensão de circuito aberto que permite a alteração da configuração elétrica para atingir o limite suportado pelo inversor, assim resultando em uma geração de energia maior.

Por fim, pode-se dizer este trabalho de conclusão de curso atingiu seus objetivos além de relatar todos os resultados a partir de dados reais gerados através do software de simulação MATLAB.

REFERÊNCIAS

- BAGHERITABAR, M. **2018 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE 2018) : 3-5 de maio de 2018, Istambul, Turquia.**, 2018.
- CANAL SOLAR. **Células solares dos tipos P e N e os efeitos LID e LeTID.** 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/celulas-solares-dos-tipos-p-e-n-e-os-efeitos-lid-e-letid/>. Acesso em: 26 setembro 2022.
- ELECTRIC, Mitsubishi; MODULE, PV. **First volume production of solderless cells in Japan**, 2003.
- FALLIS, A. G. **MLU series photovoltaic modules. Journal of Chemical Information and Modeling.** 2013. Disponível em: http://www.mitsubishielectricsolar.com/images/uploads/documents/specs/MLU_spec_sheet_250W_255W.pdf. Acesso em: 08 setembro 2021.
- GREEN, M. A. **Solar Cells : Operating Principles, Technology and System Applications**, 1982.
- IN, Eneration. **Power Generation in Turkey : Prospects.** Europa Central. Fevereiro, p. 1–32, 1998.
- JEAN, P. **As muitas vantagens da célula N-Type.** 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/as-muitas-vantagens-da-celula-n-type/>. Acessado em: 10 agosto 2021.
- KYOCERA. **High-efficiency multi-crystal photovoltaic module KC200GT. PV datasheet**, 2009.
- LAMIN, H. **Micro e Mini Geração Distribuída.** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 11 fevereiro 2022.
- MACDONALD, D. The emergence of n-type silicon for solar cell manufacture. **Proceedings of the 50th Annual AuSES Conference (Solar 2012)**, 2012.
- MINHA CASA SOLAR - L&F COMÉRCIO, Projetos e Consultoria LTDA. **Inversor Solar: Tudo o que você precisa saber está aqui.** 2019. Disponível em: <http://blog.minhacasasolar.com.br/inversor-solar-tudo-o-que-voce-precisa-saber-esta-aqui/>. Acesso em: 10 agosto 2021.
- MOTTA, R. H. **Análise da influência de um Ano Típico Meteorológico na produção de energia de uma usina fotovoltaica.** p. 104, 2017.
- NAZMUL, R. B. Calculating Optimum Angle for Solar Panels of Dhaka, Bangladesh for Capturing Maximum Irradiation. **WIECON-ECE 2017 - IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering 2017**, no. December 2017, p.

25–28, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2017.8468880>.

PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014.

POWERMAX, The Shell; POWERMAX, Shell. **Shell PowerMax™ solar modules Shell PowerMax™ Ultra**, 2004.

RODRIGUES, E. M. G. **Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model**. 2011.

ROSS R. G. Flat-Plate Photovoltaic Array Design Optimization. **14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, 1980.

ROSS R. G. Flat-Plate Solar Array Project Final Report. , p. 86–31, 1986. .

SHONGWE, S.; HANIF, M. Comparative Analysis of Different Single-Diode PV Modeling Methods. **IEEE Journal of Photovoltaics**, vol. 5, n°0. 3, p. 938–946, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2395137>.

SAGAN, C. **Billions and Billions: Thoughts on Life and Death at the Brink of the Millennium**. Random House; First Edition. Nova Iorque, 1997.

SOUZA, R. di. **Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo**. 2019. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>. Acesso em: 14 agosto 2021.

VILLALVA, M. **O que são as células solares fotovoltaicas do tipo N?** 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/o-que-sao-as-celulas-solares-fotovoltaicas-do-tipo-n/>. Acesso em: 15 agosto 2021.