



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS RENAN ALVES

ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS *FULLCELL E*
HALFCELL

SOBRAL
2022

MATHEUS RENAN ALVES

ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
FULLCELL E HALFCELL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira

SOBRAL

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A48a Alves, Matheus Renan.
Análise das Tecnologias de Módulos Fotovoltaicos fullcell e halfcell / Matheus Renan Alves. – 2022.
65 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira.
1. Módulo Solar Fotovoltaico. 2. Módulo Halfcell. 3. Módulo Fullcell. 4. Comparativo Entre Tecnologias.
I. Título.

CDD 621.3

MATHEUS RENAN ALVES

ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
FULLCELL E HALFCELL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 01/12/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcus Rogerio de Castro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Eletricista Denisia de Vasconcelos Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*Dedico este trabalho
primeiramente a Deus e aos
meus pais que tanto me
incentivaram nesta jornada.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e coragem para enfrentar a vida acadêmica.

Aos meus pais Josimar e Elioneide pelo apoio e incentivo incondicionais, onde sem seu incentivo nada disso seria possível.

Aos companheiros de curso, que formaram uma segunda família, a quem devo meus momentos de alegria.

Agradeço à minha namorada Sarah por me apoiar desde o primeiro semestre com muito carinho e paciência.

Agradecimentos especiais ao meu orientador Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira, pelos ótimos ensinamentos.

RESUMO

Neste trabalho foi estudada a diferença entre as tecnologias de módulos fotovoltaicos *fullcell* e *halfcell* em três casos de sombreamento distintos. Para o estudo foi utilizado o ambiente de simulação Matlab Simulink, onde as equações matemáticas de uma célula fotovoltaica foram utilizadas para montar um módulo *fullcell* e um módulo *halfcell*. Foram escolhidos dois módulos comerciais da marca Resun, um deles sendo o módulo monocristalino Resun RS6S-M de 400Wp composto por 72 células com tecnologia *fullcell* e o módulo Resun RS6I-M de 400Wp monocristalino composto por 144 células com tecnologia *halfcell*.

Os dois módulos foram escolhidos por serem de mesma marca, mesma potência, mesmas características do material semiconductor (silício monocristalino), tendo assim como diferença apenas a construção do módulo, características da célula fotovoltaica e tecnologia *fullcell* ou *halfcell*, proporcionando assim um comparativo o mais igualitário possível entre as duas tecnologias. Os modelos utilizados para representá-los mostraram boa precisão, tendo erro máximo de menos de 5% quando comparado aos dados do fabricante.

Ao se utilizar três casos de sombreamento, o módulo *halfcell* se mostrou mais eficiente, entregando para o caso 1, caso 2 e caso 3 respectivamente, 9,5%, 14,1% e 36,2% de potência a mais que o módulo *fullcell*.

Palavras-chaves: Módulo fotovoltaico, *halfcell*, *fullcell*, eficiência, sombreamento, comparativo.

ABSTRACT

In this work the difference between the fullcell and halfcell module technology was studied in three different shading cases. For this study, was used the Matlab Simulink simulation environment, where the mathematical equations of the photovoltaic cell were used for ride one fullcell module and one halfcell module. Two commercial modules from the Resun brand have been chosen, one was the monocrystalline 400Wp Resun RS6S-M, made of 72 photovoltaic cells with fullcell technology, and the other was the 400Wp monocrystalline Resun RS6I-M, made of 144 photovoltaic cells with the halfcell technology.

The two modules were chosen because they are from the same brand, same generation power and same semiconductor features (monocrystalline silicon), so, the difference between the modules are the construction, photovoltaic cell features, and fullcell or halfcell technology, providing a fair comparison between the two technologies. The chosen model presented a good precision, with a maximum error of 5% when compared with the manufacturer datasheet.

When the three cases of shading were studied, the halfcell module was more efficient, with 9,5%, 14,1% and 36,2% of more power when compared with the fullcell module for the case 1, case 2 and case 3.

Keywords: Photovoltaic module, halfcell, fullcell, efficiency, shading, comparison.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Evolução da Energia Solar Fotovoltaica | 17 |
| Figura 2 – Dopagem do silício do tipo n (à esquerda) e do tipo p (à direita) | 19 |
| Figura 3 - Demonstrativo da junção pn | 20 |
| Figura 4 – Demonstrativo do funcionamento da célula solar | 21 |
| Figura 5 – Construção da célula fotovoltaica | 21 |
| Figura 6 - Modelo Ideal | 22 |
| Figura 7 – Modelo de Um Diodo | 24 |
| Figura 8 – Modelo de Dois Diodos | 26 |
| Figura 9 – Componentes do Módulo Fotovoltaico | 28 |
| Figura 10 - Tecnologia Standard vs Tecnologia PERC | 29 |
| Figura 11 – Célula solar PERC convencional (a) vs Célula solar PERC bifacial (b) | 30 |
| Figura 12 – Módulo formado por células em série | 31 |
| Figura 13 – Curva IxV do módulo sem diodo bypass na região de polarização reversa..... | 32 |
| Figura 14 – Curvas PxV e IxV de módulo sem diodo bypass | 33 |
| Figura 15 - Módulo com sombreamento | 34 |
| Figura 16 - Curvas PxV e IxV em situação de sombreamento | 34 |
| Figura 17 – Módulo Fotovoltaico <i>fullcell</i> | 38 |
| Figura 18 - Módulo Fotovoltaico <i>halfcell</i> | 38 |
| Figura 19 - Simulação da Corrente Fotovoltaica, I_{ph} | 39 |
| Figura 20 - Simulação da Corrente de de Saturação Reversa..... | 40 |
| Figura 21 - Corrente de Saturação | 41 |
| Figura 22 - Corrente Shunt | 42 |
| Figura 23 - Corrente Característica do Diodo | 43 |
| Figura 24 - Corrente de Saída | 43 |
| Figura 25 - Simulação Física da Célula Fotovoltaica | 44 |
| Figura 26 – Comportamento do Algoritmo PeO | 45 |
| Figura 27 – Curvas de geração disponibilizadas pela fabricante Resun – Módulo <i>fullcell</i> | 46 |
| Figura 28 - Curvas de geração disponibilizadas pela fabricante Resun – Módulo <i>fullcell</i> | 47 |
| Figura 29 - Circuito Módulo <i>fullcell</i> | 48 |
| Figura 30 - Gráfico PxV – Várias Irradiâncias – <i>fullcell</i> | 48 |
| Figura 31 – Gráfico IxV – Várias Irradiâncias - <i>fullcell</i> | 49 |
| Figura 32 – Circuito Módulo <i>halfcell</i> | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 33 - Gráfico PxV – Várias Irradiâncias - <i>halfcell</i> | 50 |
| Figura 34 – Gráfico IxV – Várias Irradiâncias - <i>halfcell</i> | 50 |
| Figura 35 - Comportamento do Diodo em Caso de Sombreamento..... | 55 |
| Figura 36 - Gráfico IxV - Casos de Sombreamento - <i>fullcell</i> | 56 |
| Figura 37 - Gráfico PxV - Casos de Sombreamento - <i>fullcell</i> | 57 |
| Figura 38 - Gráfico IxV - Casos de Sombreamento - <i>Halfcell</i> | 58 |
| Figura 39 - Gráfico PxV - Casos de Sombreamento - <i>Halfcell</i> | 58 |
| Figura 40 - Comparativo Potências Geradas em casos de Sombreamento | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Dados do módulo Resun RS6S-M 400Wp | 45 |
| Tabela 2 – Dados do módulo Resun RS6I-M | 46 |
| Tabela 3 - Resultados obtidos nas simulações para 1000W/m2 | 51 |
| Tabela 4 - Casos de sombreamento no módulo <i>fullcell</i> | 52 |
| Tabela 5 – Casos de sombreamento no módulo <i>halfcell</i> | 53 |
| Tabela 6 - Potências para os Casos de Sombreamento | 59 |
| Tabela 7 - Perda de Potência Percentual em relação à potência nominal de 400W | 60 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|------------------------------|
| MPPT | Maximum Power Point Tracker |
| MPP | Maximum Power Point |
| ISDM | Ideal Single Diode Model |
| SDM | Single Diode Model |
| DDM | Double Diode Model |
| DDP | Diferença de Potencial |
| PERC | Passivated Emitter Rear Cell |
| BSF | Back Surface Field |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1. Objetivos | 17 |
| 1.1.1. Objetivo Geral | 17 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos | 18 |
| 1.2. Estrutura do trabalho | 18 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 2.1. Construção da Célula Fotovoltaica | 19 |
| 2.2. Modelagem Matemática | 22 |
| 2.2.1. Modelo Empírico ou Ideal | 22 |
| 2.2.2. Modelo de Um Diodo | 24 |
| 2.2.3. Modelo de Dois Diodos | 26 |
| 2.3. Conceitos Iniciais – Módulos Fotovoltaicos | 27 |
| 2.4. Tecnologias para aumento da eficiência | 28 |
| 2.4.1. Tecnologia PERC | 28 |
| 2.4.2. Tecnologia Bifacial | 30 |
| 2.4.3. Tecnologia Diodos Bypass | 31 |
| 2.4.4. Tecnologia Half Cut Cell | 35 |
| 2.4.5. Módulo FullCell | 37 |
| 2.4.6. Módulo Fotovoltaico Half Cell | 38 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 39 |
| 3.1. Simulação Matemática da Célula Fotovoltaica | 39 |
| 3.1.1. Corrente Fotovoltaica I_{ph} | 39 |
| 3.1.2. Corrente de Saturação Reversa I_s | 40 |
| 3.1.3. Corrente de Saturação I_o | 41 |
| 3.1.4. Corrente shunt | 42 |
| 3.1.5. Corrente característica do diodo | 42 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1.6. | Corrente de Saída | 43 |
| 3.2. | Modelo da Célula Fotovoltaica | 44 |
| 3.2.1. | O Ponto de Máxima Potência | 44 |
| 3.3. | Simulação e Análise dos módulos <i>fullcell</i> e <i>halfcell</i> | 45 |
| 3.3.1. | Simulação do Módulo <i>fullcell</i> | 47 |
| 3.3.2. | Simulação do Módulo <i>halfcell</i> | 49 |
| 3.3.3. | Considerações dos Sistemas de Geração Comerciais | 51 |
| 3.4. | Simulações com Sombreamento | 52 |
| 3.4.1. | Casos de Sombreamento | 52 |
| 3.4.2. | Análise da Potência Gerada | 55 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 56 |
| 4.1. | Comparativo da potência gerada para os casos de sombreamento | 56 |
| 5. | CONCLUSÃO | 62 |
| 5.1. | Sugestões para trabalhos futuros | 62 |
| 6. | REFERÊNCIAS | 64 |

1. INTRODUÇÃO

Um dos indicativos do crescimento de uma nação é o seu consumo energético. O astrônomo soviético Nikolai Kardashev propôs em 1964 um método de mensurar o avanço de uma civilização em nível tecnológico. Chamada de Escala de Kardashev, este método toma como base o consumo e produção de energia para classificar sociedades em níveis, onde o nível I é dado à sociedade capaz de aproveitar toda a energia potencial de um planeta, o nível II à sociedade capaz de aproveitar toda a energia potencial de uma estrela, e o nível III à sociedade capaz de aproveitar toda a energia potencial de uma galáxia. (KARDASHEV, 1963).

Para a civilização de nível II, há o seguinte obstáculo: como capturar a energia de uma estrela?

Uma das respostas pode ser dada por Freeman Dyson, que propôs nos anos 60 a ideia das esferas de Dyson. Esta construção massiva seria responsável por envolver uma estrela e capturar a sua energia irradiada utilizando uma tecnologia bem conhecida: células fotovoltaicas.

Nos anos cinquenta as células solares passaram a ser reconhecidas como a fonte de potência mais efetiva para a alimentação de satélites e demais objetos em missão espacial, onde a empresa *Bell Laboratories* conseguiu aumentar a potência entregue pelas células de silício. Quando *Vanguard I* foi lançado em 1958, ele carregava consigo células de Si, que entregavam uma potência de 50 a 100mWp (ILES, 2001).

Desde então os satélites modernos tiveram uma enorme evolução nos sensores, câmeras e instrumentos de medição, proporcionando novas imagens e descobertas sobre o espaço, como o famoso Satélite James Webb (JWST). Claro que sua a sua alimentação não seria a mesma utilizada na *Vanguard*. James Webb utiliza um sistema instalado de 2kW, porém apenas 1kW é necessário para o seu funcionamento. (KENNEDY, 2022).

Fica evidente que a evolução de uma nação está intrinsecamente ligada ao avanço tecnológico, e conseqüentemente ao seu consumo energético. Junto ao consumo, a geração energética também deve estar em constante evolução. Uma das pautas mais atuais e importantes do assunto, é a geração de potência de forma sustentável. Sendo assim, além de aspectos socioeconômicos gerais, a análise das fontes energéticas de uma nação mostram diretamente o seu grau de avanço perante a sociedade.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022, o Brasil em 2022 consome um total de 497TWh, um valor 4.6% maior

que no ano anterior, tendo 181.6 GW de capacidade de geração instalada, dividida da seguinte forma:

- Hidroelétricas: 60,2%
- Termoelétricas: 23,5%
- Eólicas: 11,4%
- Solar: 2,6%
- Nuclear: 1,1%

Mesmo sendo uma pequena parcela da matriz energética brasileira, a energia solar é dada como algo inevitável para o futuro, visto a sua facilidade de instalação, preço acessível e quantidade de empresas ofertando o serviço.

Os modelos de geração de energia podem ser classificados como geração centralizada e geração distribuída.

A geração centralizada pode ser definida como o modelo onde poucas unidades geradoras de grande porte produzem energia para muitas pessoas. Já a geração distribuída é o modelo onde várias unidades geradoras produzem energia, sendo suficiente para o próprio consumo e distribuição na rede, com recompensa monetária para o caso da energia solar fotovoltaica.

A geração de energia solar fotovoltaica se encaixa do modelo de geração distribuída, visto que cada unidade consumidora se torna uma geradora de modo a suprir o próprio gasto energético. Na Figura 1 é mostrada a evolução da geração distribuída junto à geração centralizada. Nota-se que os dois modelos de geração energética estão em crescimento, porém a geração distribuída passa a ocupar uma porcentagem maior de crescimento com o decorrer dos anos.

Figura 1 - Evolução da Energia Solar Fotovoltaica



Fonte: (ENERGIA, 2022)

Sendo assim, é natural que a tecnologia de geração de energia fotovoltaica passe a receber mais atenção da população, empresas e cientistas. A evolução dos equipamentos e serviços aceleram o crescimento da matriz fotovoltaica brasileira, trazendo o futuro para mais perto do presente.

Portanto, é de suma importância que a evolução da tecnologia de geração de energia solar seja uma pauta importante no âmbito acadêmico, visto que a evolução da tecnologia empregada está intimamente ligada à diminuição dos custos de produção e consequentemente o barateamento do investimento necessário para usufruir da tecnologia.

Dessa forma uma das características negativas mais proeminentes da geração de energia fotovoltaica é bastante discutida entre pesquisadores e cientistas: a maximização da geração fotovoltaica utilizando a mesma área útil, ou seja o aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos. O fator que mais influencia a geração fotovoltaica é a iluminância, que pode ser comprometida por diversos fatores, onde um dos principais é o sombreamento. Por conta disso, diversos estudos estão sendo direcionados à essa característica, buscando otimizar a geração de energia mesmo em casos de sombreamento.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Utilizando ambiente de simulação matemática Matlab Simulink, as tecnologias de módulos *fullcell* e *halfcell* serão comparadas para diferentes casos de sombreamento, visando verificar a potência gerada por cada tecnologia de módulos fotovoltaicos *halfcell* em diferentes situações de sombreamento.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Simular os módulos *fullcell* e *halfcell* tomando como base a folha de dados (*datasheet*) de módulos comerciais;
- Obter as curvas de corrente por tensão (IxV) e potência por tensão (curva PxV);
- Analisar e avaliar o comportamento das duas tecnologias em caso de sombreamento.

1.2. Estrutura do trabalho

Neste trabalho foram apresentados o objetivo geral e os específicos para o desenvolvimento do projeto. Para o capítulo 2 foi reservada a fundamentação teórica do tema, tratando sobre a construção e modelagem matemática de uma célula fotovoltaica de silício. O capítulo 3 trata sobre os materiais e métodos utilizados para simulação das duas tecnologias em estudo no Matlab Simulink. O capítulo 4 é destinado aos resultados e discussões a respeito do comportamento dos módulos *fullcell* e *halfcell* em três casos de sombreamento. O estudo se finaliza no capítulo 5 que traz a conclusão dos resultados obtidos e sugere trabalhos em pesquisas futuras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Construção da Célula Fotovoltaica

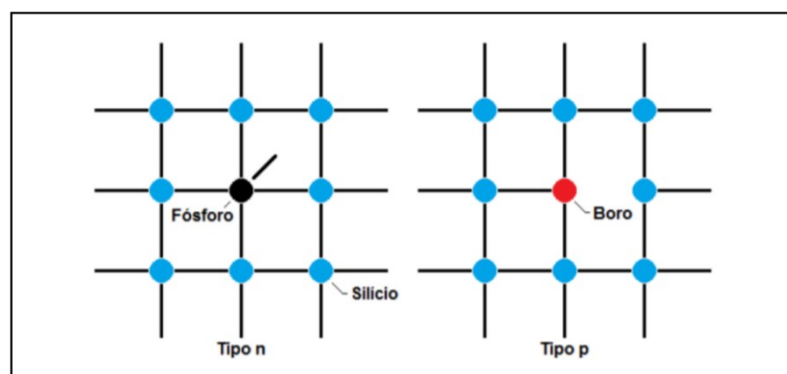
A célula fotovoltaica é o equipamento primordial da conversão de energia luminosa em energia elétrica. Para isso, é utilizado o efeito fotovoltaico, que é o fenômeno obtido quando se expõe um semicondutor dopado à frequência luminosa. Esse processo pode ser resumido em duas etapas:

1. Absorção da luz gerando uma lacuna do elétron;
2. Os elétrons são separados das lacunas pela estrutura da célula, ou seja, um terminal positivo e um negativo.

Quando uma carga é conectada aos terminais da célula, estes elétrons buscam as lacunas, gerando assim uma corrente elétrica.

Para que o efeito citado ocorra, é necessário que o semicondutor seja dopado com dois materiais: fósforo e boro. O fósforo possui cinco elétrons na última camada de valência, e o boro possui apenas três. Adicionando o fósforo ao silício, o material passa a ter um elétron livre, passando a ser conhecido como silício portador de cargas negativas (tipo n). Já com a dopagem por boro, o semicondutor passa a ter *déficit* de um elétron, ou seja uma lacuna (SAMPAIO, 2019). A Figura 2 mostra a estrutura do silício dopado, onde o material de tipo n possui um elétron a mais (à esquerda) e o material de tipo p um elétron a menos (à direita).

Figura 2 – Dopagem do silício do tipo n (à esquerda) e do tipo p (à direita)



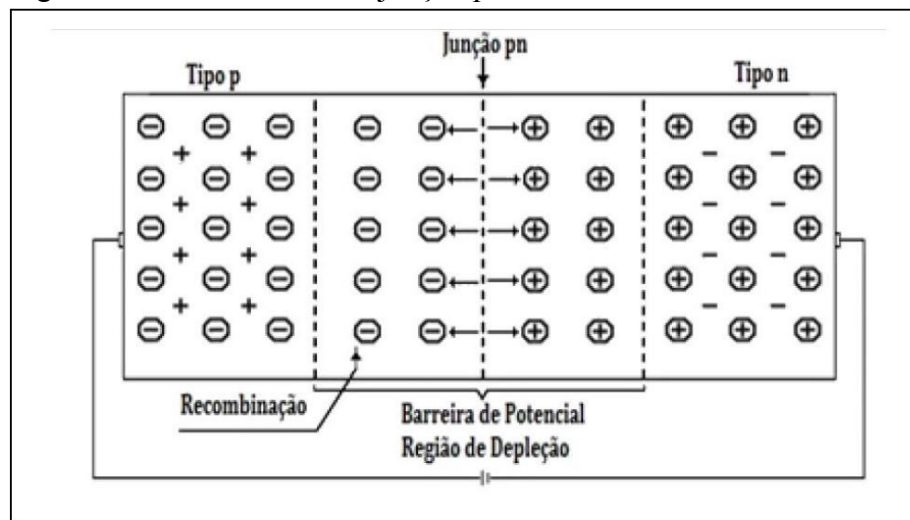
Fonte: (SAMPAIO, 2019)

Tendo as duas camadas com as características citadas, basta montar a estrutura para se obter uma célula solar. Essa estrutura é formada pela junção do silício tipo n e tipo p, formando assim a junção pn.

Como explicado em Sampaio (2019), é produzido um campo elétrico na estrutura provocado pela passagem de elétrons livres da camada tipo n para a do tipo p, que durante o trajeto são alocados nas lacunas, tornando-a eletricamente negativa, consequentemente a redução de elétrons no lado tipo n o torna eletricamente positivo. Quando esse processo atinge o equilíbrio, forma-se a zona de depleção, que interrompe a difusão de elétrons. Portanto, para que se forme o fluxo de elétrons, a célula tem que ser exposta a fótons que concedem energia necessária para que os elétrons do semiconductor tipo n se desloquem na direção do tipo p. O campo elétrico criado entre os diferentes materiais estabelece uma DDP (Diferença De Potencial) e uma corrente elétrica.

A união do silício tipo n e tipo p é responsável por separar elétrons e as lacunas, como pode ser visualizado na Figura 3, onde no lado tipo n se observa mais lacunas e no lado tipo p mais elétrons.

Figura 3 - Demonstrativo da junção pn

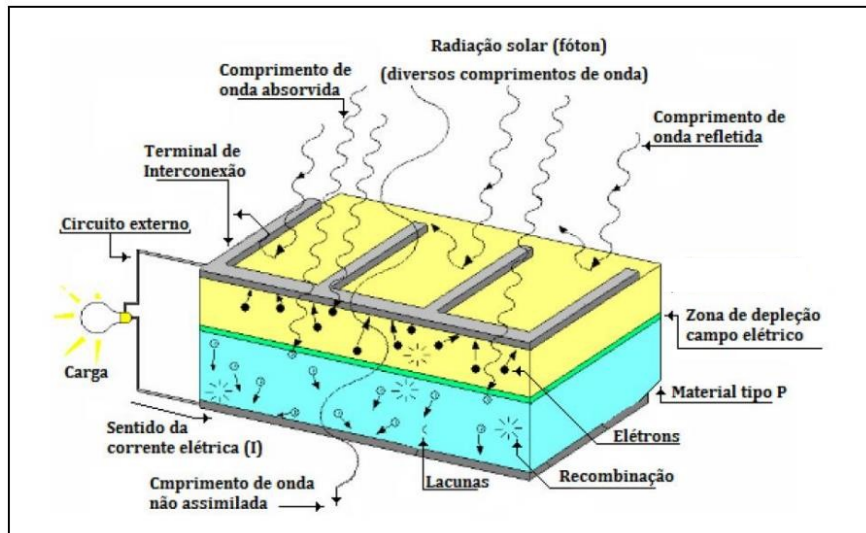


Fonte: (SAMPAIO, 2019)

Como citado anteriormente, quando há a presença de fótons na estrutura, haverá a separação dos elétrons e lacunas, gerando assim o efeito fotovoltaico, como pode ser visualizado na Figura 4, onde pode-se visualizar melhor a junção pn com o seu terminal de conexão, que ficará responsável por captar esses elétrons e formar a corrente elétrica. Além

disso, existem alguns pontos a serem notados, como os comprimentos de onda não refletidos e não assinalados.

Figura 4 – Demonstrativo do funcionamento da célula solar

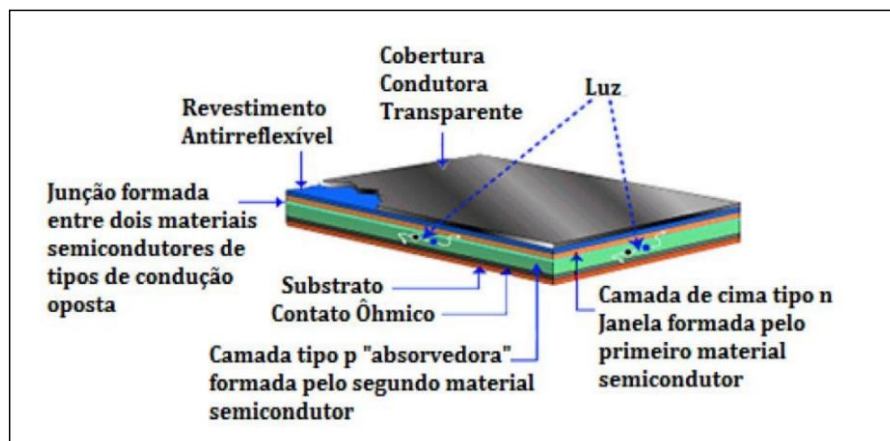


Fonte: (SAMPAIO, 2019)

Tendo por pressuposto que para a máxima eficiência da junção pn e consequentemente da célula fotovoltaica é necessário o máximo de recombinações possíveis, cada comprimento de onda que é refletido ou não assinalado ocasiona uma diminuição na eficiência daquele semicondutor. Pensando nisso, existem algumas técnicas que amenizam essa situação, como uma camada antirreflexo, e materiais refletivos colocados na traseira da célula.

Na Figura 5 pode-se visualizar a construção de uma célula fotovoltaica, que é composta pelas camadas de semicondutor tipo p e tipo n, revestimento antirreflexível, contatos que transmitem o fluxo de elétrons à carga ou equipamento e componentes estruturais:

Figura 5 – Construção da célula fotovoltaica



Fonte: (SAMPAIO, 2019)

2.2. Modelagem Matemática

Diante do conceito teórico exposto acima, pode-se estudar seu modelo matemático, que pode ser aplicado a simulações.

A representação matemática das células fotovoltaicas se dá por meio de modelos elétricos equivalentes. Os três principais modelos são:

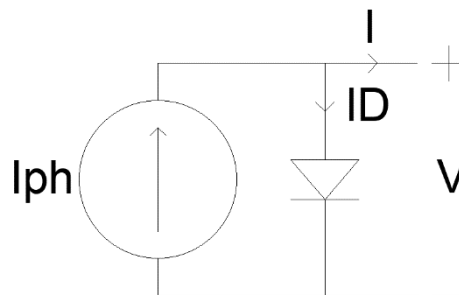
- Modelo Empírico ou Ideal (ISDM – *Ideal Single Diode Model*);
- Modelo de Um Diodo (SDM – *Single Diode Model*);
- Modelo de Dois Diodos (DDM – *Double Diode Model*).

2.2.1. Modelo Empírico ou Ideal

Dos três, o Modelo Empírico é o mais simples. Também pode ser chamado de ideal pois neste modelo não constam as perdas de potência. Alguns autores, como Luque (2011) descrevem as resistências em série e paralelo como resistências parasitas.

A representação matemática do circuito pode ser obtida pelas relações de *Kirchhoff*. Usando a Lei dos Nós na Figura 6, pode-se obter a relação da corrente do circuito, dado pela Equação (2.1):

Figura 6 - Modelo Ideal



Fonte: Autor

$$I = I_{ph} - I_D \quad (2.1)$$

Onde:

I: corrente da célula fotovoltaica (A);

I_{ph} : corrente fotovoltaica obtida por meio da radiação solar (A);

I_D : corresponde à equação de *Shockley* (A).

A Equação de Shockley caracteriza a polarização direta e reversa do diodo. Sendo dada na Equação (2.2):

$$I_{sk} = I_o \left[e^{\left(\frac{qV}{akT}\right)} - 1 \right] \quad (2.2)$$

Onde:

I_{sk} : corrente através da junção *pn* (A);

V: tensão da célula fotovoltaica (V);

k: constante de *Boltzmann* ($1,38064852 \cdot 10^{-23}$ J/K);

a: fator de idealidade;

I_o : corrente de saturação reversa (A);

q: carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-23}$) (J/K);

T: temperatura da junção *pn* (K).

Fator de Idealidade (a)

O fator de idealidade geralmente varia de 1 a 2, dependendo do processo de fabricação do semicondutor. Seu objetivo é simular matematicamente as junções imperfeitas em transistores reais. Em caso ideal, pode ser definido igual a 1.

Corrente de Saturação Reversa (I_o)

Como explicado por Pinho (2014), a corrente de saturação reversa do diodo pode ser calculada pela Equação (2.3):

$$I_o = q * A * n_i^2 * \left(\frac{D_p}{L_p * N_d} + \frac{D_n}{L_n * N_a} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

I_o : corrente de saturação reversa do diodo (A);

A: área da célula;

n_i : concentração de portadores intrínsecos do material;

N_d : concentração de dopantes tipo *n*;

N_a : concentração de dopantes tipo *p*;

D_p : coeficiente de difusão de lacunas no material;

D_n : coeficiente de difusão de elétrons do material;

L_p : comprimento de difusão de lacunas;
 L_n : comprimento de difusão de elétrons.

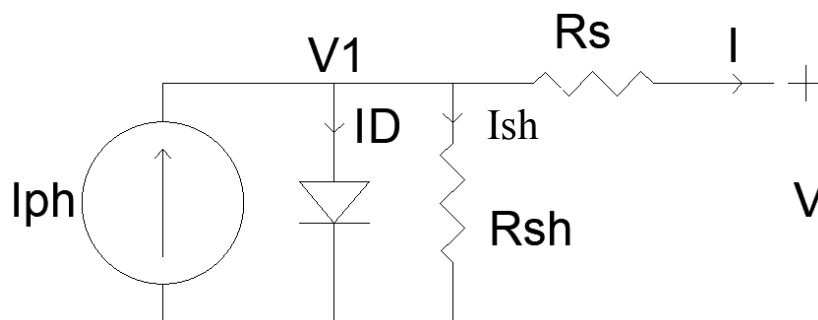
Segundo Sauthier (2019), quando a junção pn é polarizada inversamente, a largura da região de depleção aumenta, os portadores majoritários afastam-se da junção e não há fluxo de corrente, mas também existem pares de elétrons lacunas produzidos em função da temperatura. Se esses pares elétrons lacunas forem gerados nas proximidades da junção, haverá fluxo de corrente. Essa corrente, em geral, é muito pequena, na casa dos nanoamperes. Como essa corrente é devido aos portadores minoritários, que são fixos a uma dada temperatura, a corrente é quase constante, sendo chamada de corrente de saturação reversa.

Portanto, os portadores minoritários existem em função da temperatura, a corrente de saturação reversa não é afetada pela polarização reversa, porém é sensível às mudanças de temperatura.

2.2.2. Modelo de Um Diodo

Na construção dos módulos, as células fotovoltaicas não têm suas conexões realizadas de forma ideal. As imperfeições que causam perda de potência podem ser simuladas por meio de pequenas resistências. Na Figura 7 é apresentado o Modelo de Um diodo, onde essas pequenas resistências foram adicionadas.

Figura 7 – Modelo de Um Diodo



Fonte: Autor

A resistência *shunt*, R_{sh} , é usada para modelar a corrente de fuga, ou seja, caminhos alternativos que a corrente elétrica pode percorrer. Já a resistência série, R_s , modela as perdas internas causados pelo fluxo de corrente e conexões elétricas.

Usando as relações de *Kirchhoff* e a Figura 7, a relação da corrente de saída é obtida na equação (2.4):

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \quad (2.4)$$

Onde:

I: corrente gerada (A);

I_{ph} : corrente fotovoltaica (A);

I_D : corrente do diodo (A);

I_P : corrente obtida da modelagem das perdas elétricas (A).

Para o cálculo da corrente gerada no Modelo de Um Diodo, é necessário calcular a corrente de *Shockley*, que foi explicada anteriormente. Por conta das perdas, a nova tensão nos terminais do diodo pode ser calculada como mostra a equação (2.5), onde a tensão V_1 é a tensão aplicada aos terminais do diodo:

$$V_1 = I_P * R_S = V + R_S I \quad (2.5)$$

Substituindo (2.5) em (2.2), obtém-se:

$$I = I_0 \left[e^{\left(\frac{V + R_S I}{aV_t} \right)} - 1 \right] \quad (2.6)$$

Como mencionado anteriormente, a equação do diodo de *Shockley* depende, entre outros fatores, da tensão térmica (V_t). Como mencionado por Tabeling (2015), à temperatura ambiente (300K), V_t é de aproximadamente 25,85mV.

A corrente I_P é estabelecida pela seguinte relação em (2.7):

$$I_P = \frac{R_S * I + V}{R_{Sh}} \quad (2.7)$$

Substituindo as equações (2.6) e (2.7) na equação (2.4), temos:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + R_S I}{aV_t} \right)} - 1 \right] - \left[\frac{R_S * I + V}{R_{Sh}} \right] \quad (2.8)$$

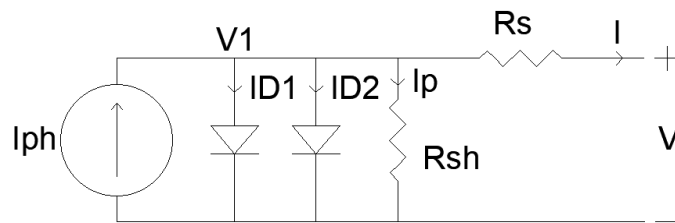
Onde:

I_{ph} : corrente fotovoltaica (A);
 I_o : corrente de saturação reversa (A);
 R_s : resistência em série modelada (Ω);
 R_{sh} : resistência *shunt* modelada (Ω).

2.2.3. Modelo de Dois Diodos

O Modelo de Dois Diodos é o modelo que representa a célula solar com mais acurácia, porém apresenta um número significativamente maior de parâmetros. O circuito elétrico pode ser visualizado na Figura 8. A adição de outro diodo modela a recombinação na região de carga espacial da junção.

Figura 8 – Modelo de Dois Diodos



Fonte: Autor

A corrente gerada pela célula é expressa por (2.9):

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_p \quad (2.9)$$

Os dois diodos são conectados ao mesmo ponto elétrico no circuito, portanto os seus parâmetros são os mesmos, com excessão do fator de idealidade (a) e a corrente de saturação reversa (I_o), que são variáveis em cada um dos diodos.

Como mencionado por Sauthier (2019), o segundo diodo modela as recombinações na região de cargas espaciais da junção *pn*, possuindo fator de idealidade $a \approx 2$. Sendo assim, temos a seguinte relação:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[e^{\left(\frac{V+R_S I}{a1V_t} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\left(\frac{V+R_S I}{a2V_t} \right)} - 1 \right] - \left[\frac{R_S * I + V}{R_{Sh}} \right] \quad (2.10)$$

Onde:

I : corrente gerada pela célula fotovoltaica (A);

I_{ph} : corrente fotovoltaica (A);

I_{o1} e I_{o2} : corrente de saturação do primeiro e segundo diodo;

a_1 e a_2 : fator de idealidade do primeiro e segundo diodo.

Sendo assim, é possível simular a célula fotovoltaica com precisão em um ambiente de simulação matemática, como o Matlab. No presente texto serão mostrados e comparados o resultados das simulações do modelo de um diodo, com o intuito de comparar as tecnologias *fullcell* e *halfcell*.

2.3. Conceitos Iniciais – Módulos Fotovoltaicos

Primeiramente, é importante saber alguns conceitos a respeito da nomenclatura envolvida no assunto:

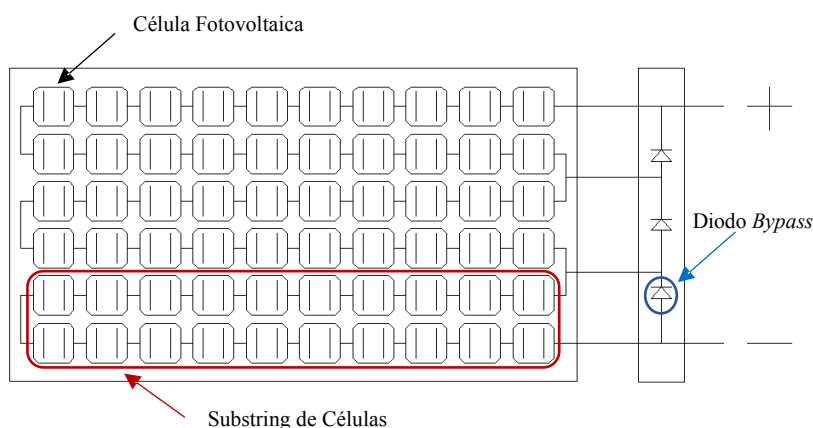
- Célula Fotovoltaica: unidade mais básica do sistema fotovoltaico. Pode ser visto como uma fonte de corrente controlada pela irradiação;
- Módulo Fotovoltaico: conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre si de forma a se obter maiores níveis de tensão ou corrente. Comercialmente os módulos fotovoltaicos trabalham com as células conectadas em série, de forma que se obtém altos níveis de tensão;
- Painel Fotovoltaico: definido como o conjunto de módulos fotovoltaicos conectados entre si. Em sistemas fotovoltaicos on-grid convencionais, essa conexão é feita em série. Porém há casos de sistemas off-grid, ou outros tipos de sistemas de alimentação elétrica por meio de energia solar que a conexão de painéis é feita em série e/ou paralelo, de modo a se obter maiores níveis de tensão e/ou corrente.

O módulo fotovoltaico é composto por camadas, onde cada uma oferece características importantes para o seu correto funcionamento e durabilidade.

Primeiramente tem-se as células fotovoltaicas, que são feitas de *wafers* de silício, que podem ser definidos como fatias extremamente finas do material. Estes *wafers* podem tanto ser monocristalinos quanto policristalinos. Os *wafers* policristalinos são facilmente encontrados no mercado, visto sua boa geração e custos de fabricação. Já os monocristalinos entregam mais eficiência ao sistema, porém com um custo maior de fabricação.

Para formar o módulo fotovoltaico, as células são conectadas em série, sendo formado uma *substring*, como pode ser visualizado dentro do círculo vermelho destacado na Figura 9:

Figura 9 – Componentes do Módulo Fotovoltaico



Fonte: Autor

Pode-se perceber que um módulo é formado por uma grande string de células. Essa string é dividida em *substrings*, que são conectadas aos diodos *bypass*, conceito esse que será explicado adiante.

Após a compreensão dos conceitos iniciais do módulo fotovoltaico, pode-se simulá-lo, como será explanado nos próximos tópicos.

Buscando amenizar a perda de potência ocasionada pelo sombreamento, os módulos fotovoltaicos comerciais utilizam algumas tecnologias que melhoram a eficiência. Dentre estas tecnologias pode-se citar:

- PERC;
- Bifacial;
- *Bypass*;
- *Half Cell*.

2.4. Tecnologias para aumento da eficiência

2.4.1. Tecnologia PERC

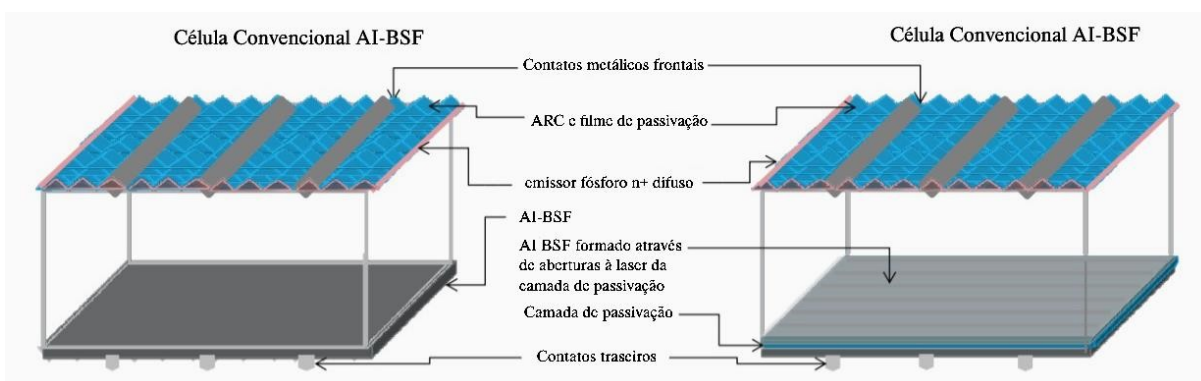
O custo de fabricação dos módulos fotovoltaicos diminuiu a cada ano. Um dos motivos que aceleram essa baixa de custos é o aprimoramento das tecnologias de fabricação. Um dos maiores custos na fabricação de uma célula fotovoltaica é a obtenção dos *wafers* de silício. Utilizando tecnologias mais avançadas é possível obter *wafers* com menor espessura, conseqüentemente se obtém mais *wafers* com menos matéria prima. A tecnologia PERC (Passivated Emitter Rear Cell) adiciona uma camada de passivação na parte traseira. Essa

camada permite o aprimoramento da eficiência de conversão de energia, por reduzir a velocidade da recombinação de elétrons na superfície do silício e adicionar um efeito óptico que permite a reflexão da luz no fundo da célula, ou seja, os raios solares passam mais vezes pelo silício, aprimorando assim a conversão de energia elétrica em energia fotovoltaica. De acordo com Chunduri (2016), a tecnologia PERC é uma promessa para o aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos, já que requer mudanças mínimas nos processos já existentes.

Como explicado por Chunduri (2016), a tecnologia PERC é um aprimoramento da arquitetura da camada de superfície traseira (*Back Surface Field, BSF*). As limitações da tecnologia BSF se tornam mais aparentes quanto mais a indústria foca no aprimoramento da eficiência de conversão de energia.

O filme metálico de alumínio aplicado na traseira da célula não é capaz de reduzir a velocidade de recombinação, ou seja, manter uma velocidade de recombinação abaixo de 200cm/s, além de uma considerável baixa taxa de reflexão da luz infravermelha (CHUNDURI, 2016). Como pode ser observado na Figura 10, a tecnologia PERC consiste apenas na adição de uma camada de passivação no fundo da célula. Essa camada diminui a velocidade de recombinação, e melhora a reflexão dos raios infravermelhos.

Figura 10 - Tecnologia Standard vs Tecnologia PERC



Fonte: (CHUNDURI, 2016)

A fabricante Trina Solar possui dois modelos de módulos fotovoltaicos que exemplificam a diferença de eficiência das duas tecnologias. O modelo Tallmax plus – TSM-DE14H 345 – 395Wp é uma série de modelos de módulos com células monocristalinas, disponibilizado a partir do ano de 2019. Sua eficiência atinge o valor máximo de 19,9%, de acordo com a fabricante Trina Solar.

Já o modelo Vertex TSM-DE19 535 – 555Wp, é um módulo *halfcell* que utiliza células com a tecnologia monocristalino e PERC, disponibilizado a partir de 2020, atingindo uma eficiência de até 21,2%.

2.4.2. Tecnologia Bifacial

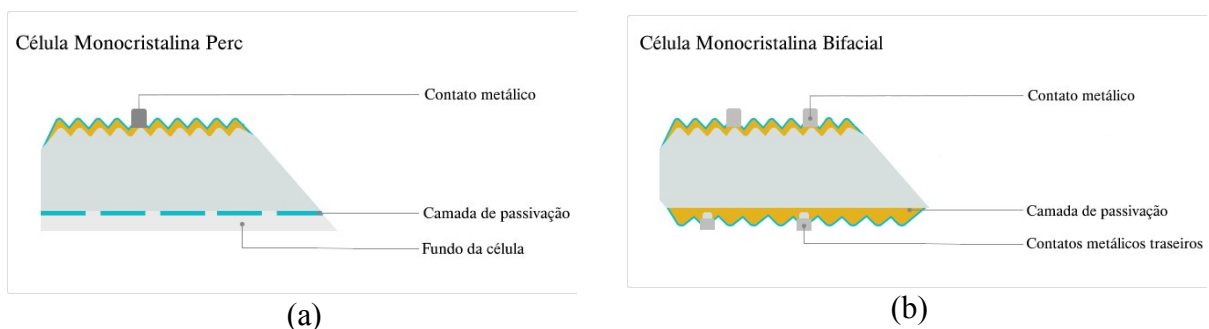
Módulos convencionais utilizam células que recebem luz de um lado – o que fica para cima na instalação, enquanto o outro lado é revestido com material metálico.

A tecnologia de módulos bifaciais busca aumentar a eficiência de geração utilizando células que recebem luz dos dois lados. Essa característica permite que o módulo fotovoltaico receba luz tanto do topo, quanto a luz refletida no amparo de baixo, seja o telhado ou solo.

Esta tecnologia é bastante utilizada em usinas de solo, pois a distância dos módulos para o chão é bem maior quando em comparação da distância dos módulos para o telhado. Sendo assim, a incidência de raios solares refletidos pelo solo que são reaproveitados é suficiente para aumentar a eficiência em até 30% (VILLALVA, 2019).

A fabricante Jinko disponibiliza em seu site uma página que explica a diferença na fabricação das duas células, como pode ser visualizado na Figura 11 (a) e Figura 11 (b). Na primeira pode-se visualizar uma célula PERC convencional, onde o fundo da célula é formado de um material metálico. Já na segunda, pode-se visualizar que na tecnologia bifacial o fundo da célula é formado por material transparente, que permite a passagem da luz refletida.

Figura 11 – Célula solar PERC convencional (a) vs Célula solar PERC bifacial (b)



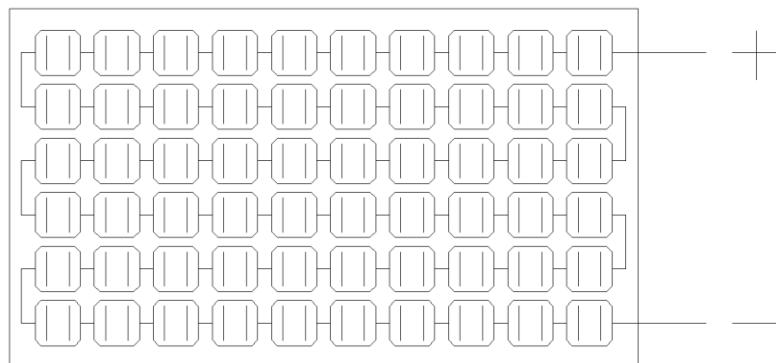
Fonte: (JINKO, 2022)

Como descrito no site da fabricante Jinko, com uma instalação há 1,2m do solo, 30° de angulação, sendo o solo pintado de branco, a tecnologia bifacial gera 19% mais potência quando comparado a um módulo monofacial nas mesmas condições.

2.4.3. Tecnologia Diodos Bypass

Nos módulos comerciais, as células fotovoltaicas são conectadas em série, formando assim uma fileira, ou como mais conhecido, *string*. Sendo assim, um módulo fotovoltaico simples é formado por uma grande *string* de células como visto na Figura 12:

Figura 12 – Módulo formado por células em série



Fonte: Autor

Essa string tem como tensão total o número de células multiplicado pela tensão de cada célula, de acordo com (2.11). Já a corrente é dada pela corrente de cada célula, em (2.12):

$$V = N_s * V_{ind} \quad (2.11)$$

$$I = I_{ind} \quad (2.12)$$

Onde:

V = tensão na *string* (V);

V_{ind} = tensão de cada célula (V);

I = corrente na *string* (A);

I_{ind} = corrente de cada célula (A);

N_s = número de células em série.

Tem-se então que a tensão da *string* é a tensão da célula multiplicada pelo número de células, enquanto que a corrente é igual em toda *string*, sendo igual à corrente das células.

Em caso de sombreamento, as células sombreadas passam a agir como cargas elétricas, dissipando potência na forma de calor. O efeito dessa polarização reversa é o

sobreaquecimento local, ou pontos quentes. Estes pontos quentes causam a degradação prematura da célula fotovoltaica, além da perda de geração.

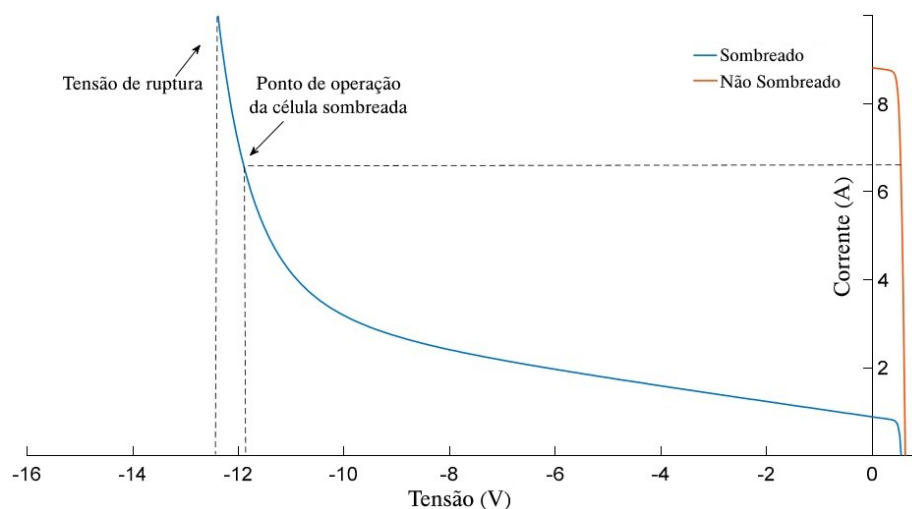
Esta situação ocorre quando a célula atinge a tensão de ruptura, que é definida como a tensão máxima reversa suportada pela junção p-n. (KIM, 2015).

A primeira consequência do sombreamento é a redução da potência gerada pelo sistema solar (VIEIRA, 2020). Sabendo da disposição em série das células fotovoltaicas em um módulo, em caso de sombreamento, mesmo que de apenas uma célula, perde-se quase que totalmente a potência gerada. Este efeito ocorre, pois as células fotovoltaicas podem ser consideradas como fontes de corrente, além disso, todas as células são conectadas em série. Assim, percebe-se que a corrente que circula nas substrings do módulo deve ser a mesma.

Sabendo que em caso de sombreamento as células fotovoltaicas passam a gerar menos corrente, em caso de sombreamento parcial, todas as células não sombreadas são obrigadas a carregar a mesma corrente gerada pelas células sombreadas. Ou seja, estas estão polarizadas inversamente. Segundo Ramaprabha (2011), as células sombreadas passam a agir como cargas elétricas. Consequentemente, como as células estão agindo como cargas elétricas, elas passam a aquecer, gerando os pontos quentes.

Na Figura 13 observa-se um exemplo de uma substring onde uma célula está polarizada inversamente. Uma célula sombreada que apresenta polarização reversa, sofre com uma taxa de crescimento muito elevada da tensão reversa, aumentando mais ainda a probabilidade de danos permanentes.

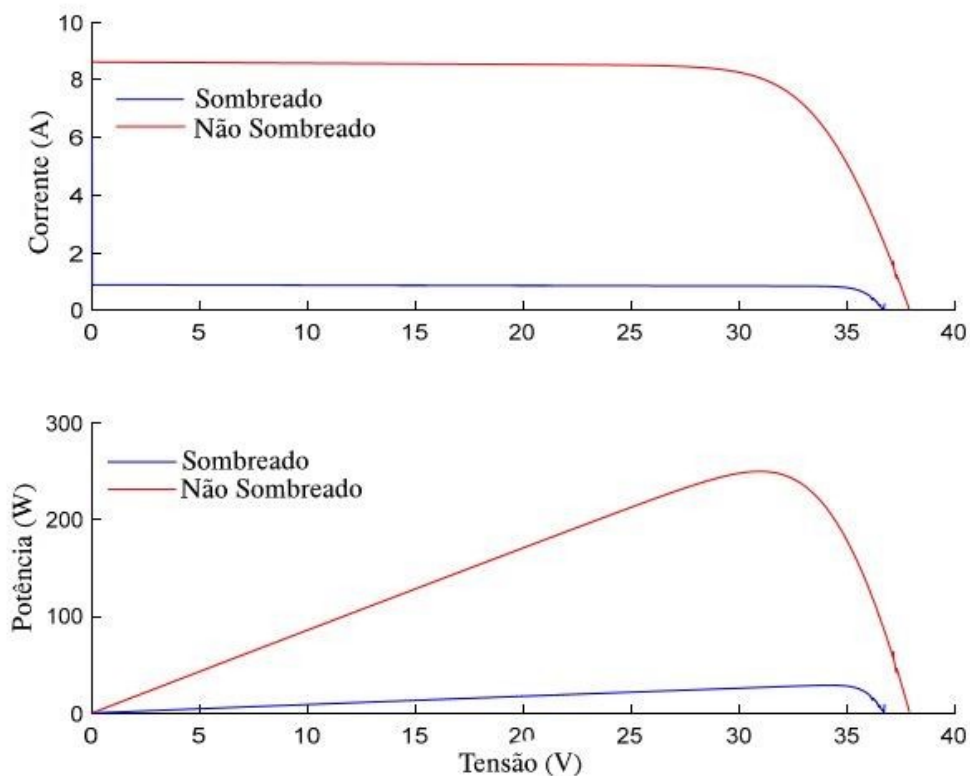
Figura 13 – Curva IxV do módulo sem diodo bypass na região de polarização reversa



Fonte: (VIEIRA, 2020)

Na Figura 14 pode-se observar a curva PxV e IxV do módulo sem diodo bypass. Verifica-se que a potência obtida quando há células sombreadas é 11% da potência obtida sem sombreamento. Além da perda de potência e diminuição da vida útil, outro ponto a ser considerado são os danos permanentes que podem ser causados caso se atinja a tensão de ruptura.

Figura 14 – Curvas PxV e IxV de módulo sem diodo bypass

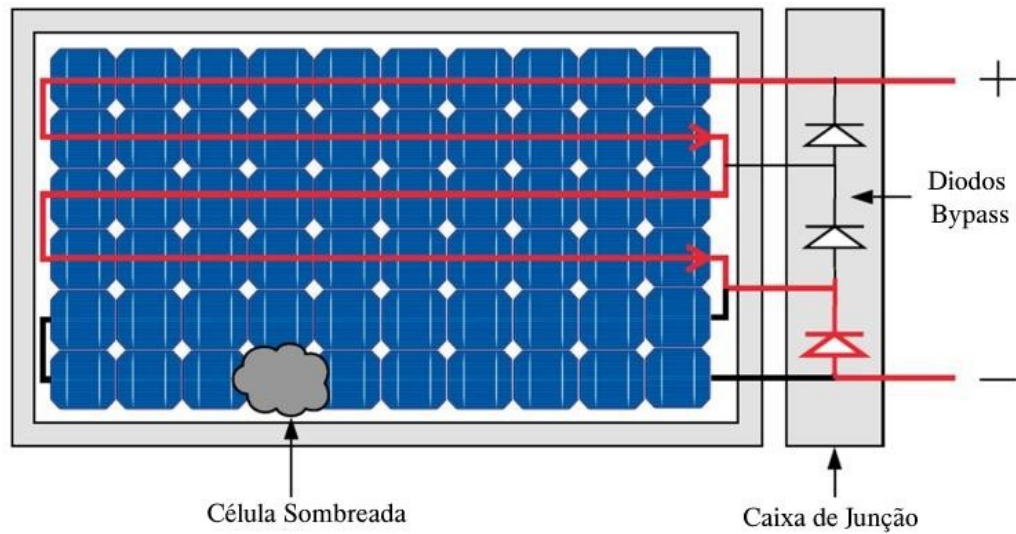


Fonte: (VIEIRA, 2020)

Buscando amenizar as perdas causadas pelo sombreamento, os módulos comerciais utilizam os diodos de passagem, popularmente conhecidos como *diodos bypass* conectados de forma anti-paralela. Em geral, são utilizados três diodos, conectados a uma substring. Na Figura 15 é mostrado um módulo fotovoltaico que contém os diodos bypass.

Em geral, os diodos são conectados a 60-72 células e ficam alocados na caixa de junção, localizada na parte traseira do módulo (VIEIRA, 2020). O seu funcionamento é bem simples. Caso alguma das células seja polarizada inversamente, o diodo será polarizado diretamente, oferecendo assim um novo caminho para a corrente, “pulando” a substring afetada pela sombra, conforme mostrado na Figura 15:

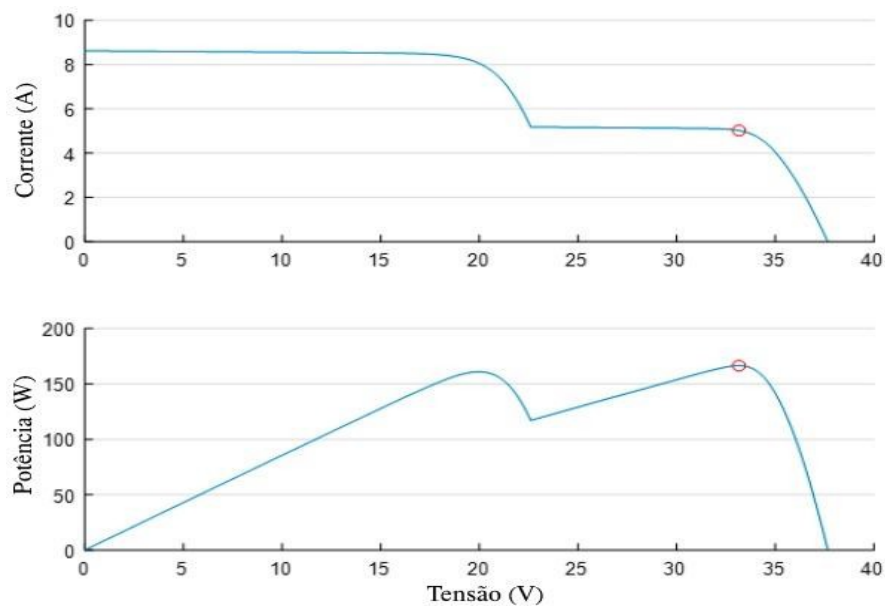
Figura 15 - Módulo com sombreamento



Fonte: (VIEIRA, 2020)

Com a utilização dos diodos *bypass* a perda de potência é menos prejudicial quando comparado à módulos sem esta tecnologia. Essa redução da perda de potência varia de acordo com vários fatores, pro isso um dos objetivos desse trabalho é aplicar fatores o mais próximos possível um do outro e analisar a redução da perda de potência entre as duas tecnologias. A Figura 16 apresenta as curvas P_xV e I_xV de um módulo fotovoltaico com diodos *bypass* em situação de sombreamento.

Figura 16 - Curvas P_xV e I_xV em situação de sombreamento



Fonte: (VIEIRA, 2020)

Comparando as Figura 14 e Figura 16, pode-se ver que a potência resultante do módulo com a tecnologia de diodo *bypass* é bastante superior em caso de sombreamento.

Porém, esta tecnologia gera pontos de máxima potência (Maximum Power Point - MPP) locais, que dificultam o trabalho do rastreador de máxima potência (Maximum Power Point Tracker – MPPT) de encontrar o máximo global.

2.4.4. Tecnologia Half Cut Cell

Complementando as tecnologias anteriores, as *half cut cells*, ou apenas *halfcells* são basicamente células comuns divididas no meio. Dentre as mudanças físicas que ocorrem durante este processo, pode-se citar duas principais: corrente e resistência. Segundo Guo (2013), as resistências de uma célula fotovoltaica são dadas por:

$$R_{tt} = R_c + R_r \quad (2.13)$$

Onde:

R_{tt} = resistência total de uma célula fotovoltaica;

R_c = resistência da célula;

R_r = resistência da faixa de conexão (*ribbon*).

Portanto, a resistência da célula *fullcell* é dada pela eq. (2.14), e a resistência da célula *halfcell* é dada pela eq. (2.15):

$$R_{tt}(full) = R_c(full) + R_r(full) \quad (2.14)$$

$$R_{tt}(half) = R_c(half) + R_r(half) \quad (2.15)$$

Onde, para as células *halfcell*, se têm metade da área, portanto a resistência da célula solar, R_c , que é inversamente proporcional à área, é dada por:

$$R_c(half) = 2R_c(full) \quad (2.16)$$

Já a resistência da faixa de conexão, R_r , é proporcional ao seu comprimento, portanto:

$$R_r(half) = \frac{1}{2}R_r(full) \quad (2.17)$$

Para a célula *halfcell*, a corrente gerada é metade da corrente gerada em uma célula *fullcell*, como visto na eq. (2.16):

$$I(half) = \frac{1}{2}I(full) \quad (2.18)$$

Como mostrado por Guo (2013):

$$R_c(full) = 1,3R_r(full) \quad (2.19)$$

Portanto, pode-se relacionar de forma simplificada a resistência total do módulo *full* e *halfcell*. Substituindo a eq. (2.16) e eq. (2.17) na eq. (2.15), obtém-se a eq. (2.20):

$$R_{tt}(half) = (2R_c(full) + \frac{1}{2}R_r(full)) \quad (2.20)$$

Substituindo a eq. (2.19) na eq. (2.20), obtém-se:

$$R_{tt}(half) = 2R_c(full) + \frac{1}{2,6}R_c(full) \quad (2.21)$$

Portanto, tem-se que:

$$R_{tt}(half) = 2,38R_c(full) \quad (2.21)$$

Sabendo que a potência dissipada (P) na célula fotovoltaica é dada pela equação da potência em relação à corrente (I) e resistência (R), como pode ser visto na eq. (2.22), que representa a forma genérica da equação citada:

$$P = I^2 * R \quad (2.22)$$

Para demonstrar a potência dissipada na célula *halfcell*, será utilizada a eq. (2.23):

$$P(half) = I(half)^2 * R(half) \quad (2.23)$$

Substituindo a eq. (2.18) e eq. (2.21) na eq. (2.23), tem-se que:

$$P(half) = \left(\frac{1}{2}I(full)\right)^2 * 2,38R_c(full) \quad (2.23)$$

Realizando os cálculos, pode-se ver que:

$$P(half) = \frac{1}{4}I^2(full) * 2,38R_c(full) \quad (2.24)$$

$$P(half) = 0,6 * I^2(full) * R_c(full) \quad (2.25)$$

$$P(half) = 0,6 * (I^2(full) * R_c(full)) \quad (2.26)$$

Comparando a eq. (2.26) com a eq. (2.22), pode-se ver que:

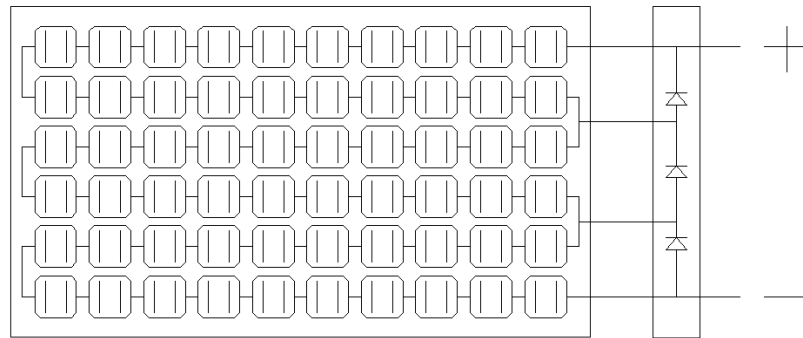
$$P(half) = 0,6 * P(full) \quad (2.27)$$

Portanto, é de se esperar uma diminuição de até 40% da potência perdida na célula fotovoltaica.

2.4.5. Módulo FullCell

Também conhecido como módulo *standart cell*, o módulo *fullcell* é o mais comum no mercado até o presente momento, sendo encontrado de diversas marcas, modelos e potências, porém esta tecnologia está gradualmente sendo substituída por tecnologias mais recentes, como *halfcell* e bifacial. Por exemplo, a fabricante Resun mantém no seu catálogo módulos *fullcell* de até 400Wp, enquanto a linha de módulos *halfcell* contém equipamentos de até 560Wp. As principais características construtivas dos módulos *fullcell* se dão pela presença de 60-72 células em série, divididas em três fileiras, chamadas *substrings*. Estas *substrings* são conectadas de forma antiparalela aos diodos *bypass*.

Na Figura 17 pode-se visualizar um módulo fotovoltaico simplificado, composto por 60 células divididas em três fileiras de vinte células, onde os diodos *bypass* estão contidos na caixa de junção.

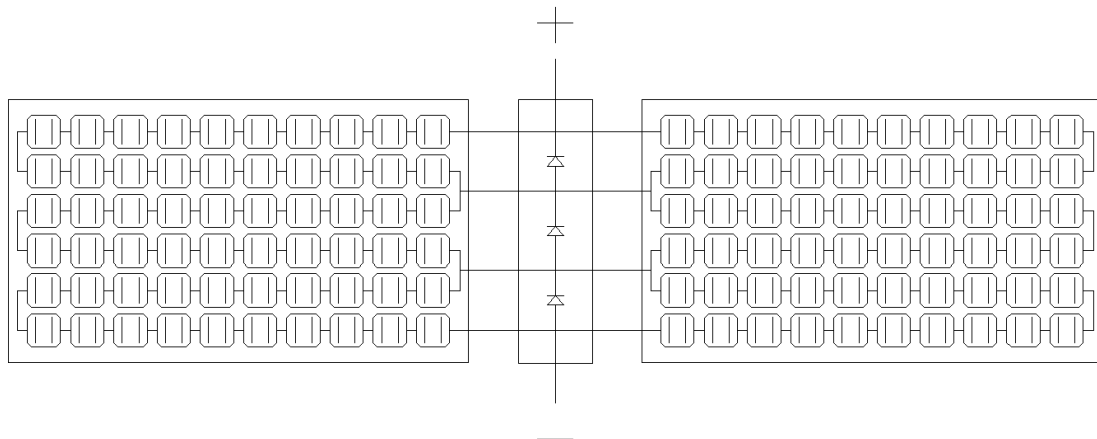
Figura 17 – Módulo Fotovoltaico *fullcell*

Fonte: Autor

2.4.6. Módulo Fotovoltaico Half Cell

Na Figura 18 pode-se observar um módulo *halfcell* simplificado. Como o próprio nome sugere, os módulos *halfcell* utilizam células fotovoltaicas com metade da área, ou seja, células cortadas ao meio. Essa característica construtiva traz algumas vantagens que melhoram a performance do módulo em condições de sombreamento, além de menores perdas de potência por conta da resistência atrelada às células fotovoltaicas.

Segundo Guo (2013), quando uma célula fotovoltaica é cortada ao meio, ela passa a gerar metade da corrente original, com a mesma tensão, entregando assim metade da potência. Portanto, fica evidente a construção do módulo *halfcell*, que em geral é composto por 120-144 células. Estas células são divididas em seis *substrings*, que são protegidas por três diodos *bypass*. Como as células fotovoltaicas geram metade da corrente das células convencionais, são formados dois conjuntos de 60-72 módulos conectados em paralelo.

Figura 18 - Módulo Fotovoltaico *halfcell*

Fonte: Autor

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada se baseia em pesquisa bibliográfica e em simulações numéricas dos modelos dos módulos fotovoltaicos *fullcell* e *halfcell*.

Utilizando a equação (2.8), que define a corrente gerada pela célula fotovoltaica, os módulos fotovoltaicos em estudo foram simulados no ambiente de simulação Matlab Simulink, onde foi utilizado a modelagem matemática de um diodo (tópico 2.2.2) para a célula fotovoltaica.

3.1. Simulação Matemática da Célula Fotovoltaica

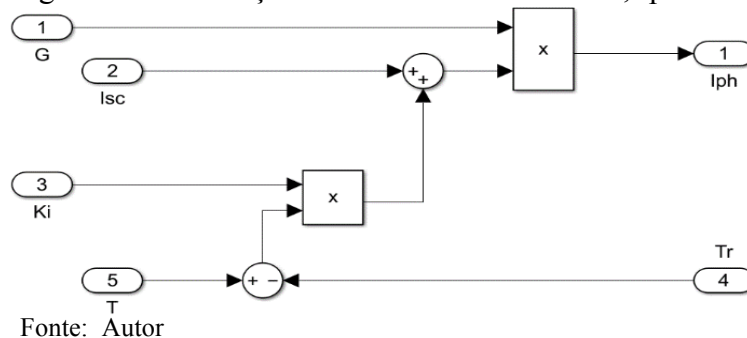
A seguir as características principais do módulo fotovoltaico serão modeladas matematicamente, para que se possa simular o seu comportamento em diversas condições de sombreamento, utilizando a célula com um diodo. Este modelo é mais simples que o modelo de dois diodos, porém também oferece um bom grau de precisão quanto às características principais. A célula será feita pela união dos blocos que formam o equacionamento citado no tópico 2.2.2. Com a soma das variáveis e constantes, o próximo passo é utilizar uma fonte de corrente controlada e montar o módulo a ser estudado.

3.1.1. Corrente Fotovoltaica I_{ph}

A corrente I_{ph} é a corrente gerada pela luz incidente, ou seja, é diretamente proporcional à irradiância e temperatura. Tem como parâmetros temperatura, irradiância, corrente de curto-circuito e constante de proporcionalidade, como pode ser visto na equação (3.1) e na Figura 19:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i * (T - 298,15)] * G \quad (3.1)$$

Figura 19 - Simulação da Corrente Fotovoltaica, I_{ph}



Onde:

I_{ph} : corrente fotovoltaica (A);

G : irradiância incidente (kW/m^2);

I_{sc} : corrente de curto circuito (A);

K_i : constante de proporcionalidade da corrente;

T : temperatura da célula (K);

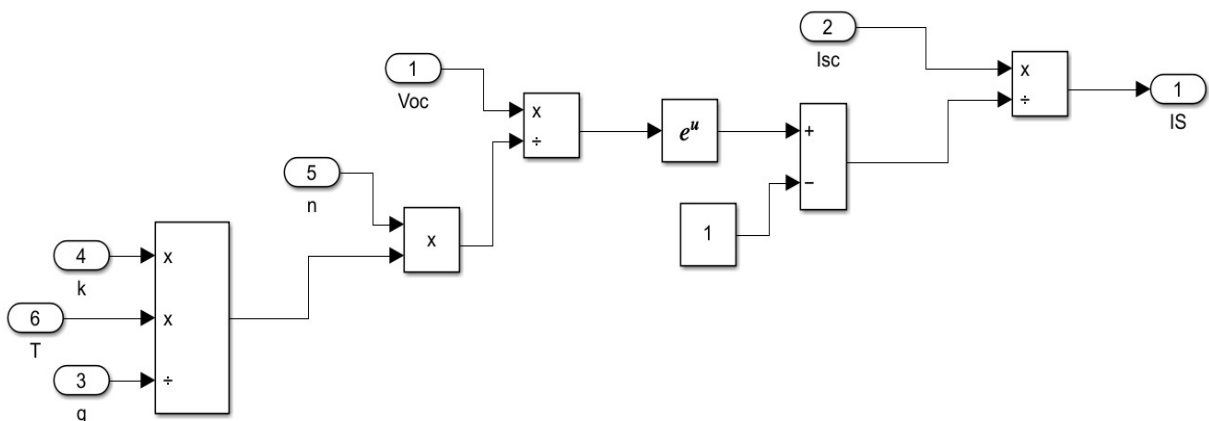
T_r : temperatura de referência ($25+273,15^\circ\text{C}$).

3.1.2. Corrente de Saturação Reversa I_s

A corrente I_s representa a corrente de saturação reversa da representação matemática do diodo da célula, que varia em função da temperatura, tendo como parâmetros corrente de curto-circuito, temperatura, tensão de circuito aberto e constantes como fator de idealidade, carga do elétron e constante de Boltzmann, conforme a equação (3.2) e visto na Figura 20:

$$I_s = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{knT}\right) - 1} \quad (3.2)$$

Figura 20 - Simulação da Corrente de de Saturação Reversa



Fonte: Autor

Onde:

I_s : corrente de saturação reversa (A);

V_{oc} : tensão de circuito aberto (V);

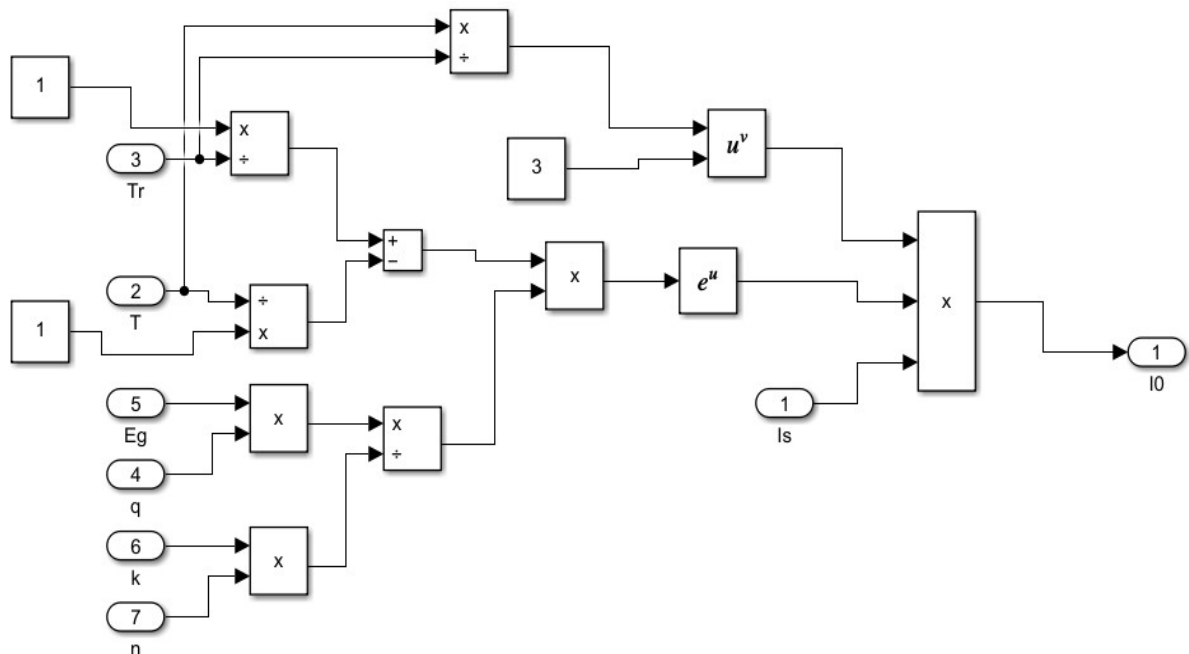
n: fator de idealidade;
 k: constante de Boltzmann;
 T: Temperatura da célula (K);
 q: carga do elétron.

3.1.3. Corrente de Saturação I_o

Na equação (3.3) é mostrado que a corrente de saturação da representação matemática do diodo da célula varia tanto com a temperatura, quanto com a corrente de saturação reversa, tendo como parâmetros principais a temperatura e temperatura de referência, como visto na Figura 21:

$$I_o = I_s \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left[-\frac{q * E_g \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)}{kn}\right] \quad (3.3)$$

Figura 21 - Corrente de Saturação



Fonte: Autor

Onde:

I_o : corrente de saturação (A);

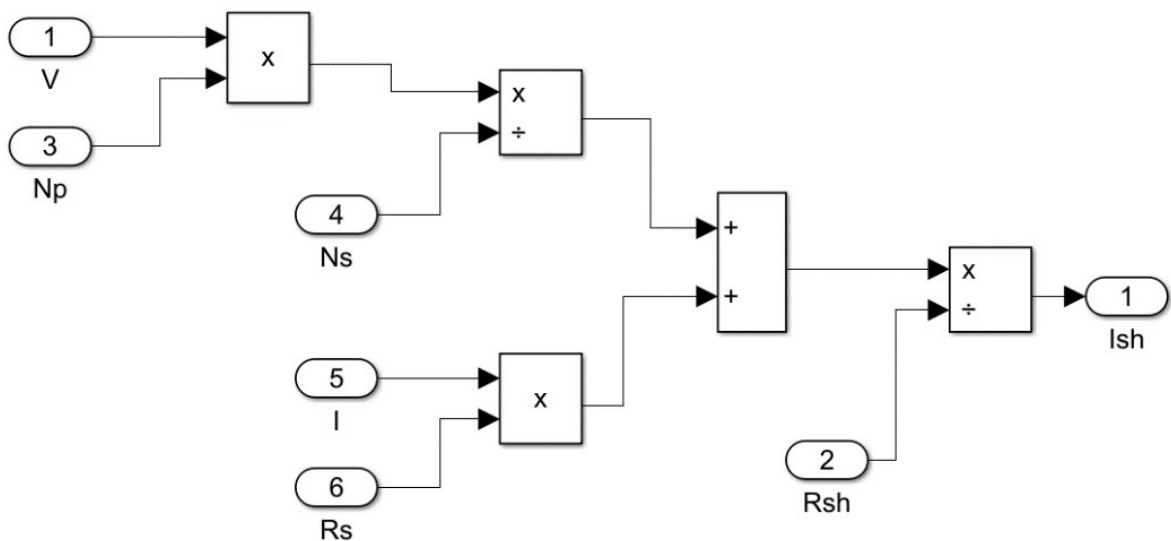
E_g : Gap de energia do semiconductor (eV);

3.1.4. Corrente shunt

A corrente shunt é obtida por meio da tensão aplicada na resistência shunt, variando bastante em função da disposição das células série / paralelo, sendo mostrado pela equação (3.4) e Figura 22:

$$I_{sh} = (V * \frac{N_p}{N_s} + I * R_s) / R_{sh} \quad (3.4)$$

Figura 22 - Corrente Shunt



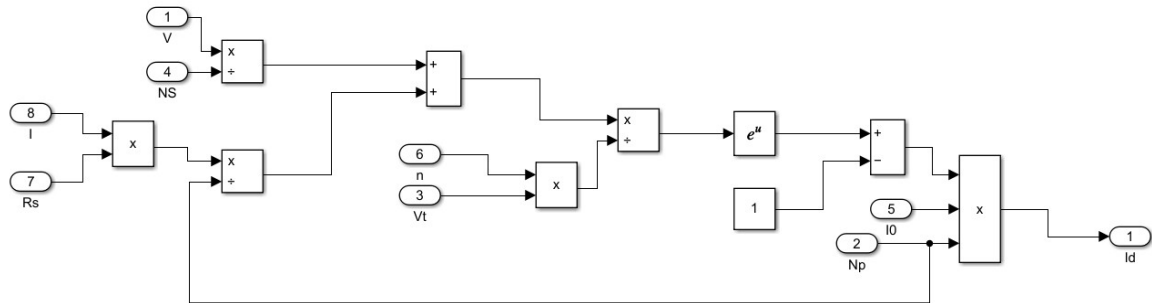
Fonte: Autor

3.1.5. Corrente característica do diodo

O diodo tem sua equação da corrente característica, que é importante para simular o comportamento da célula em relação à incidência de luz. Sua característica matemática se dá pelo número de células em paralelo e em série, resistência série e demais variáveis comentadas e calculadas anteriormente, onde são mostradas na equação (3.5) e Figura 23, onde N_p é o número de células em paralelo, A o fator de idealidade do diodo e V_t a tensão termal do diodo:

$$I_d = N_p * I_0 * \exp\left[\left(\frac{V}{N_s} + I * \frac{R_s}{N_p}\right) / (A * V_t)\right] - 1 \quad (3.5)$$

Figura 23 - Corrente Característica do Diodo



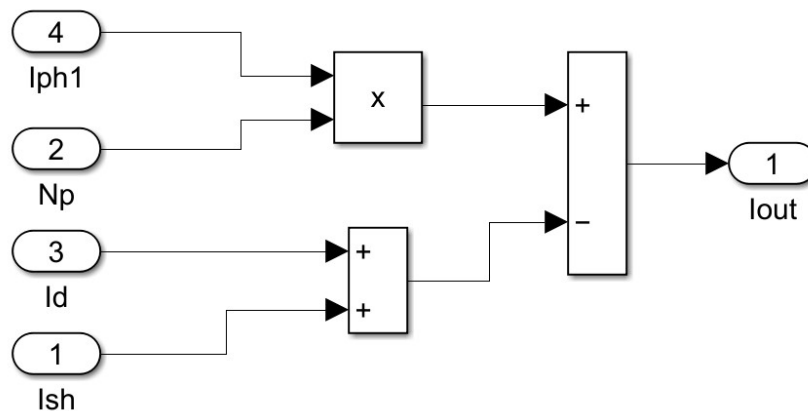
Fonte: Autor

3.1.6. Corrente de Saída

A equação (3.6) mostra, a corrente de saída. Esta corrente é dada pela soma das variáveis calculadas anteriormente, porém somando a quantidade de células conectadas em paralelo, demonstrado pela equação (3.6), podendo ser visualizado na Figura 24:

$$I = N_p * I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.6)$$

Figura 24 - Corrente de Saída

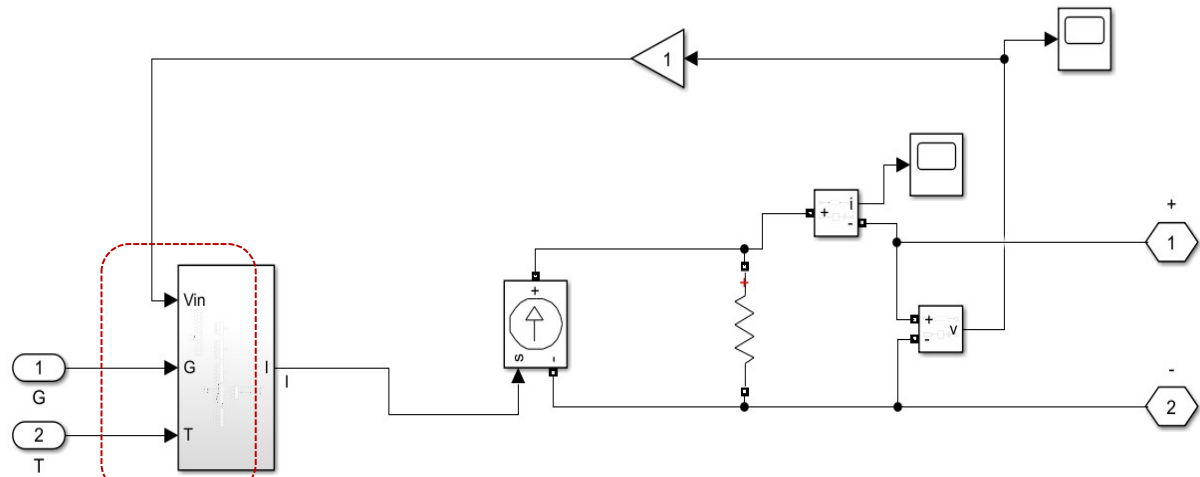


Fonte: Autor

3.2. Modelo da Célula Fotovoltaica

Na Figura 25 pode-se observar o modelo final da célula fotovoltaica, composta pelo bloco que simula matematicamente o modelo de um diodo (destacado em vermelho), que controla uma fonte de corrente controlada e um sensor de tensão.

Figura 25 - Simulação Física da Célula Fotovoltaica



Fonte: Autor

Multiplicando o fator N_s pela quantidade de células em uma *substring* do módulo fotovoltaico, pode-se simular o módulo fotovoltaico por meio de *substrings*. Estas *substrings* são conectadas a diodos bypass, que proporcionam um melhor aproveitamento da geração fotovoltaica em condições de sombreamento parcial ou total.

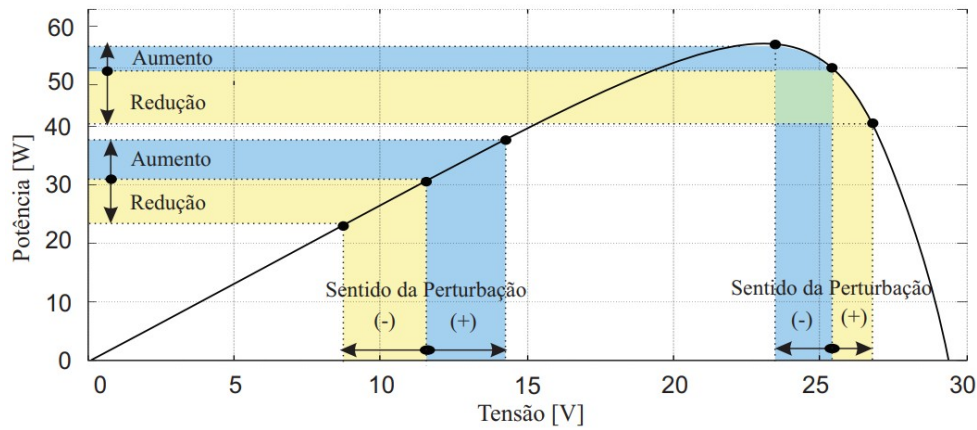
3.2.1. O Ponto de Máxima Potência

Na Figura 26 é apresentado um gráfico $P \times V$ que demonstra o funcionamento do algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracker), ou, Rastreador de Máxima Potência. Este ponto mostra a configuração de tensão e corrente em que o módulo entrega maior potência em função da luminosidade e temperatura.

Para que o sistema fotovoltaico trabalhe com a maior potência de geração possível, os inversores comerciais utilizam o algoritmo MPPT onde se podem utilizar vários métodos de rastreamento. O mais simples e popular é o algoritmo perturba e observa (PeO), onde se injeta uma perturbação na tensão e corrente, e se observa a potência resultante, em busca de se encontrar o MPP (Maximum Power Point), ou, Ponto de Máxima Potência. (MEDEIROS, 2019). Na Figura 26 pode-se observar o princípio do algoritmo PeO.

Para o rastreamento do MPP, existem vários métodos de diferentes complexidades. Porém a maioria enfrenta o mesmo obstáculo: presença de múltiplos pontos de máxima potência, que acontecem quando o sistema está sujeito a condições de operação não uniformes, que podem ser ocasionadas por módulos de potências diferentes conectados à mesma MPPT, sujeiras, sombreamentos, etc. Buscando ultrapassar essa barreira, existem vários outros métodos mais complexos para a análise do MPP, partindo do clássico Perturba e Observa, até as complexas Redes Neurais.

Figura 26 – Comportamento do Algoritmo PeO



Fonte: MEDEIROS, 2019

3.3. Simulação e Análise dos módulos *fullcell* e *halfcell*

Primeiramente simulou-se um módulo fotovoltaico comercial de tecnologia *fullcell* e outro *halfcell*, baseando-se nos dados do fabricante. Na tabela 1 pode-se ver os dados do módulo *fullcell* que foi tomado como base. Sendo utilizado o modelo RS6S-M da marca Resun, de 400Wp:

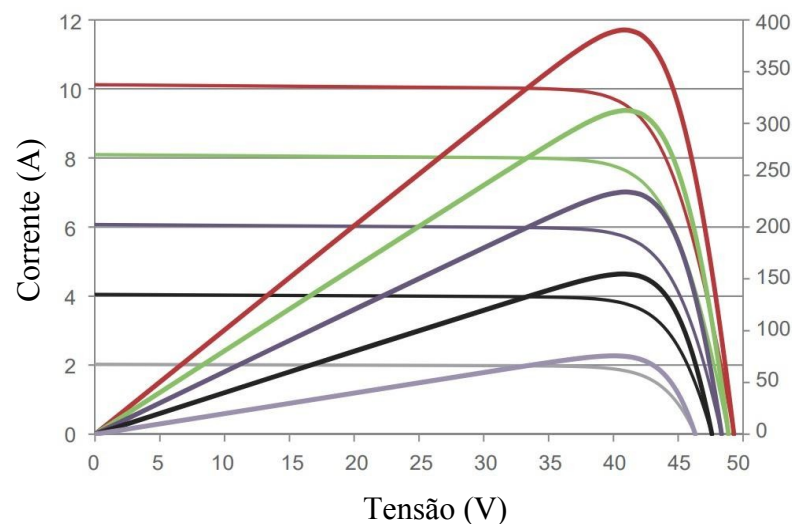
Tabela 1 – Dados do módulo Resun RS6S-M 400Wp

| Tecnologia <i>fullcell</i> | |
|---------------------------------|-------|
| Potência Máxima (Wp) | 400 |
| Tensão de Circuito Aberto (V) | 49,80 |
| Corrente de Curto-Circuito (A) | 10,36 |
| Tensão de Máxima Potência (V) | 41,70 |
| Corrente de Máxima Potência (A) | 9,60 |

Fonte: Resun

O fabricante disponibiliza as curvas PxV e IxV do módulo RS6S-M 400Wp, para irradiâncias de 1000, 800, 600, 400 e 200 W/m², como pode ser visualizado na Figura 27:

Figura 27 – Curvas de geração disponibilizadas pela fabricante Resun – Módulo *fullcell*



Fonte: Resun

Já na tabela 2 estão contidos os dados do módulo *halfcell* que servirão de base para o estudo sendo utilizado o modelo RS6I-M da marca Resun, de 400Wp.

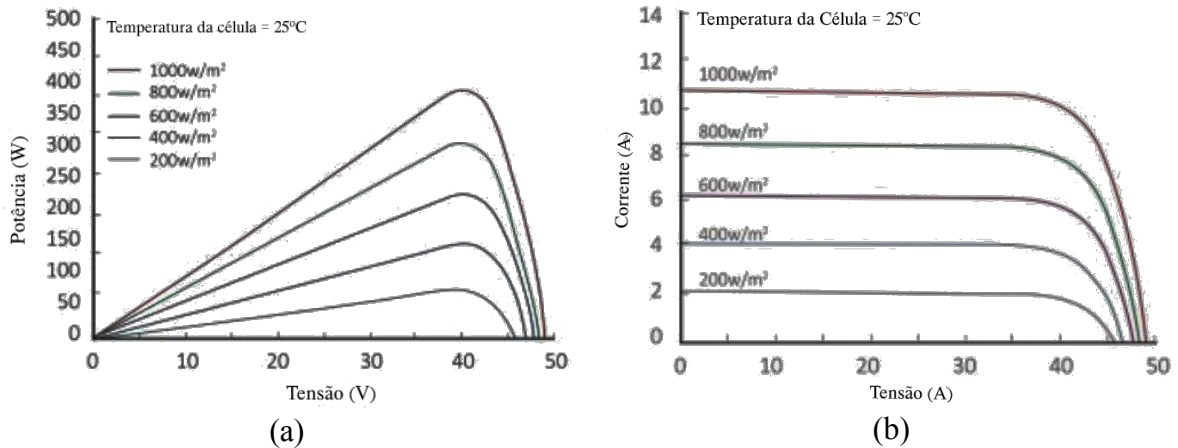
Tabela 2 – Dados do módulo Resun RS6I-M

| Tecnologia <i>halfcell</i> | |
|---------------------------------|-------|
| Potência Máxima (Wp) | 400 |
| Tensão de Circuito Aberto (V) | 49,40 |
| Corrente de Curto-Circuito (A) | 10,35 |
| Tensão de Máxima Potência (V) | 40,10 |
| Corrente de Máxima Potência (A) | 10,02 |

Fonte: Resun

Na Figura 28 (a) contém as curvas de geração PxV e na Figura 28 (b) contém as curvas IxV do módulo Resun RS6I-M 400Wp para as irradiâncias de 1000, 800, 600, 400 e 200 W/m², disponibilizado na folha de dados do fabricante.

Figura 28 - Curvas de geração disponibilizadas pela fabricante Resun – Módulo *fullcell*



Fonte: Resun

É importante salientar que os dois módulos têm dados de tensão e corrente parecidos, porém são fabricados de formas diferentes, portanto possuem características construtivas distintas. Para se obter dois modelos confiáveis para que se possa analisar as situações de sombreamento, foi utilizado o mesmo circuito, porém com adaptações e modificações de parâmetros.

Utilizando o modelo matemático da célula fotovoltaica proposto no tópico (3.2), buscou-se obter os valores de tensão e corrente de máxima potência o mais próximos possíveis dos valores indicados no datasheet do módulo base.

3.3.1. Simulação do Módulo *fullcell*

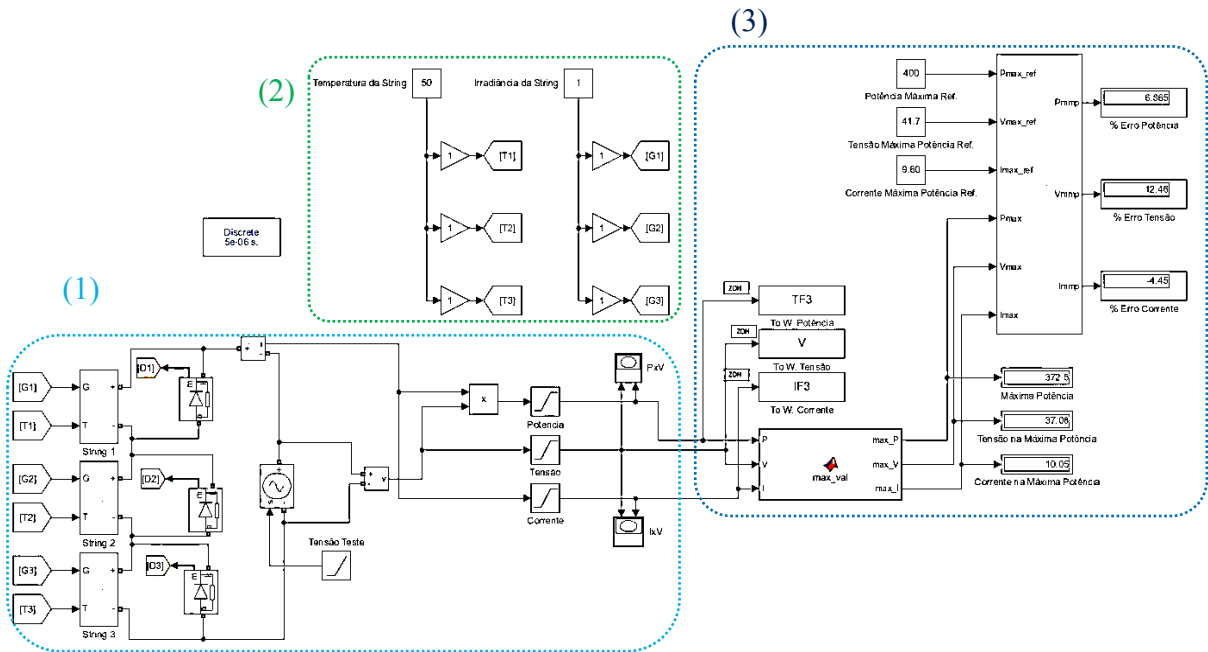
Na Figura 29 é mostrado o circuito que simula o módulo *fullcell*.

Na área 1 está destacado a área que simula o módulo fotovoltaico *fullcell*, onde pode-se observar as três *substrings* conectadas aos diodos da caixa de junção.

Na área 2, pode-se ver a área onde os parâmetros externos podem ser inseridos, no caso iluminância e temperatura. A iluminância é inserida em kW/m² e a temperatura em °C.

Por fim, na área 3 estão contidos os blocos que formam os gráficos PxV e IxV e mostram os valores instantâneos nos blocos de *display* disponíveis na biblioteca do Matlab Simulink.

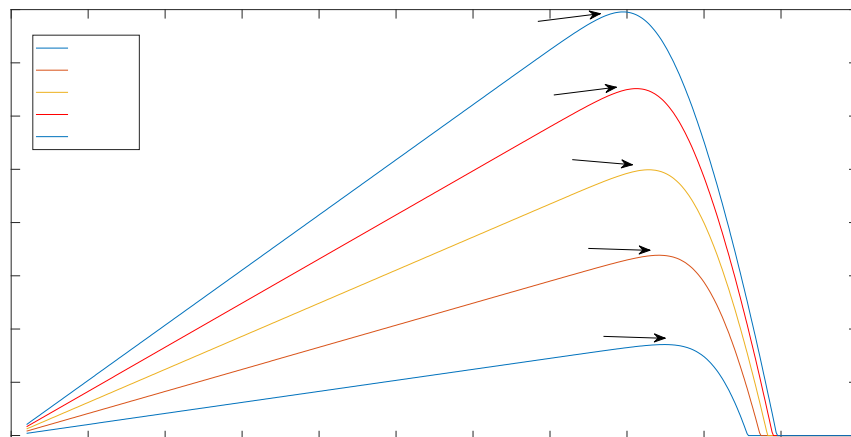
Figura 29 - Circuito Módulo *fullcell*



Fonte: Autor

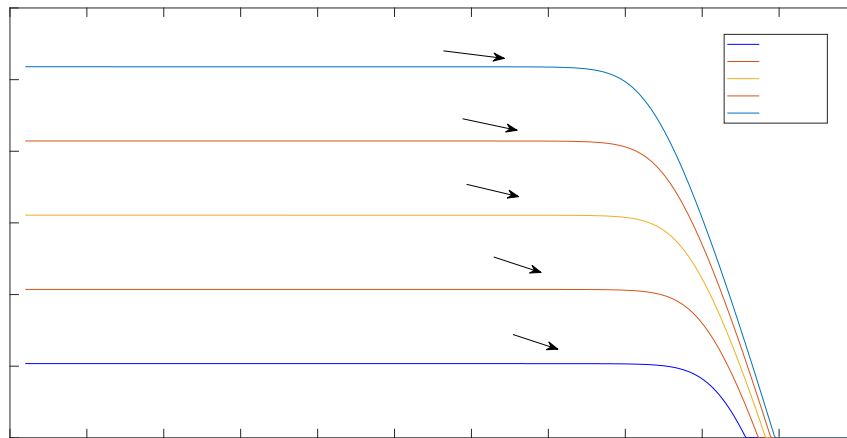
Utilizando o circuito da Figura 29 e os parâmetros iniciais obtidos dos dados do fabricante contidos na tabela 1, foram obtidas as curvas PxV mostradas na Figura 30 e curvas IxV mostradas na Figura 31, onde estão contidos os diferentes picos de potência e corrente em relação à tensão para as irradiações de 1000, 800, 600, 400 e 200 W/m². Os resultados obtidos estão de acordo com o demonstrado nos dados do fabricante, contidos na Figura 27.

Figura 30 - Gráfico PxV – Várias Irradiâncias – *fullcell*



Fonte: Autor

Figura 31 – Gráfico IxV – Várias Irradiâncias - *fullcell*



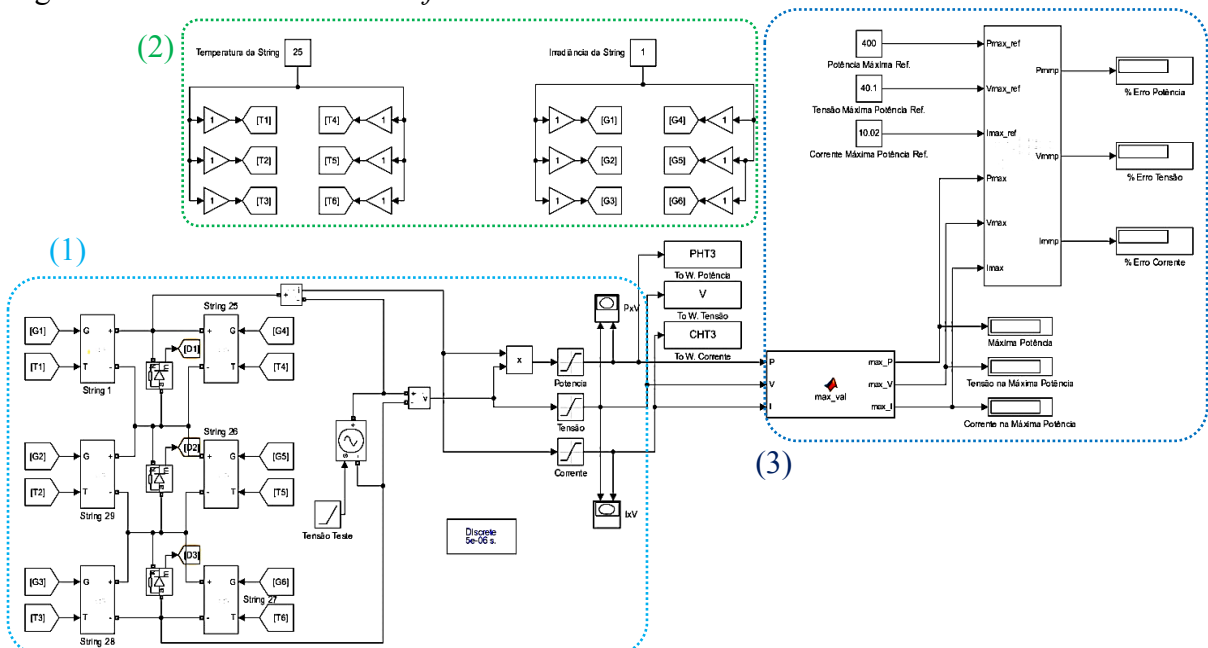
Fonte: Autor

3.3.2. Simulação do Módulo *halfcell*

Utilizando os valores contidos na tabela 2, simulou-se o módulo *halfcell* com o circuito mostrado na Figura 32:

Da mesma forma que na figura 29, a área 1 mostra a simulação do módulo *halfcell*, a área 2 mostra a inserção de dados de irradiância e temperatura e a área 3 há a obtenção de dados e geração dos gráficos PxV e IxV.

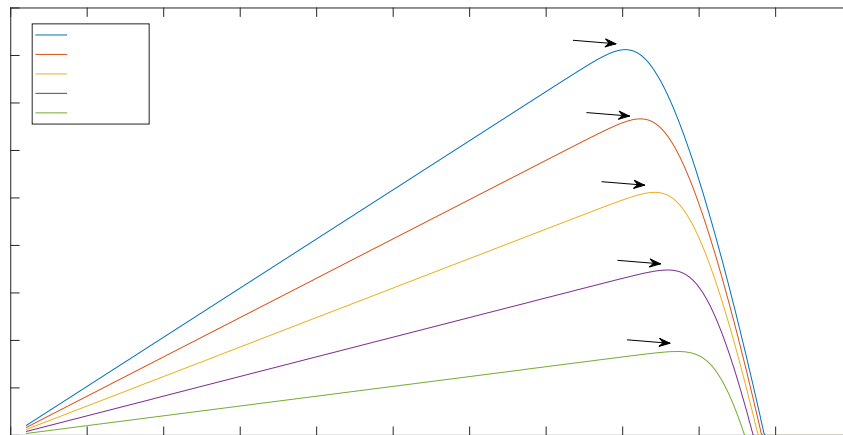
Figura 32 – Circuito Módulo *halfcell*



Fonte: Autor

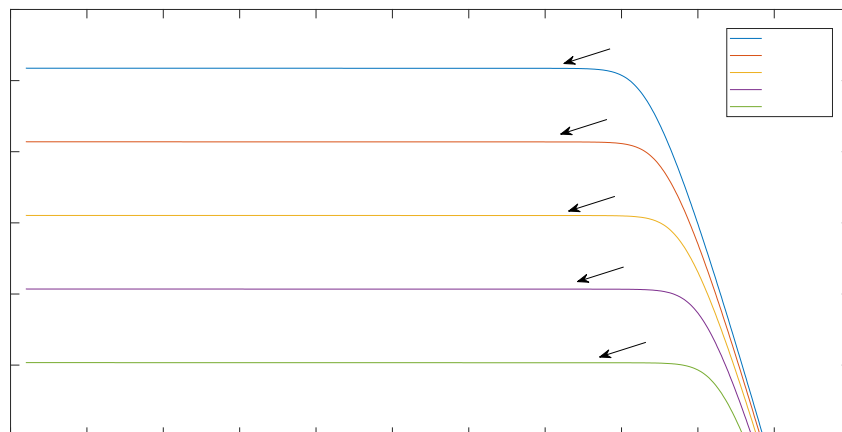
Como resultado, obteve-se o seguinte gráfico PxV mostrado na Figura 33 e gráfico IxV mostrado na Figura 34, que da mesma forma que no módulo *fullcell*, está de acordo com os dados informados pelo fabricante, contidos na figura 28 (a) e figura 28 (b).

Figura 33 - Gráfico PxV – Várias Irradiâncias - *halfcell*



Fonte: Autor

Figura 34 – Gráfico IxV – Várias Irradiâncias - *halfcell*



Fonte: Autor

Na tabela 3 verifica-se os resultados obtidos para condições ótimas de irradiação e temperatura (1000W/m^2 e 25°C), onde se observa a potência máxima, juntamente com tensão de máxima potência e corrente de máxima potência, que são os parâmetros principais para a análise de sombreamento.

Tabela 3 - Resultados obtidos nas simulações para 1000W/m²

| Parâmetros | Valores Obtidos | | Erro | |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Módulo <i>fullcell</i> | Módulo <i>halfcell</i> | Módulo <i>fullcell</i> | Módulo <i>halfcell</i> |
| Potência Máxima (Wp) | 397,8 | 406,1 | 0,54 | -1,53 |
| Tensão de Circuito Aberto (V) | 49,80 | 49,40 | - | - |
| Corrente de Curto Circuito (A) | 10,36 | 10,35 | - | - |
| Tensão de Máxima Potência (V) | 39,74 | 40,18 | 4,92 | -0,19 |
| Corrente de Máxima Potência (A) | 10,01 | 10,11 | -4,09 | -0,87 |

Fonte: Autor

Com os valores da tabela 3 e tabelas 1 e 2, foi possível verificar que o erro obtido nas simulações foram abaixo de 5%, indicando uma boa precisão do modelo estudado. Na Tabela 3 é possível observar os erros do ponto de máxima potência, tensão de máxima potência e corrente de máxima potência em comparação aos dados informados na folha de dados disponibilizada pelo fabricante.

3.3.3. Considerações dos Sistemas de Geração Comerciais

Com os circuitos dos módulos é possível simular situações de sombreamento e comparar o comportamento das duas tecnologias. É importante ressaltar que mesmo tendo diferentes construções, os dois módulos são instalados da mesma forma no telhado ou usina solo. Sendo assim, as sombras foram simuladas da forma mais parecida possível para os dois módulos.

Além disso, atualmente os sistemas de micro geração distribuída, que compreende os sistemas de geração on-grid até 75kW, mais comum em casas e comércios, utilizam inversores que não aceitam paralelismo externo de módulos, ou seja, a instalação é feita conectando os módulos em série. Os módulos são conectados em paralelo no sistema interno

do inversor, ficando popularmente conhecido no ramo da Energia Solar como *Strings por MPPT*, que nada mais é que a quantidade de strings em paralelo conectadas àquela MPPT.

Tendo isso em mente, fica evidente que a perda de corrente fotovoltaica ocasionada por sombreamento é extremamente prejudicial ao sistema fotovoltaico.

3.4. Simulações com Sombreamento

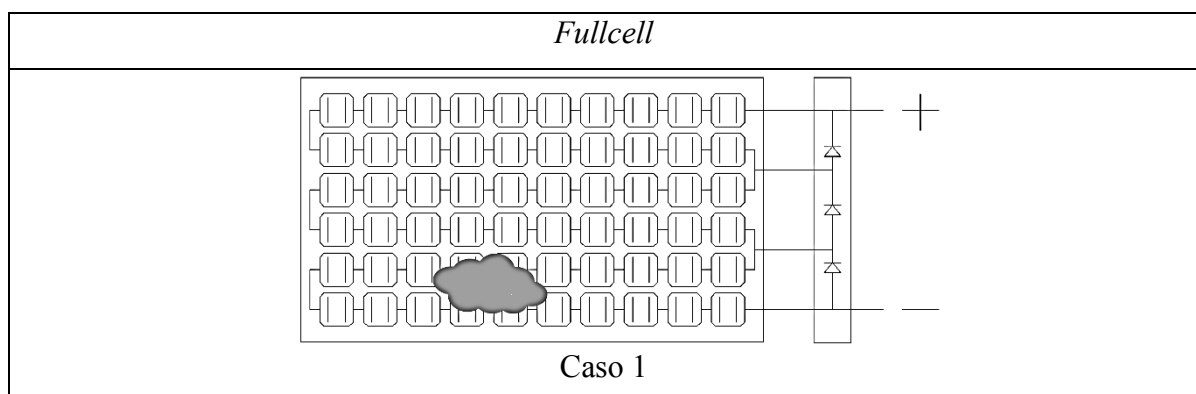
Para que se possa realizar o comparativo entre as duas tecnologias em estudo, foram escolhidos três casos de sombreamento, que será aplicado em cada módulo. Os parâmetros de potência, corrente e comportamento dos diodos *bypass* serão analisados.

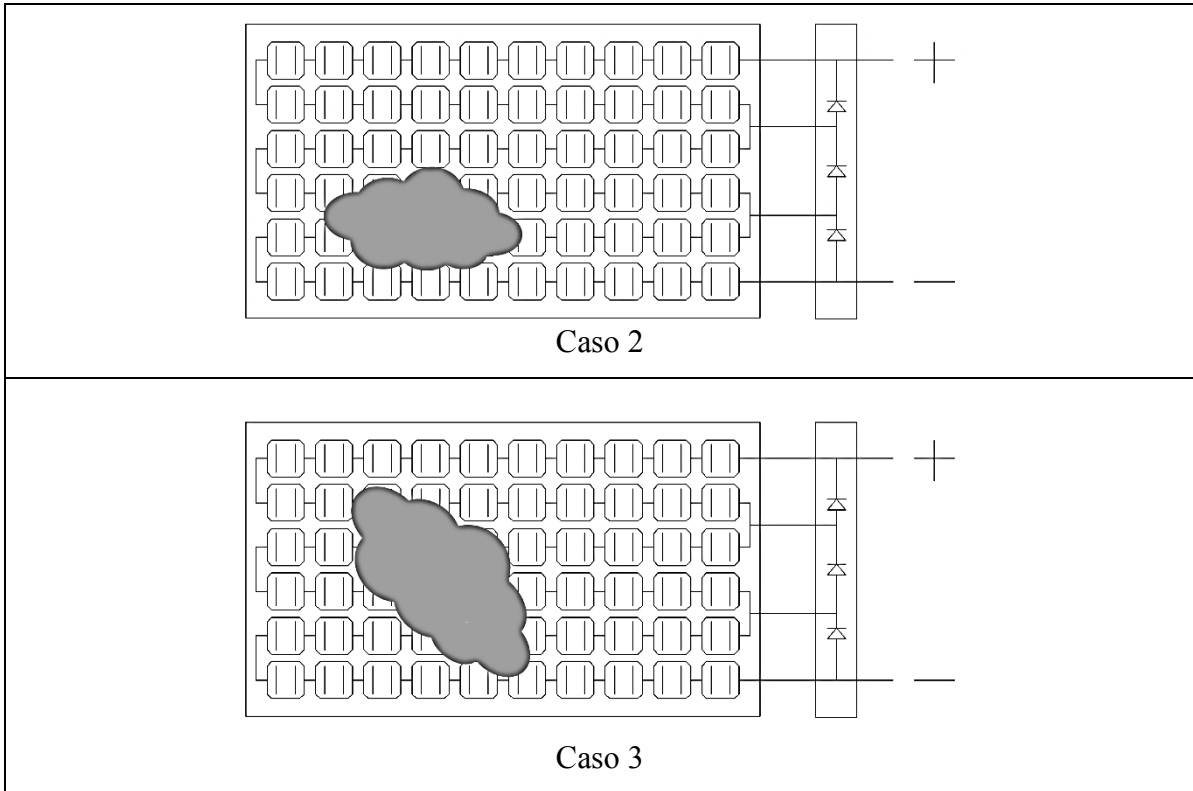
3.4.1. Casos de Sombreamento

Na Tabela 4 são mostrados os casos de sombreamento aplicados aos módulos fotovoltaicos. Este sombreamento foi simulado ao utilizar irradiâncias menores que a de referência no local onde se deseja simular a sombra.

No caso 1, pode-se observar que duas strings não estão obstruídas, portanto foi utilizada a seguinte configuração: 100% de iluminância na string 1, 100% de iluminância na string 2 e 80% de iluminância na string 3, afetando por volta de 1/6 da área dos dois módulos em estudo. Já no caso 2, utilizou-se 100% na string 1, 40% na string 2 e 80% na string 3, onde a sombra cobre por volta de 1/3 da área dos dois módulos. Por fim, no caso 3, foi utilizado 20% de iluminância na string 1, 40% na string 2 e 80% na string 3. Este padrão se repete tanto para o módulo *fullcell* quanto para o *halfcell*, com o sombreamento afetando por volta de 1/3 dos dois módulos em estudo.

Tabela 4 - Casos de sombreamento no módulo *fullcell*

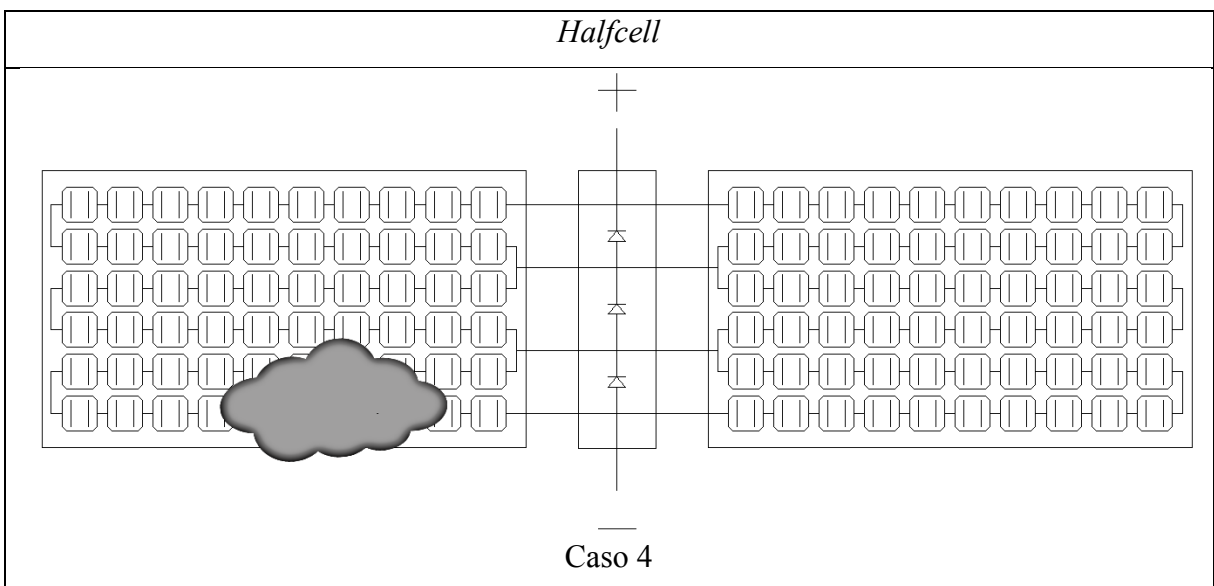


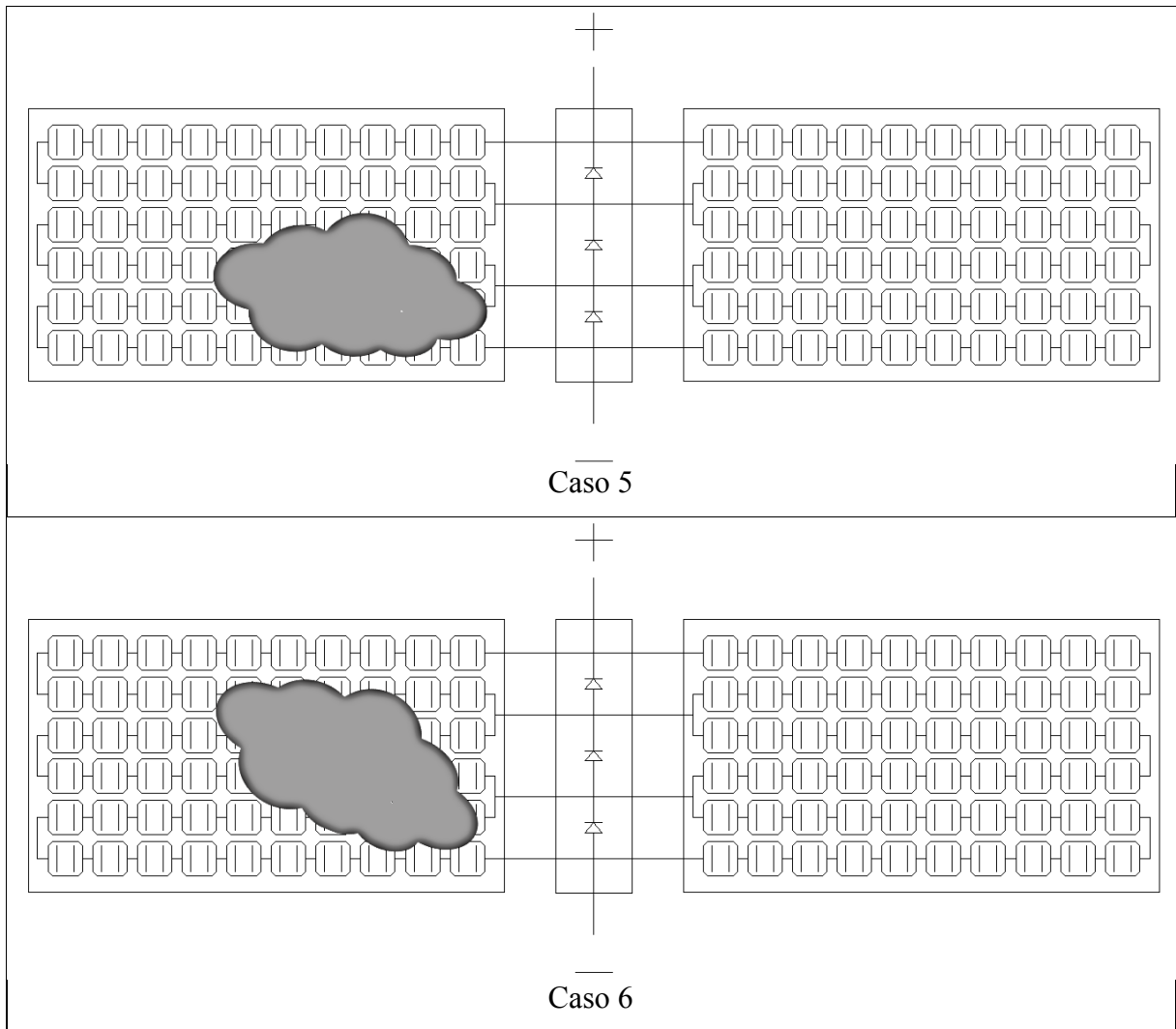


Fonte: Autor

Na Tabela 5 é mostrado de forma visual os casos de sombreamento para o módulo *halfcell*.

Tabela 5 – Casos de sombreamento no módulo *halfcell*





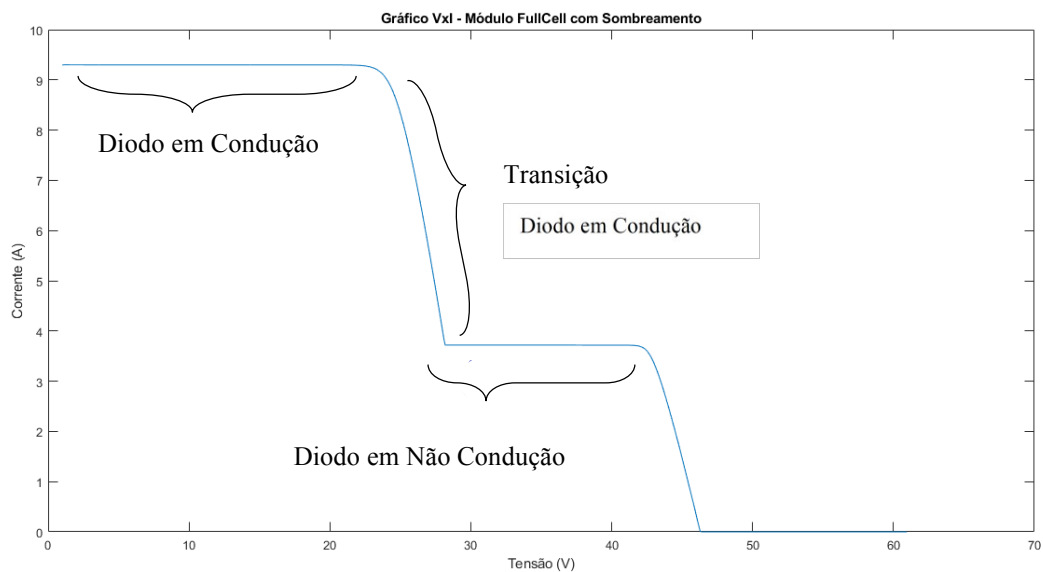
Fonte: Autor

Como explicado por Vieira (2020), quando há sombreamento em uma célula fotovoltaica de uma string, toda a potência fornecida pela string fica limitada à potência dessa célula sombreada. Portanto, o sombreamento do módulo fotovoltaico pode mensurado pela perda de irradiação nas células afetadas, e conseqüentemente pela perda de geração de toda a string. Conseqüentemente, para o presente trabalho, a simulação dos casos de sombreamento em estudo se dá pela perda de potência na string que está sendo afetada, tomando como base a Tabela 4 e Tabela 5. Os resultados obtidos com as simulações podem ser visualizados nas Figura 37 e Figura 39.

3.4.2. Análise da Potência Gerada

A curva IxV característica formada em módulos com a geração comprometida, mostrada na Figura 35 é explicada por Shiradkar (2015) como o tempo de transição do diodo de ligado para desligado. Portanto, em curvas IxV deste tipo, busca-se obter esta característica junto à maior potência gerada em caso de sombreamento.

Figura 35 - Comportamento do Diodo em Caso de Sombreamento



Fonte: Autor

Pode-se analisar que nos casos 1, 2 e 3, a sombra representada pela nuvem cinza, percorre áreas parecidas dos dois módulos. Esta sombra foi projetada para que não interrompa totalmente a geração de energia, apenas haja um abatimento percentual. Além disso, esse abatimento é diferente para cada substring do módulo. O principal objetivo destas condições é que fique evidente o funcionamento dos diodos *bypass*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

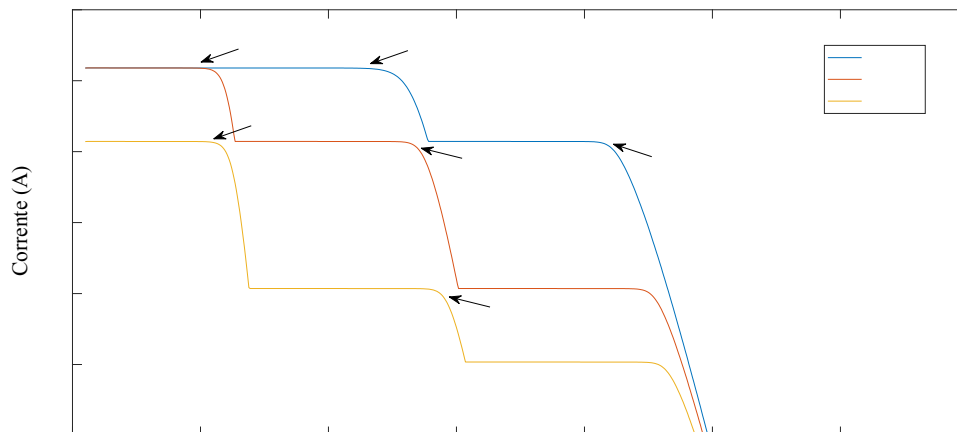
4.1. Comparativo da potência gerada para os casos de sombreamento

Na Figura 36 é mostrado o gráfico IxV para os casos de sombreamento 1, 2 e 3, respectivamente, onde:

- I_{max} = corrente máxima (A);
- I_{maxpot} = corrente de máxima potência (A).

Como explicado por Shiradkar (2015) na Figura 35, espera-se que com o acionamento dos diodos, se formem picos locais e globais. Portanto, no caso 1 é formado um pico local e um global, enquanto que no caso 2 e caso 3 são formados dois picos locais e um global. Estes picos (locais e globais) da corrente que formam os picos locais de potência visualizados na Figura 37, justamente os responsáveis por dificultar ou até mesmo impossibilitar o rastreamento de máxima potência dos inversores (MPP).

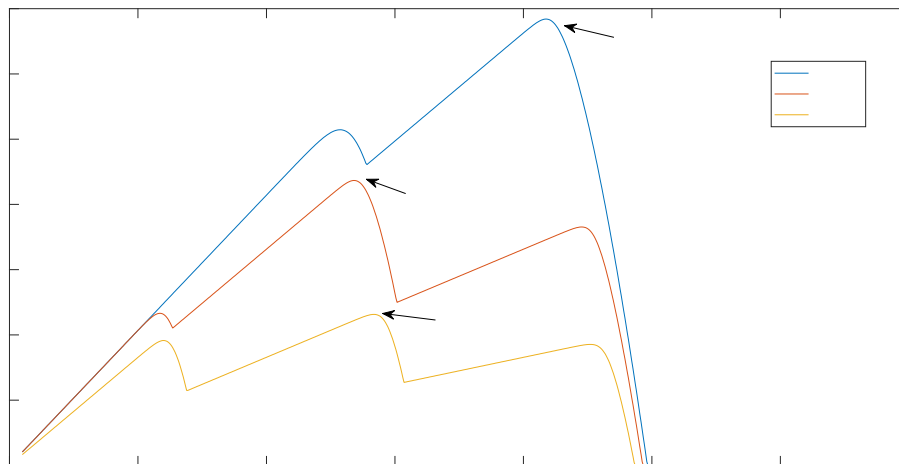
Figura 36 - Gráfico IxV - Casos de Sombreamento - *fullcell*



Fonte: Autor

Na Figura 37 pode-se ver o gráfico PxV para o caso de sombreamento 1, caso de sombreamento 2 e caso de sombreamento 3. Por conta dos diferentes níveis de irradiação em cada string, são formados picos locais e globais em cada gráfico. No caso 1, se obteve uma potência máxima de 342W, enquanto no caso 2 se observa um máximo de 218,4W e no caso 3, um máximo de 115,7W, um decaimento na potência de -14,5%, -45,4% e 71% para os casos 1, 2 e 3, respectivamente, tendo os valores resumidos na Tabela 7.

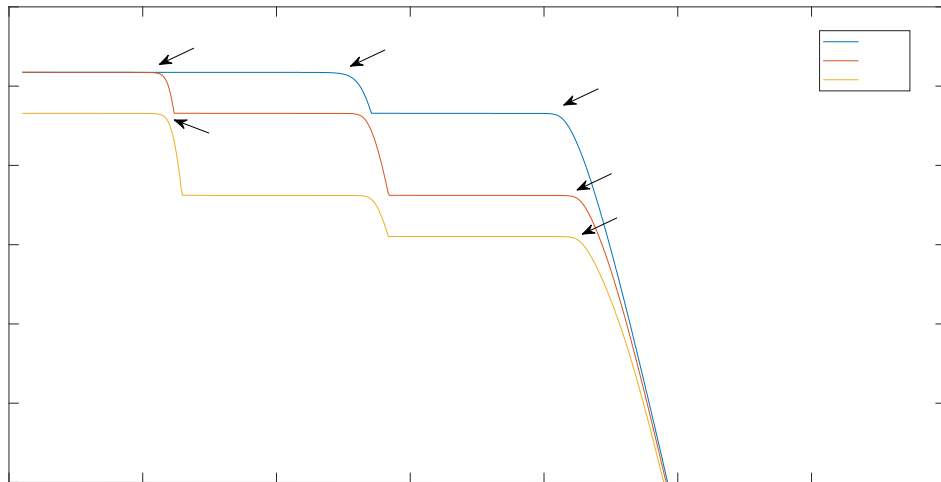
Figura 37 - Gráfico PxV - Casos de Sombreamento - *fullcell*



Fonte: Autor

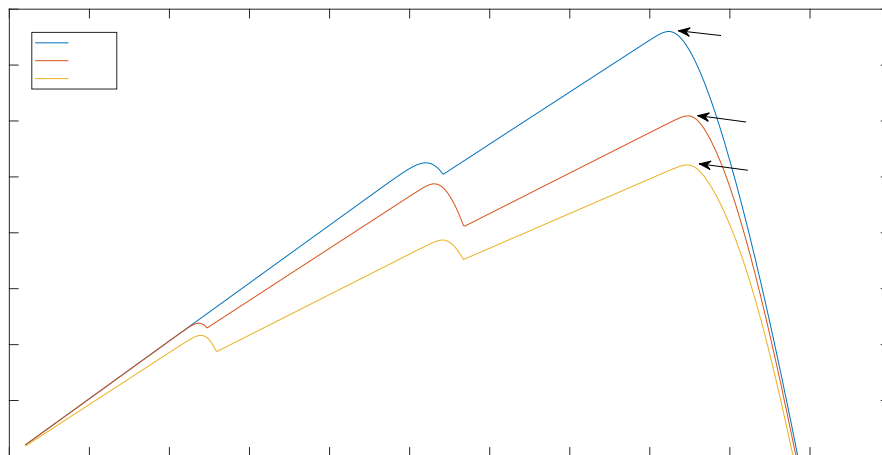
Na Figura 38 é mostrado o gráfico IxV para os casos de sombreamento 1, 2 e 3 da tecnologia *halfcell*. Assim como na tecnologia *fullcell*, mostrado na Figura 39, se observa os picos locais e global de cada caso de sombreamento.

Na tecnologia *fullcell* para o caso de sombreamento 1, se obteve uma corrente máxima de 10,36A, e uma corrente de máxima potência de 8,19A, enquanto que na tecnologia *halfcell*, a corrente máxima foi de 10,35A e a corrente de máxima potência de 9,23A, para o caso 2, a tecnologia *fullcell* entregou uma corrente máxima de 10,36A e corrente de máxima potência de 8,14A, e para o caso 3, uma corrente máxima de 8,28A e corrente de máxima potência de 4,08A. Observa-se que a corrente máxima se mantém em valores parecidos para as duas tecnologias, 10,38A e 10,35A para a tecnologia *fullcell* e *halfcell*, respectivamente. Além disso, esse valor de corrente sofre pouca variação, 20,23% para a tecnologia *fullcell* e 10,04% para a tecnologia *halfcell*, ou seja, 8,28A e 9,31A, respectivamente. Porém, esse valor de corrente não firma a máxima potência, pois o pico de máxima potência só é obtido na faixa de tensão de 28 a 42V para os três casos do módulo *fullcell*, e na faixa de tensão de 41 a 43V para os três casos do módulo *halfcell*. Nessas faixas de tensão a corrente não está mais no seu valor global, mas sim em seus valores locais, que junto com a tensão indicam os pontos de máxima potência, como pode ser observado na Figura 36 e Figura 38, onde os pontos de máxima potência são indicados na Figura 37 e Figura 39.

Figura 38 - Gráfico IxV - Casos de Sombreamento - *Halfcell*

Fonte: Autor

Já na Figura 39, que demonstra o gráfico PxV para os casos de sombreamento explicados, o decaimento da potência é mais suave e progressivo em relação ao gráfico PxV da célula *fullcell*, mostrado na Figura 37, evidenciando assim a principal vantagem dos módulos *halfcell*, sua eficiência mesmo em situações de sombreamento.

Figura 39 - Gráfico PxV - Casos de Sombreamento - *Halfcell*

Fonte: Autor

O aprimoramento do comportamento na tecnologia *halfcell* em caso de sombreamento fica evidente na tabela 6, onde é mostrada a diferença percentual de perda de potência para os casos de sombreamento estudados, no módulo *fullcell* e *halfcell*. É interessante notar que para o caso 1, que pode ser considerado de pouco sombreamento, a tecnologia *halfcell* entrega 95% da potência nominal, enquanto a tecnologia *fullcell* entrega 85,5%. Já no caso 2, que pode ser considerado como o caso mais crítico, onde a sombra analisada passa por duas *strings*, o módulo *halfcell* entrega 76,2% da potência nominal, enquanto que o módulo *fullcell* entrega 54,6%. Essa diferença fica ainda maior no caso 3, em que o módulo *halfcell* se mantém com uma potência de 65,2% e o módulo *fullcell* passa a entregar 29% da potência nominal.

Essa diferença de comportamento em caso de sombreamento deu ao módulo *halfcell* mais visibilidade no mercado, de modo que os fabricantes estão focando nesta tecnologia. Comercialmente, é bem difícil encontrar módulos *fullcell* de potências superiores a 400Wp. O mercado mostra que para módulos mais potentes, é mais interessante se utilizar a tecnologia *halfcell*, e um dos principais motivos é o bom comportamento da tecnologia em situações de sombreamento adverso.

Tabela 6 - Potências para os Casos de Sombreamento

| <i>Fullcell</i> | | | <i>Halfcell</i> | |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| Casos | Irradiância com Sombreamento | Potência Máxima | Irradiância com Sombreamento | Potência Máxima |
| Controle (sem sombreamento) | Substring 1: 1000Wm ² | 397,8 W | Substring 1: 1000Wm ² | 406 W |
| | Substring 2: 1000Wm ² | | Substring 2: 1000Wm ² | |
| | Substring 3: 1000Wm ² | | Substring 3: 1000Wm ² | |
| Caso 1 | Substring 1: 1000Wm ² | 342 W | Substring 1: 1000Wm ² | 380 W |
| | Substring 2: 1000Wm ² | | Substring 2: 1000Wm ² | |
| | Substring 3: 800Wm ² | | Substring 3: 800Wm ² | |
| Caso 2 | Substring 1: 1000Wm ² | 218,4 W | Substring 1: 1000Wm ² | 304,5 W |
| | Substring 2: 400Wm ² | | Substring 2: 400Wm ² | |
| | Substring 3: 800Wm ² | | Substring 3: 800Wm ² | |
| Caso 3 | Substring 1: 200Wm ² | 115,7 W | Substring 1: 200Wm ² | 260,7 W |
| | Substring 2: 400Wm ² | | Substring 2: 400Wm ² | |
| | Substring 3: 800Wm ² | | Substring 3: 800Wm ² | |

Fonte: Autor

Na Tabela 7 pode-se visualizar a perda de potência para cada caso de sombreamento. Como mencionado anteriormente, a tecnologia *fullcell* se mostra bem mais sensível em situações de sombreamento, com sua perda de potência mais elevada quando comparada à tecnologia *halfcell*.

Tabela 7 - Perda de Potência Percentual em relação à potência nominal de 400W

| | <i>Fullcell</i> | <i>Halfcell</i> |
|--------|-----------------|-----------------|
| Caso 1 | -14,5% | -5% |
| Caso 2 | -45,4% | -23,8% |
| Caso 3 | -71% | -34,8% |

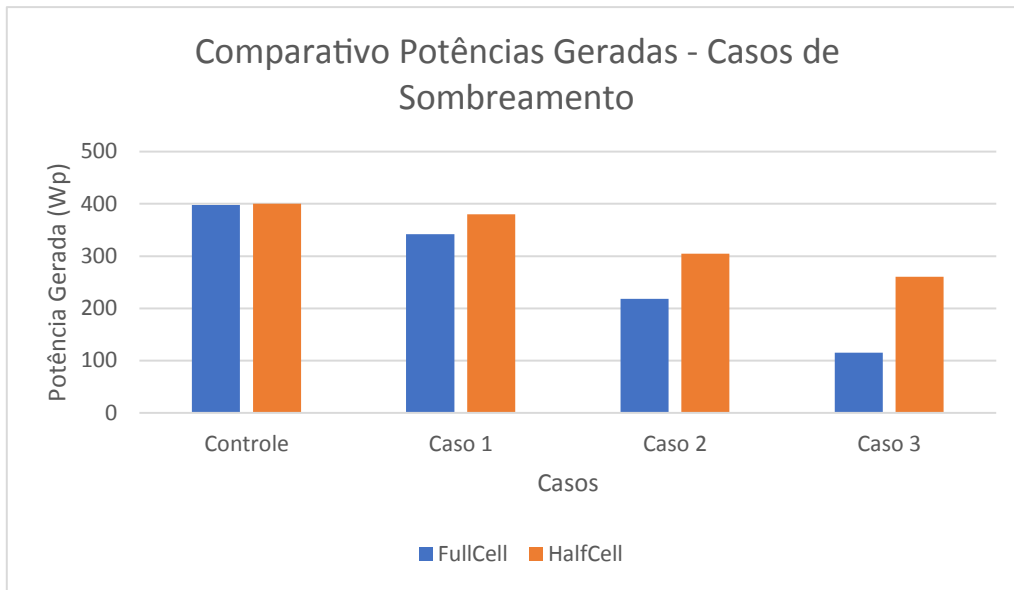
Fonte: Autor

A folha de dados do módulo fotovoltaico *fullcell* Resun RS6S-M 400W indica as seguintes dimensões físicas: 1979x1002 mm. Enquanto que a folha de dados do módulo fotovoltaico *halfcell* Resun RS6I-M 400W indica as seguintes dimensões físicas: 2008x1002 mm. Sendo assim, o módulo *fullcell* estudado possui área de 1,98m², enquanto que o módulo *halfcell* possui área de 2,01m², ou seja, um aumento de 0,03m² (1,51%) de área física do módulo *halfcell* quando comparado ao módulo *fullcell* dos modelos estudados. Portanto, a decisão da escolha entre uma tecnologia e outra deve ser baseada no seu preço e eficiência, principalmente em lugares onde a sombra é inevitável.

Tendo que ambos os módulos estudados são da mesma marca e possuem a mesma potência nominal, como visto na tabela 7, o módulo *halfcell* entrega, para o caso 1, caso 2 e caso 3, respectivamente, 9,5%, 21,6% e 36,2% mais potência quando comparado ao módulo *fullcell* estudado com os mesmos casos de sombreamento.

Na Figura 40 é mostrada de forma visual a perda de potência para cada tecnologia estudada, onde o controle mostra suas potências nominais, 400Wp para cada módulo, e as outras seis colunas mostram a potência gerada para cada caso, onde em azul é mostrado o módulo *fullcell* e em laranja o módulo *halfcell*. Analisando a Figura 40, é possível concluir que a tecnologia de módulos fotovoltaicos *halfcell* se mostra mais eficiente em situações de sombreamento, tendo como base a sua melhor entrega de potência nos três casos de sombreamento estudados, com apenas 1,51% a mais de área física, ou seja, com o mesmo aproveitamento da área do local de instalação, seja no telhado ou solo.

Figura 40 - Comparativo Potências Geradas em casos de Sombreamento



Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o estudo entre um módulo comercial *fullcell* e um módulo comercial *halfcell*, onde seus comportamentos em três diferentes casos de sombreamento foram comparados.

Para o comparativo das duas tecnologias, foram utilizados dois módulos fotovoltaicos da marca Resun, o primeiro sendo o RS6S-M de 400W fabricado com a tecnologia *fullcell*, e o segundo sendo o módulo de modelo RS6I-M de 400W fabricado com a tecnologia *halfcell*. A simulação destes módulos fotovoltaicos foi feita no software Matlab Simulink, com um erro de menos de 5%, sendo assim um modelo com um bom grau de fidedignidade em relação aos módulos reais comerciais, o que é importante para a análise de sombreamento.

Para o comparativo dos módulos, foram utilizados gráficos de potência por tensão (PxV), que mostra o ponto de máxima potência em função da tensão, e o gráfico de corrente por tensão (IxV), que mostra o comportamento da corrente em função da tensão. Sem sombreamento, o modelo estudado da tecnologia *fullcell* gera 397,8W de potência e o modelo *halfcell* gera uma potência 406W. Ao utilizar três casos de sombreamento, onde o caso 1 é um sombreamento moderado que diminui 20% de geração da primeira *substring*, o caso 2 é um sombreamento mais severo, que diminui 20% da geração da primeira *substring* e diminui 60% da geração da segunda *substring*, e o caso 3, sendo o mais crítico, onde o sombreamento diminui 20% da geração da primeira *substring*, 60% de geração da segunda *substring* e diminui 80% de geração da terceira *substring*, observou-se uma discrepância da potência gerada pelas duas tecnologias, onde a tecnologia *fullcell* entregou a potência de 342W, 218,4W e 115,7W para o caso 1, caso 2 e caso 3, respectivamente, enquanto que a tecnologia *halfcell* gerou 380W, 304,5W e 260,7W para o caso 1, caso 2 e caso 3, respectivamente, ou seja, o módulo *halfcell* teve uma geração de 9,5%, 21,6% e 36,2% superior ao módulo *fullcell* nos três casos de sombreamento estudados.

Se conclui, portanto, que a tecnologia de módulos fotovoltaicos *halfcell* é mais eficiente, sendo prioridade na escolha do módulo para sistemas onde o sombreamento parcial é inevitável em certas horas do dia.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se sugerir o estudo das duas tecnologias, porém analisando-se o sombreamento por área afetada. Esse estudo é interessante, visto que por conta da disposição das células, a eficiência do módulo é totalmente dependente da posição da

sombra. Em uma sombra que afeta uma string inteira, apenas um diodo bypass atua e as outras strings mantêm sua potência. Porém, caso a sombra afete uma parte de cada uma das 3 strings, como explicado anteriormente, a potência gerada ficará limitada à potência das células sombreadas, resultando assim em uma perda de potência considerável no módulo por completo.

Módulos bifaciais é uma temática bastante interessante, visto que estão tendo uma boa aceitação no mercado, visto o lançamento de novos modelos cada vez mais potentes. Como exemplo, o módulo Jinko Tiger Neo de 630Wp.

Além disso, pode-se estudar a tecnologia TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), que se trata de um túnel de óxido ultrafina com camada de silício dopado de fósforo, que promete ser um aprimoramento da tecnologia PERC.

6. REFERÊNCIAS

- ALVES, T. Different Techniques to Mitigate Partial Shading in Photovoltaic Panels. **Energies**, Lisboa, 27 Junho 2021. 25.
- CARTER, J. G. **Solar Energy and Solar Panels: Systems, Performance and Recent Developments**. New York: Nova, 2017.
- CHUNDURI, S. K. PERC Solar Cell Technology 2016, 2016.
- ENERGIA, A. Brasil alcança 10 GW de capacidade instalada. **Arigo Energia**, 2022. Disponível em: <<https://origoenergia.com.br/blog/>>. Acesso em: 17 Outubro 2022.
- GUO, S. A Quantitative Analysis of Photovoltaic Modules Using Halved Cells. **Hindawi Publishing Corporation**, Sinapore, 05 Agosto 2013. 9.
- ILES, P. A. Evolution of space solar cells. **Elsevier Science**, Don Julian, 2001.
- JINKO. Bifacial Module with Transparent Backsheet. **Jinko Solar**, 2022. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en>>. Acesso em: 05 Novembro 2022.
- KARDASHEV, N. S. Transmission of Information By Extraterrestrial Civilizations. **Soviet Astronomy - SJ**, Moscow, 12 Dezembro 1963. 5.
- KENNEDY, R. Solar Panels Power the James Webb Telescope. **PV Magazine**, 2022. Disponível em: <<https://pv-magazine-usa.com/>>. Acesso em: 28 Setembro 2022.
- KIM, A. K. Reexamination of Photovoltaic Hot Spotting to Show Inadequacy of the Bypass Diode. **IEEE Journal of Photovoltaics**, 2015. 7.
- LUQUE, A. H. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, v. 2 ed., 2011.
- MEDEIROS, L. T. P. **Proposta de Controle do Sistema de Geração de Energia Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica**. Universidade Federal do Ceará. Sobral, p. 74. 2019.
- MORETÓN, R. Experimental observations on hot-spots and acceptance/rejection criteria. **ScienceDirect**, Madrid, 07 Maio 2015.
- OLIVEIRA, L. S. D. O. Modelagem e Simulação de um Sistema Fotovoltaico em Matlab/Simulink. **Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Campina Grande**, Campina Grande, 2014.
- PINHO, J. T. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-DTE-CRESESB, 2014.
- QIAN, J. Analysis of Hotspots in Half Cell Modules Undetected by Current Test Standards. **IEEE Journal Photovoltaics**, Canberra, 04 Fevereiro 2019. 07.

RAMAPRABHA, R. A Comprehensive Review and Analysis of Solar Photovoltaic Array Configurations under Partial Conditions. **Photoenergy**, Hennai, 19 nov. 2011. 17.

SAMPAIO, J. A. Silício Grau Solar - Uma Revisão das Tecnologias de Produção. **Série Rochas e Minerais Industriais**, Rio de Janeiro, 2019.

SAUTHIER, L. F. **Modelagem Matemática de Módulos Fotovoltaicos Aplicados a Ambientes de Simulação de Geração Distribuída**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí - RS. 2019.

SHIRADKAR, N. **Effect of shading on the switching of bypass diodes in PV modules**. Solar Energy Research Institute of India and US (SERIUS). Clearlake Road. 2015.

SVARC, J. Solar Panel Construction. **Clean Energy Reviews**, 2020. Disponível em: <<https://www.cleanenergyreviews.info/>>. Acesso em: 22 set. 2022.

TABELING, C. P. **Introduction to Microfluidics**. Oxford: [s.n.], 2005.

VIEIRA, R. G. A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules. **Energies**, Mossoró, 06 Maio 2020. 21.

VILLALVA, M. Entenda os Módulos Fotovoltaicos Bifaciais. **Canal Solar**, Campinas - SP, 14 jul. 2019. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/modulos-fotovoltaicos-bifaciais/>>. Acesso em: 14 set. 2022.

VITORINO, M. A. Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias. **Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande**, Campina Grande, 2008.