

Cauã Melgarejo Mendonça

# **Análise de Rendimento de um Painel Fotovoltaico com o Vidro Danificado**

Alegrete, RS

5 de julho de 2017

Cauã Melgarejo Mendonça

## **Análise de Rendimento de um Painel Fotovoltaico com o Vidro Danificado**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Energias Renováveis, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon

Alegrete, RS

5 de julho de 2017

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M539a Mendonça, Cauã Melgarejo

Análise de Rendimento de um Painel Fotovoltaico com o Vidro  
Danificado por meio Computacional e Prático / Cauã Melgarejo  
Mendonça.

61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2017.

"Orientação: Giovani Guarienti Pozzebon".

1. Energia fotovoltaica. 2. Modelagem. 3. Fonte Renovável.  
I. Título.

**CAUÃ MELGAREJO MENDONÇA**

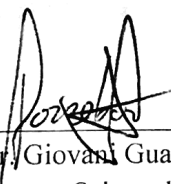
**ANÁLISE DE RENDIMENTO DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO COM O VIDRO  
DANIFICADO POR MEIO COMPUTACIONAL E PRÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.

Área de Concentração: Modelagem e Energia  
Renovável

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 21 de junho de 2017.

Banca examinadora:



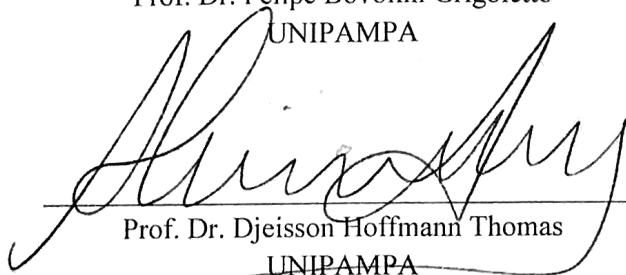
---

Prof. Dr. Giovanni Guarienti Pozzebon  
Orientador



---

Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Djeisson Hoffmann Thomas  
UNIPAMPA

*Dedico essa dissertação a minha esposa, família e amigos  
por todos os momentos em que me deram força para a conclusão  
do curso de engenharia elétrica.*

# Agradecimentos

Primeiramente gostaria de pedir desculpas. Desculpas a todos aqueles que amo e estiveram a minha volta nessa caminhada. Desculpas pelas noites que tive que passar estudando e deixando meus pais preocupados com minha alimentação e sono. Desculpas pelos dias "românticos" que tive com minha esposa tendo que estudar até tarde. Desculpa aos meus amigos pelas festas e churrascos que deixei de ir. Saibam que todas essas situações foram necessárias que hoje esse trabalho se tornasse real e vocês fazem parte de cada tijolinho dessa história.

Quantos aos agradecimentos, agradeço primeiramente a Deus pela capacidade física e mental que me foi dado para a conclusão desse trabalho.

Também agradeço aos meus pais Jefferson e Roselaine pelos incentivos e palavras de carinho que foram extremamente importantes nessa caminhada. Sem o seu apoio afetivo e financeiro seria impossível chegar a onde cheguei.

Agradeço a minha amada esposa Anielly, que acompanhou de perto a minha jornada acadêmica, que nos momentos bom e ruins esteve lá para me apoiar e aconselhar, divido inteiramente esse trabalho com ela.

Sou grato também ao meu irmão engenheiro eletricista Cauê, que esteve tão presente nos meus primeiros passos dados dentro do curso de engenharia elétrica, me mostrando "o caminho das pedras".

Obrigado a todos meus amigos, aqueles de infância e criados dentro da universidade. Que me acompanharam durante noites de estudo, resolução de exercícios e elaboração de trabalhos.

Por fim agradeço ao corpo docente e técnico da UNIPAMPA, ao meu orientador Giovani Guarienti Pozzebon que me guiou na elaboração desse trabalho e ao professor Guilherme Sebastião da Silva que me aconselhou no início desse projeto.

*Engenharia: Onde o filho chora e a mãe não vê.  
(Autor Desconhecido.)*

# Resumo

Nesse trabalho de conclusão de curso é apresentado um estudo de rendimento de um painel fotovoltaico com o seu vidro danificado. Este estudo foi realizado através de uma modelagem configurada no software *PSIM*® e experimentação prática. O trabalho foi dividido em duas etapas: análise de casos teóricos com diferentes intensidades de quebra do vidro da isolação física do painel, não considerando danos aos outros elementos do sistema (EVA, condutores e silício), diminuindo apenas a capacidade de absorção de irradiação solar das células fotovoltaicas e um aumento de temperatura sobre a mesma. A relação de queda da capacidade de absorção da irradiação solar foi estipulada em 50%, 60%, 75% e 100% e o aumento da temperatura em 5% referente ao medido em um painel de mesma estrutura física e elétrica exposto às mesmas condições de ambiente (inclinação, temperatura incidente, irradiação, reflexão). Posteriormente, foi estudada uma situação real de quebra de um painel fotovoltaico, onde esse foi disponibilizado pelo Grupo Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE) no qual sofreu uma queda da sua estrutura de fixação e danificou seu vidro, EVA e silício. Devido a impossibilidade de acesso a esses componentes internos e análise do real dano sofrido por eles, avaliou-se assim sua queda de rendimento considerando o comportamento de resistência elétrica nas quais as suas células danificadas exerceram sobre o arranjo do PV, aumentando sua temperatura e dissipando energia elétrica. Os resultados de ambas as análises feitas serviram para quantizar o quanto um sistema fotovoltaico deixa de produzir energia elétrica caso sofra algum dano físico em sua estrutura, aumentando assim o tempo de amortização do investimento em sua implementação.

**Palavras-chave:** Análise de rendimento, modelagem, energia fotovoltaica, vidro danificado.



# Abstract

In this final course assignment it is presented a performance study of a photovoltaic panel with its damaged glass. This analysis was made through a modeling carried out in the software *PSIM*® and practical experimentation. The work was divided in two steps: analysis of theoretic cases with different intensities of glass breakage of the physical isolation of the panel, not considering damages to other elements of the system (EVA, conductors and silicon), decreasing only the capacity of absorption of solar irradiation of the photovoltaic cells and a growth of the temperature on it. The relation of the falling ratio of absorption of solar irradiation was stipulated in 50%, 60%, 75% e 100% and the increase of the temperature in 5% referring to a panel measured in the same physical structure and electric exposed to the same conditions of environment (inclination, incident temperature, irradiation, reflexion). Posteriorly, was studied a real situation of breakage of a photovoltaic panel, which was disponibilized by the Grupo Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE) in which suffered a falling of its structure of fixation and damaged its glass, EVA and silicon. Due to the impossibility of access to these internal components and real analysis of the damaged suffered by them, was evaluated its fall in income taking into account the behaviour of electric resistance in which its damaged cells have exercised over the arrangement of the PV, increasing its temperature and dissipating electric energy. The results of both analysis served to quantize how much a photovoltaic system stops producing electric energy if it suffers any physic damage in its structure, increasing then the time of amortization of the investment in its implementation.

**Key-words:** performance study, modeling, photovoltaic energy, damaged glass.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Participação de fontes renováveis na produção de energia elétrica mundial.	14
Figura 2 – Radiação solar global horizontal média anual.	18
Figura 3 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	21
Figura 4 – Atuação do diodo de <i>by-pass</i> em um painel fotovoltaico com uma das células sombreada.	25
Figura 5 – Comportamento da curva $V \times I$ conforme a intensidade de sombreamento de uma célula fotovoltaica.	25
Figura 6 – Exemplo de um sistema com diodo de bloqueio e diodo de bypass.	26
Figura 7 – Camadas de um módulo fotovoltaico com encapsulamento em EVA	28
Figura 8 – Variação de tensão e corrente conforme a modificação de irradiação incidente.	29
Figura 9 – Representação dos ângulos para determinação da inclinação do PV.	30
Figura 10 – Corrente-Tensão do painel fotovoltaico KD210GX-LP conforme variação da irradiação.	32
Figura 11 – Corrente-Tensão do painel fotovoltaico KD210GX-LP conforme variação da temperatura.	33
Figura 12 – Modelo funcional de um painel fotovoltaico utilizado no PSIM.	36
Figura 13 – Modelo físico de um painel fotovoltaico utilizado no PSIM.	37
Figura 14 – Dados do painel fotovoltaico modelado.	39
Figura 15 – Parâmetros do modelo simulado.	40
Figura 16 – J-box do painel fotovoltaico sem a presença de diodo de <i>bypass</i> .	41
Figura 17 – Arranjo dos PV na estrutura de medição.	42
Figura 18 – Diferentes níveis de danos existentes no painel fotovoltaico.	43
Figura 19 – Distribuição de temperatura sob as placas fotovoltaicas.	44
Figura 20 – Gráfico da queda de potência conforme o número de células afetadas pelo dano.	46
Figura 21 – Gráfico da queda de potência conforme o número de células afetadas pelo dano.	47
Figura 22 – Gráfico da queda de potência conforme o número de células afetadas pelo dano.	49
Figura 23 – Gráfico da queda de potência conforme o número de células afetadas pelo dano.	50
Figura 24 – Comparativo de potência gerada nos diferentes tipos de queda de absorção da irradiação.	52
Figura 25 – Pontos com maior severidade de impacto.	53
Figura 26 – Modelagem do arranjo com 54 células fotovoltaicas	55

Figura 27 – Comportamento do painel fotovoltaico com a inoperância de 13 células e redução de 50% de absorção da irradiação. . . . .	56
Figura 28 – Representação do sistema utilizado para determinar a resistência total série ( $R_{T_s}$ ) correspondentes ao número de células danificadas. . . . .	57
Figura 29 – Parâmetros encontrados de tensão, corrente e potência ao associarmos uma resistência devido aos danos do PV. . . . .	58

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Vidro com redução de 50% na capacidade de absorção. . . . .	45
Tabela 2 – Vidro com redução de 60% na capacidade de absorção. . . . .	47
Tabela 3 – Vidro com redução de 75% na capacidade de absorção. . . . .	48
Tabela 4 – Vidro com redução de 100% na capacidade de absorção. . . . .	50
Tabela 5 – Resultados Práticos Obtidos . . . . .	54

# Sumário

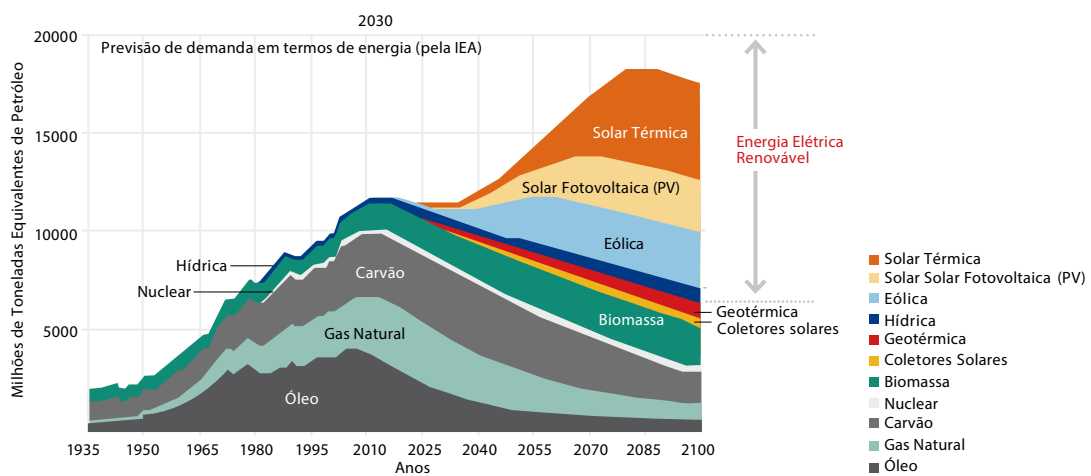
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>17</b>
2.1	Panorama geral da energia fotovoltaica no Brasil e mundo	17
2.1.1	Crescimento da energia fotovoltaica	17
2.1.2	Tipos de conexão a rede elétrica	18
2.1.2.1	On-Grid	19
2.1.2.2	Off-Grid	19
2.1.2.3	On/Off-Grid	19
2.2	Radiação global	20
2.2.1	Efeito fotovoltaico	20
2.2.2	Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	21
2.2.3	Polarização inversa diodo	22
2.3	Módulo fotovoltaico	22
2.3.1	Célula fotovoltaica	22
2.3.1.1	Silício (Si) multicristalino	24
2.3.1.2	Filmes finos	24
2.3.2	Diodo de Bypass e bloqueio	24
2.3.3	Características construtivas dos módulos fotovoltaicos	26
2.3.4	Características elétricas dos módulos fotovoltaicos	28
2.3.4.1	Tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito	28
2.3.4.2	Curva $V \times I$	29
2.4	Análise das características locais para a geração de energia fotovoltaica	30
2.4.1	Definição do ângulo de inclinação	30
2.4.2	Influência da temperatura irradiação e resistência no rendimento do PV	31
2.4.2.1	Variação de irradiação	31
2.4.2.2	Análise matemática da absorção de irradiação	32
2.4.2.3	Variação de temperatura	33
2.4.2.4	Análise matemática da absorção da temperatura	34
2.4.3	Variação da resistência de carga	34
2.4.4	Sombreamentos	35
2.5	Modelagem de sistema fotovoltaico por meio de software PSIM	35
2.5.1	Modelo Funcional	36
2.5.2	Modelo Físico	37
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>38</b>
3.1	Metodologia	38

3.2	Implementação de casos . . . . .	44
3.2.1	Painel com redução de 50% de absorção de irradiação . . . . .	45
3.2.2	Painel com redução de 60% de absorção de irradiação . . . . .	46
3.2.3	Painel com redução de 75% de absorção de irradiação . . . . .	48
3.2.4	Painel com redução de 100% de absorção de irradiação . . . . .	49
3.2.5	Comparativo de resultados . . . . .	51
3.3	Implementação prática da modelagem do PV . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>59</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>61</b>

# 1 Introdução

Atualmente, a comunidade científica tem buscado desenvolver pesquisas relacionadas a novas fontes de energia elétrica nas quais não poluam o meio ambiente. Os combustíveis fósseis são os mais utilizados no cenário mundial para a produção de energia elétrica, embora outros países tenham uma malha energética menos agressiva, como o Brasil com a fonte hídrica, sendo os combustíveis fósseis grandes causadores de problemas ambientais, como por exemplo o efeito estufa e chuvas ácidas. Já existem diversas normativas e empenhos governamentais que buscam controlar esses efeitos, porém ainda são muito agressivos a natureza. Com isso, existe uma nova tendência mundial de explorar novas fontes geradoras de energia elétrica nas quais os seus efeitos colaterais sejam mínimos a natureza. A figura 1, demonstra essa tendência de mudança de matriz energética no mundo, onde demonstra que no ano de 2030 haverá um crescimento significativo das fontes solares e eólicas na matriz energética mundial (AGENCY, 2007).

Figura 1 – Participação de fontes renováveis na produção de energia elétrica mundial.



Fonte: (AGENCY, 2007)

Dentre essas fontes abordadas, destaca-se a energia fotovoltaica, na qual é capaz de produzir energia através da irradiação solar (CTES, 2004). O sol fornece cerca de  $1,5 \times 10^8$  kWh de energia radiante incidente sobre a terra, correspondendo a 10.000 vezes o consumo da terra. Embora os rendimentos dos painéis fotovoltaicos (PV) estejam entre 8% a 20%, seria necessário cobrir apenas 0,1% da superfície terrestre para conseguirmos abastecer toda a necessidade mundial de energia elétrica (LUQUE, 2002).

Para se desenvolver qualquer estudo sobre fontes de geração elétrica, faz-se necessário a modelagem do sistema de geração, um esquemático que ditará como ele se comportará quanto submetido a modificações do seu funcionamento normal. Com o sistema modelado,

consegue-se entender melhor os fatores nos quais aumentam ou diminuem o rendimento da unidade geradora, podendo assim torna-lo mais eficiente. Quando se apresenta uma das entradas de alimentação do sistema diminuída ou interrompida, como por exemplo, a diminuição do vento na geração eólica ou do sombreamento de um painel fotovoltaico na geração solar, isto faz com que o rendimento elétrico caia e torne o empreendimento pouco rentável ou inviável. Com isso, esse trabalho é justificado pela necessidade de entendermos tal comportamento para que assim possamos determinar a real queda de rendimento em uma placa defeituosa e assim perceber o impacto que ela pode causar quando conectada a uma usina solar, por exemplo (JEON, 2011).

A primeiro passo desse trabalho foi entender o comportamento da placa danificada ao expô-la ao sol e ver como se daria o aumento de temperatura sob a mesma e quanto seria a queda de absorção de irradiação pelas células fotovoltaicas.(KYOCERA, 2017) Tal passo é de fundamental importância para desenvolver assim a sua modelagem. Para saber determinar a irradiação no local, fez-se uso de um solarímetro da empresa **ICEL MANAUS** modelo **SP-2000**. Já para determinarmos a temperatura sob a célula fotovoltaica, optou-se utilizar uma câmera térmica devido a velocidade e facilidade de manuseio. Para a obter a corrente e tensão gerado pelo painel fotovoltaico (PV), posicionou-se um osciloscópio junto a uma carga conectada à saída do PV. Todos os equipamentos de medição adotados tem um erro menor que 1%, assegurando assim a confiabilidade dos valores medidos.

Com os dados obtidos pelas medições, utilizou-se a ferramenta de simulação **PSIM** modelar a placa danificada. O software utilizado apresenta um modelo real de PV, necessitando acrescentar os dados de placa do PV. Encontrou-se certa dificuldade para obter as *Resistências Série* e *Resistência Shunt* do painel pois esses não eram informados pelo fabricante, sendo necessário assim obtê-las através de testes práticos (GABOR, 2015). Com o PV já modelado no **PSIM**, optou-se por arranjar o modelo como se fossem células fotovoltaicas, associando-as todas em série como é feito no painel fotovoltaico analisado. Essa manobra tem por objetivo verificar individualmente como se comporta a absorção da irradiação e temperatura em cada uma das células. Como o painel fotovoltaico apresenta 54 células fotosensíveis associados em série, não obteríamos um resultado tão exato se utilizássemos uma temperatura e irradiação média sob o painel.(CTES, 2004).

Este documento tem por objetivo principal modelar e obter as curvas Tensão x Corrente ( $V \times I$ ) de geração de um painel fotovoltaico com o vidro quebrado, tendo como parâmetros de referência um painel do mesmo modelo em perfeitas condições . Essa análise é de extrema complexabilidade devido a irregularidade das rachaduras apresentadas no painel fotovoltaico danificado. Isso faz com que a análise para determinar a absorção da irradiação solar pelas células e a característica da temperatura sob a mesma, seja de difícil realização (PINHO, 2014).

Esse trabalho está estruturado por uma revisão bibliográfica contextualizando a



evolução e importância da energia fotovoltaica e entendendo a forma de obtenção de energia elétrica por meio da mesma. Após, é mostrado um estudo de caso teórico, no qual tem por objetivo criar diferentes cenários de intensidade de quebra de vidro. Por fim, é estudado um caso real de quebra de PV, onde é analisado todos os fatores físico que interferem na geração do mesmo.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Panorama geral da energia fotovoltaica no Brasil e mundo

#### 2.1.1 Crescimento da energia fotovoltaica

Atualmente a energia solar vem crescendo no cenário mundial, tendo como líderes no ranking de geração de energia China, Estados Unidos e Alemanha, esta que até 2014 era a líder mundial. Esses países até final de 2015 tinham uma potência instalada de 234 GW, correspondendo a 68% da produção mundial (BRASIL, 2016).

Essa perspectiva tende a crescer segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), podendo corresponder a 11% da produção mundial de energia solar mundial em 2050, com uma geração de 5 mil TWh (AGENCY, 2011).

Já o Brasil está acompanhando esse crescimento, onde segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2024, no ano de 2018 estaremos entre os vinte maiores países com potência instalada de energia solar contando com cerca de 2,6 GW. Há a perspectiva também que no ano de 2024 a potência instalada no Brasil será de 8300 MW, sendo 1300 MW de geração distribuída e 7000 MW de descentralizada, correspondendo a 1% da matriz energética nacional (BRASIL, 2015).

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, visando incentivar a produção independente de energia solar lançou no ano de 2012 uma nova resolução, RN 482/12, esta sendo atualizada pela RN 687/2015, onde estabelece uma compensação de energia, onde permite ao consumidor gerar sua própria energia elétrica e injetar o seu excedente diretamente a rede elétrica de distribuição (ANEEL, 2012). Com isso, o cliente ganha créditos junto a concessionária de energia, podendo abater esse valor em sua conta no final do mês.

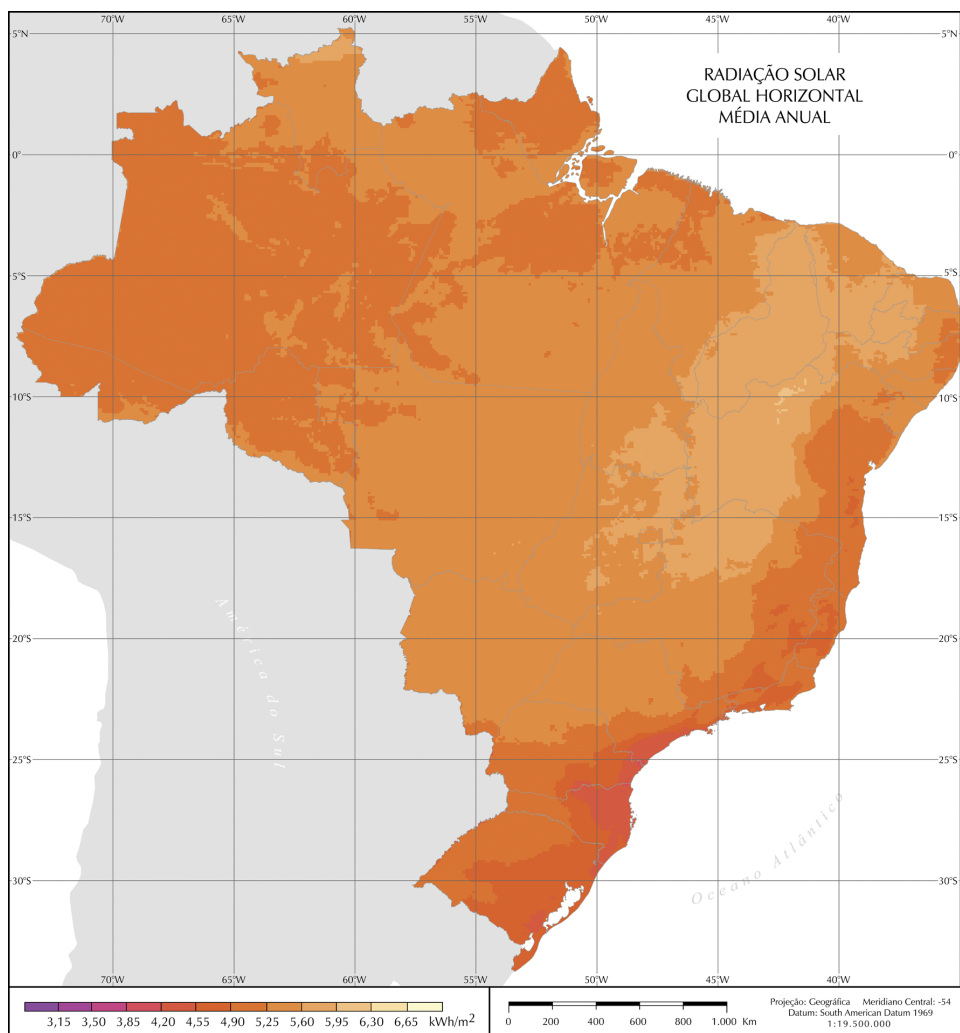
Com essa resolução, o número de empresas especializadas na instalação de sistemas fotovoltaicos tem crescido rapidamente no Brasil, estimulando pesquisas em novos produtos, tornando assim mais baratos e competitivos os preços para instalar um sistema fotovoltaico em uma residência.

Analisando o Atlas Brasileiro de Energia Solar, percebe-se a grande incidência de irradiação solar em todo o Brasil (PEREIRA et al., 2006). O local com melhor incidência média anual de irradiação solar é de 6,5 KWh/m<sup>2</sup> e fica no estado da Bahia, próximo ao Piauí. Já o local com menor incidência de irradiação média anual solar global é de 4,25 KWh/m<sup>2</sup>, localizado no norte do estado de Santa Catarina. Já a irradiação média

diária no território brasileiro varia de 1500-2500 KWh/m<sup>2</sup>. Se compararmos esses valor com outros grandes países na União Europeia percebemos, por exemplo, que no melhor cenário de irradiação solar na Alemanha (900-1250 kWh/m<sup>2</sup>) é inferior ao pior cenário no Brasil. Esse comparativo mostra o quanto tempos a crescer nesse setor ainda.

Na Figura 2 é representado a irradiação média global em todo território brasileiro.

Figura 2 – Radiação solar global horizontal média anual.



Fonte: (PEREIRA et al., 2006)

### 2.1.2 Tipos de conexão a rede elétrica

Existe três diferentes maneiras de conexão dos sistema fotovoltaico a rede elétrica: On-Grid, Off-Grid e On/Off-Grid.

### 2.1.2.1 On-Grid

Sistema conectado a rede de distribuição elétrica, no qual a energia gerada pela fonte é transmitida diretamente a concessionária.

### 2.1.2.2 Off-Grid

Sistema desconectado de rede de distribuição elétrica, onde toda a energia gerada é consumida ou armazenada em baterias.

### 2.1.2.3 On/Off-Grid

Sistema conectado a rede de distribuição elétrica e a um sistema de armazenamento, onde atua de maneira bilateral carregando e exportando o excedente de energia produzida.

Atualmente o sistema mais usado é o On-Grid, no qual o montante investido inicialmente é menor que os demais. Essa conexão encaixa-se como uma geração distribuída, este regulamentado pela Resolução Normativa 678 da ANEEL, variando de Microgeração distribuída (Potência instalada menor ou igual a 100 kW) à Minigeração distribuída (potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 5 MW) (NAKABAYASHI, 2015).

A geração distribuída (GD) consiste em pequenas unidades geradoras próximas aos locais de consumo. Sendo elas comumente instaladas em residências, vilarejos nas quais o sistema de distribuição de energia elétrica seja de difícil acesso. Esse tipo de geração vem aumentando exponencialmente a medida em que fontes renováveis (eólica, solar e biomassa) vem ganhando força.

Segundo (TR; AC, 2016), no ano de 2015 o preço cobrado por sistema instalado no Brasil foi de R\$ 8,58 reais por Watt. Ou seja, para instalar um sistema residencial de 3kWp o preço seria de R\$ 25.740,00. Esse valor a cada ano tende a ser menor, como por exemplo no cenário internacional onde no ano de 2008 o preço era de US\$ 3,5 por Watt e em dezembro de 2009 caiu para US\$ 2 por Watt, esses valores referentes a cotação média no no de 2008 e 2009.

O sistema de geração distribuída por fonte fotovoltaica apresenta uma boa vantagem quando se trata da qualidade do sistema elétrico de um país. Tendo como destaque os seguintes itens: (RÜTHER, 2004):

- Diminuição das perdas elétricas dos sistemas de transmissão e distribuição, haja visto que a unidade geradora está próxima a unidade consumidora;
- não necessidade de ampliação ou construção de novas linhas de transmissão;
- redução dos impactos ambientais se comparada as fontes hídricas e de origem fóssil;
- não necessita de grandes áreas para instalação da unidade geradora;

- rápida instalação, podendo suprir de maneira imediata a necessidade de carga de determinada unidade de carga.

Além das vantagens para o sistema elétrico nacional, o consumidor tende a ganhar com a instalação de sistemas fotovoltaicos. Em primeiro lugar há uma contribuição social por ser uma fonte limpa, sem emissão de poluentes e nem ruídos, contribuindo para o bem-estar do planeta. Outro fator importante é o retorno financeiro, onde o consumidor não sofre com os aumentos das tarifas de energia feitas pelas concessionárias. Também é importante salientar que a construção de um sistema fotovoltaico é rápido se comparado as demais fontes de geração elétrica, tornando o gasto com mão de obra mais barato. Devido sua simplicidade na montagem, também é de fácil manutenção, podendo manter assim o equipamento em alto rendimento.

## 2.2 Radiação global

Anualmente a incidência de energia solar na terra corresponde a  $1,5 \times 10^9$  TWh, valor equivale a 10.000 vezes o consumo mundial de energia no ano. O sol além de ser essencial para a vida na terra, também é uma grande fonte energética a ser explorada. Suas formas de conversão de energia podem ser tanto de maneira elétrica com painéis fotovoltaicos, geração heliotérmica por meio de espelhos direcionados e também térmica com células de aquecimento solar.

A conversão de energia solar em elétrica é feita por meio de células fotovoltaicas, elementos feitos basicamente de materiais semicondutores nas quais são excitados através dos raios solares, produzindo uma diferença de potencial nos seus terminais. A irradiação solar também pode ser usada na conversão de calor, essa sendo capaz de gerar energia através de uma turbina.

### 2.2.1 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico foi analisado primeiramente pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel no ano de 1839 em um experimento onde imergiu um eletrodo em um líquido condutor e observou a existência de uma corrente elétrica ao incidir radiação solar. Já no ano de 1883 foi construído a primeira célula fotovoltaica por Chales Fritts, onde revestiu selênio com uma camada de ouro. Esse dispositivo teve uma porcentagem de rendimento de apenas 1%.

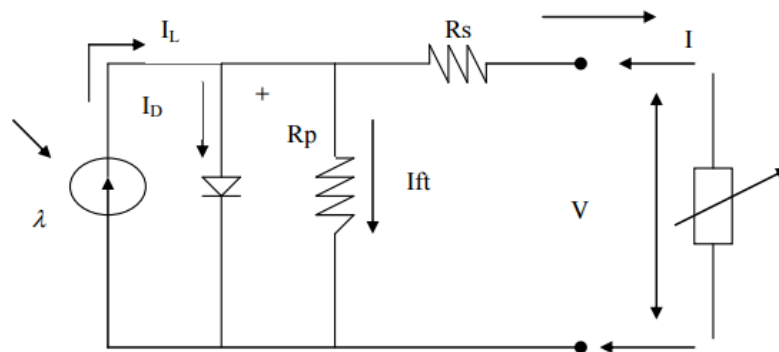
De maneira simplificada as células fotovoltaicas funcionam na seguinte sequência:

1. Os fótons provenientes dos raios solares atingem o módulo solar e são absorvidos pelo material semicondutor, como por exemplo o silício.
2. A incidência de um fóton com energia maior do que a energia do *gap* do material semicondutor (junção p-n) excita um elétron a migrar da banda de valência para a banda de condução e dando origem aos pares de elétron-buraco, também conhecidos como fotoportadores. Esses fotoportadores são gerados na região de depleção e um campo elétrico resultante da polarização reversa da junção acelera os elétrons e buracos em direção opostas para o circuito externo, sendo cada par elétron/buraco coletado dá origem a um elétron de fotocorrente externa.
3. Essas células fotovoltaicas separadamente geram uma quantidade de energia elétrica relativamente baixa. Assim, elas são associadas em série, compondo um módulo fotovoltaico. Esse produz uma quantidade útil de eletricidade.

### 2.2.2 Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica

O circuito equivalente corresponde a uma célula fotovoltaica quando submetida a irradiação solar é descrita na Figura 3.

Figura 3 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: (FADIGAS, 2012)

Onde os elementos assinalados na Figura são:

- $I_L$  - É a corrente gerada pela incidência de irradiação;
- $I_D$  - é a corrente de saturação do diodo;
- $I_{ft}$  - corrente de fuga para terra (desprezível devido  $R_{shunt}$  se elevado);
- $I$  - corrente resultante do painel;
- $R_p$  - resistência shunt;

- $R_s$  - resistência série;

Desta maneira, a corrente de um painel fotovoltaico pode ser descrita para equação 2.1, onde a sua corrente total é a corrente gerada pelas células fotovoltaicas menos a corrente de saturação do diodo.

$$i_{pv} = i_{célula} - i_D \quad (2.1)$$

### 2.2.3 Polarização inversa diodo

Em casos mais severos de sombreamento das células os diodos sofrem polarização inversa. Quando a corrente sobre a carga for maior que a da carga, o diodo da célula sombreada está polarizado diretamente, não oferecendo riscos a célula.

Porém caso a corrente da célula sombreada for menor que a corrente de carga, então a corrente drenada pelo diodo será a produzida menos a corrente da carga, tornando-se assim com relação as demais, negativa, gerando uma polarização inversa. Nesse situação a célula configurar-se-á como uma carga elétrica podendo danificar-se.

## 2.3 Módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é a unidade inicial de um sistema. Este é formado por células fotovoltaicas comumente associadas em série para produzir tensão e corrente suficientes para suprir a energia de determinada planta. Esse arranjo é essencial ser feito, haja visto que a tensão gerada por uma célula gira em torno de 0,4 V com uma corrente na casa de miliamperes. Deve-se tomar cuidado com o arranjo dessas células pois uma única unidade com defeito na associação série, comportar-se-á como uma carga para as demais ligadas à ela.

### 2.3.1 Célula fotovoltaica

As células fotovoltaicas é o menor componente do sistema, ela equivale-se as células do corpo humano. Ela é composta de elementos semicondutores no qual faz a conversão de energia solar em energia elétrica.

Os semicondutores mais indicados para utilização em sistemas fotovoltaicos são aqueles mais sensíveis a luz, ou seja, aqueles capazes de gerar o máximo de tensão e corrente em uma determinada irradiação. Para a transformação do material semicondutor em uma célula fotovoltaica o mesmo passa por diversos processos químicos e físicos. Inicialmente é feita uma etapa de purificação onde na sequência é feita a etapa de dopagem, adicionando

impurezas de maneira controlada.

Os principais tipos de células fotovoltaicas são:

- Silício (Si) monocristalino

Silício monocristalino é o mesmo material utilizado nos circuitos implementados na microeletrônica. Nesse tipo de célula, elas são formadas por uma fatia de um único cristal, devido ser uma tecnologia bem explorada, o processo de purificação e moldagem do cristal é bem eficiente, dando confiabilidade ao produto e uma alta eficiência. Em laboratório sua eficiência chega a 27%, já na prática esse valor varia de 12% a 16%. Sua produção apresenta um custo elevado mesmo sendo produzido em grandes quantidades (NASCIMENTO, 2004).

- Silício (Si) multicristalino:

Silício multicristalino são formadas pelo mesmo material, porém não é utilizado um único cristal e sim um bloco composto por vários pequenos cristais onde ao uni-los é formada as fatias das células. Devido a existência de interfaces entre os cristais, seu rendimento em laboratório acaba caindo um pouco porém em valores práticos ele se aproxima do de monocristalino. Sua vantagem é apresentar uma baixa necessidade de energia em sua produção (NASCIMENTO, 2004).

- Filmes finos:

As células de filme fino é a mais nova dentre as três, onde sua aplicação é recente. Ela consiste em produzir energia fotovoltaica através de pouco material semicondutor, sendo produzido de maneira passiva possibilitando sua construção em larga escala, diminuindo assim o seu custo final.

Dentre os principais materiais utilizados nessa área, destacam-se o disseleneto de cobre e índio (CIS), telureto de cádmio (CdTe) e silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), este último com maior implementação. Com esse material é possível criar módulos fotovoltaicos mais finos, resistentes e capazes de se moldar a estruturas, como por exemplo telhados de casas (NASCIMENTO, 2004).

#### Silício (Si) monocristalino

Silício monocristalino é o mesmo material utilizado nos circuitos implementados na microeletrônica. Nesse tipo de célula, elas são formadas por uma fatia de um único cristal, devido ser uma tecnologia bem explorada, o processo de purificação e moldagem do cristal é bem eficiente, dando confiabilidade ao produto e uma alta eficiência. Em



laboratório sua eficiência chega a 27%, já na prática esse valor varia de 12% a 16%. Sua produção apresenta um custo elevado mesmo sendo produzido em grandes quantidades (NASCIMENTO, 2004).

### 2.3.1.1 Silício (Si) multicristalino

Silício multicristalino são formadas pelo mesmo material, porém não é utilizado um único cristal e sim um bloco composto por vários pequenos cristais onde ao uni-los é formada as fatias das células. Devido a existência de interfaces entre os cristais, seu rendimento em laboratório acaba caindo um pouco porém em valores práticos ele se aproxima do de monocristalino. Sua vantagem é apresentar uma baixa necessidade de energia em sua produção (NASCIMENTO, 2004).

### 2.3.1.2 Filmes finos

As células de filme fino é a mais nova dentre as três, onde sua aplicação é recente. Ela consiste em produzir energia fotovoltaica através de pouco material semicondutor, sendo produzido de maneira passiva possibilitando sua construção em larga escala, diminuindo assim o seu custo final.

Dentre os principais materiais utilizados nessa área, destacam-se o disseleneto de cobre e índio (CIS), telureto de cádmio (CdTe) e silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), este último com maior implementação. Com esse material é possível criar módulos fotovoltaicos mais finos, resistentes e capazes de se moldar a estruturas, como por exemplo telhados de casas (NASCIMENTO, 2004).

## 2.3.2 Diodo de Bypass e bloqueio

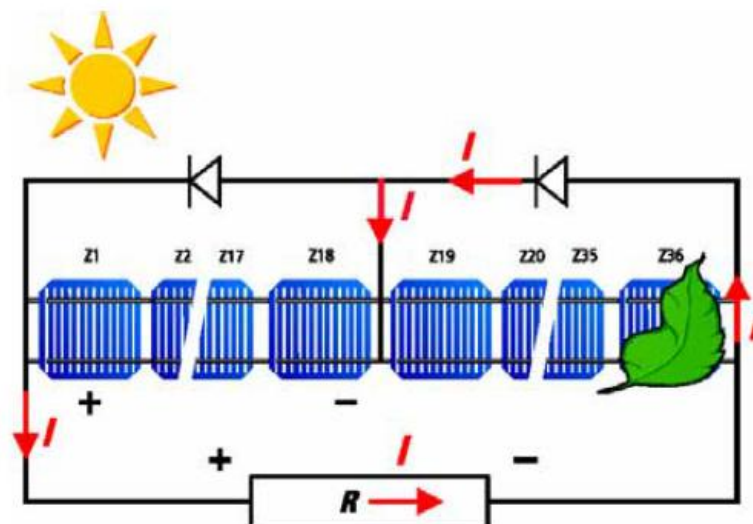
Atualmente os painéis fotovoltaicos apresentam dois diferentes tipos de proteção.

O primeiro é a utilização de diodo de *by-pass*. Esse que tem a função de isolar regiões do painel fotovoltaico que estiverem sobre influência de sombreamento severo. Ele funciona da seguinte maneira: Quando a célula fotovoltaica é encoberta, ela se torna inversamente polarizada, atuando assim como uma carga elétrica. Esse liberando calor podendo até ser prejudicial ao sistema. O diodo de *by-pass* então é colocado em antiparalelo a célula, desviando a corrente elétrica sobre o ponto sombreado ou danificado, ou seja as células são distribuídas em setores que compõe o painel.

Idealmente, deve ser utilizado um diodo para cada célula fotovoltaica que compõe o painel, havendo um controle de manobra maior, porém os fabricantes utilizam de 2 à 4 diodos, dividindo assim o painel em diferentes módulos a serem isolados em caso de

sombreamento. Na Figura 4 é exemplificado o caminho da corrente elétrica por meio do diodo de *bypass* quando a mesma é parcialmente sombreada.

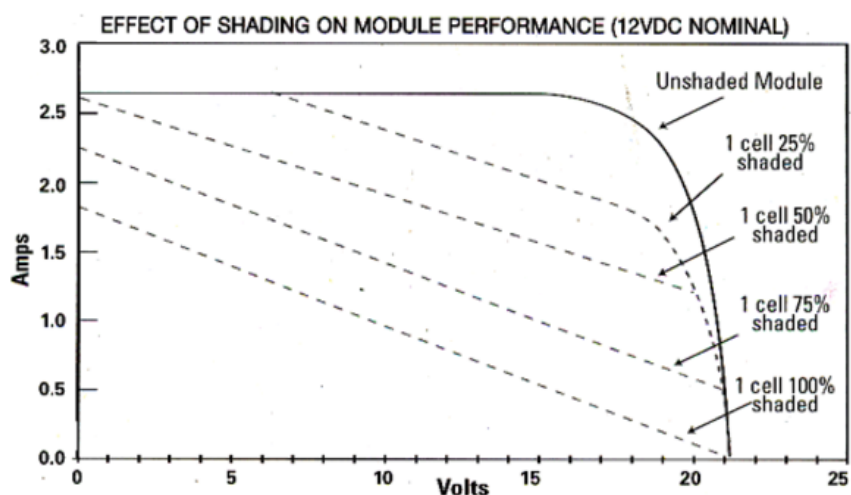
Figura 4 – Atuação do diodo de *by-pass* em um painel fotovoltaico com uma das células sombreada.



Fonte: (GREENPRO, 2004)

Devido a essa manobra que isola parte do painel fotovoltaico, o comportamento da tensão final produzida pelo painel fotovoltaico é expressa na Figura 5, representando diferentes intensidade de sombreamento.

Figura 5 – Comportamento da curva  $V \times I$  conforme a intensidade de sombreamento de uma célula fotovoltaica.

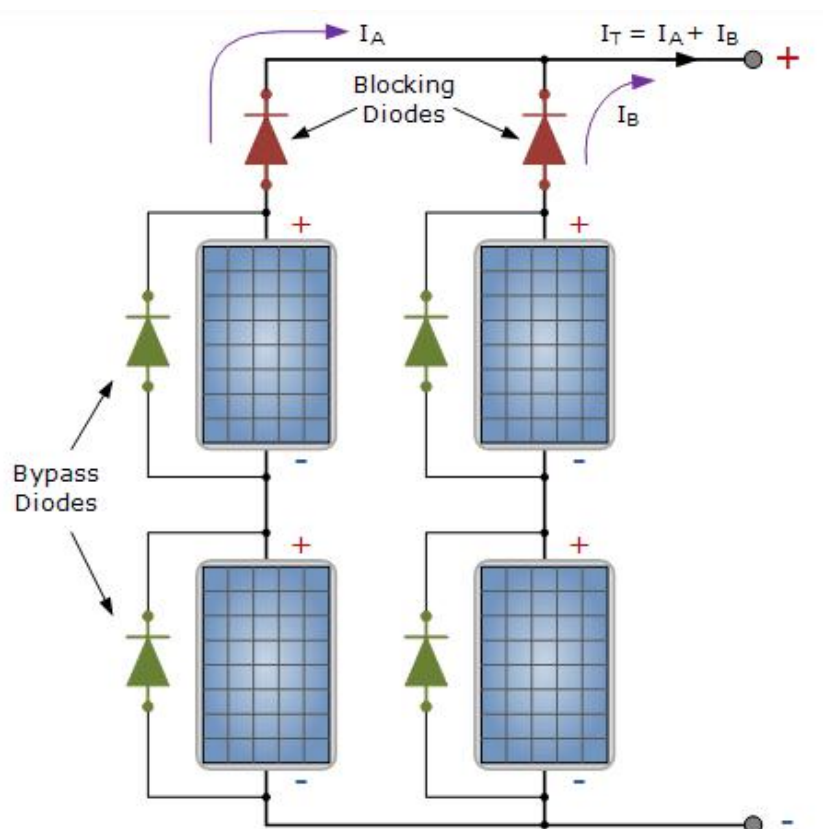


Fonte: (SOLAR, 2017)

Outro sistema de diodos utilizado em painéis fotovoltaicos são diodos de bloqueio. Esses são instalados entre os arranjos de painéis afim de evitar que correntes reversas adentrem nos painéis fotovoltaicos, danificando-os.

O exemplo de sistema implementando os dois tipos de proteção é exemplificado na Figura 6.

Figura 6 – Exemplo de um sistema com diodo de bloqueio e diodo de bypass.



Fonte: (TUTORIALS, 2016)

### 2.3.3 Características construtivas dos módulos fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico apresenta duas características construtivas importantes. Quanto a geometria de suas células e seu encapsulamento.

#### Geometria das Células

O rendimento de um módulo está diretamente associado a quantidade de células fotovoltaicas possíveis em sua área. Usualmente elas podem ser quadradas ou redondas, na qual a quadrada é possível alocar um maior número de células do que a redonda, porém a redonda não sofre perda de material devido a forma cilíndrica do silício monocristalino.

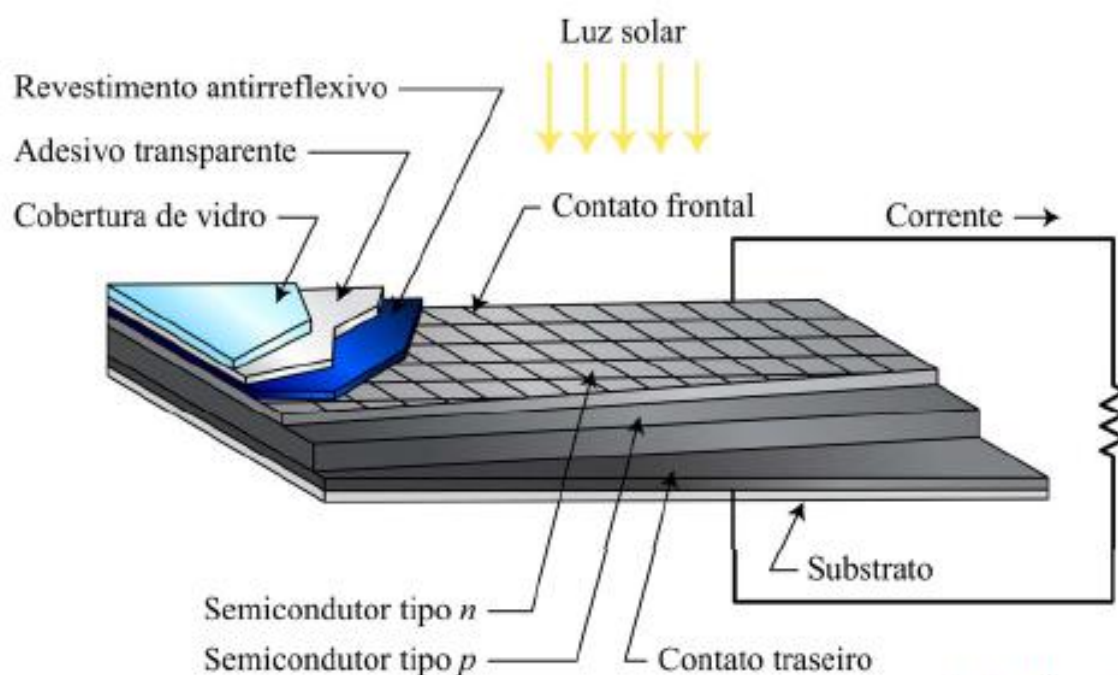
#### Encapsulamento das células

Para a proteção mecânica e também elétrica da célula, a mesma é encapsulada, onde para a estabilização da estrutura, o material é associado a um substrato, na maioria das vezes vidro. Esse material deve ter uma alta capacidade de penetração de irradiação solar, caso contrário diminuiria a rentabilidade do módulo. Normalmente o vidro utilizado tem um baixo teor de ferro no qual permite a absorção de aproximadamente 91% da luz. Existem três tipos de encapsulamento:

1. **Encapsulamento EVA:** Nesse processo as células são expostas a uma pressão negativa, enquanto há um aumento da temperatura. Em dado momento o EVA derrete e circunscreve a célula completamente
2. **Encapsulamento Teflon:** Nesse encapsulamento os processos são semelhantes ao anterior porém o elemento usado para envolver a célula é o fluoropolímero, material no qual ao secar, não necessita da camada de vidro para uma proteção física frontal. Ele também apresenta uma alta capacidade de translucidez.
3. **Encapsulamento em resina fundida:** Para realizar o encapsulamento por resina fundida, as células são prensadas por duas camadas de vidro. A frontal sendo um vidro transparente e a traseira um vidro escuro. Após sua fixação, a resina é aplicada e envolve todas as células. Esse processo é vantajoso pois não há deslocamento da posição das células, assegurando uma simetria correta.

Para se entender melhor a estrutura do módulo fotovoltaico, na Figura 7 é demonstrado um sistema com encapsulamento em EVA.

Figura 7 – Camadas de um módulo fotovoltaico com encapsulamento em EVA



Fonte: (DUPONT, 2014)

### 2.3.4 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Todo painel fotovoltaico apresenta características e tensão e corrente nominais e também tensão de corrente aberto e corrente de curto-circuito. Essas grandezas expressam a potência máxima na qual o painel irá trabalhar.

#### 2.3.4.1 Tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito

Para determinarmos a tensão de circuito aberto, utiliza-se um voltímetro nos terminais positivos e negativos do módulo. Este deve estar sem nenhuma conexão com qualquer carga, não havendo assim corrente fluindo. Esse é chamado de Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ).

Já a corrente é determinada por um amperímetro, onde sem o módulo estar conectado a carga, ligam-se seus terminais gerando uma corrente chamada de Corrente de Curco-circuito ( $I_{sc}$ ).

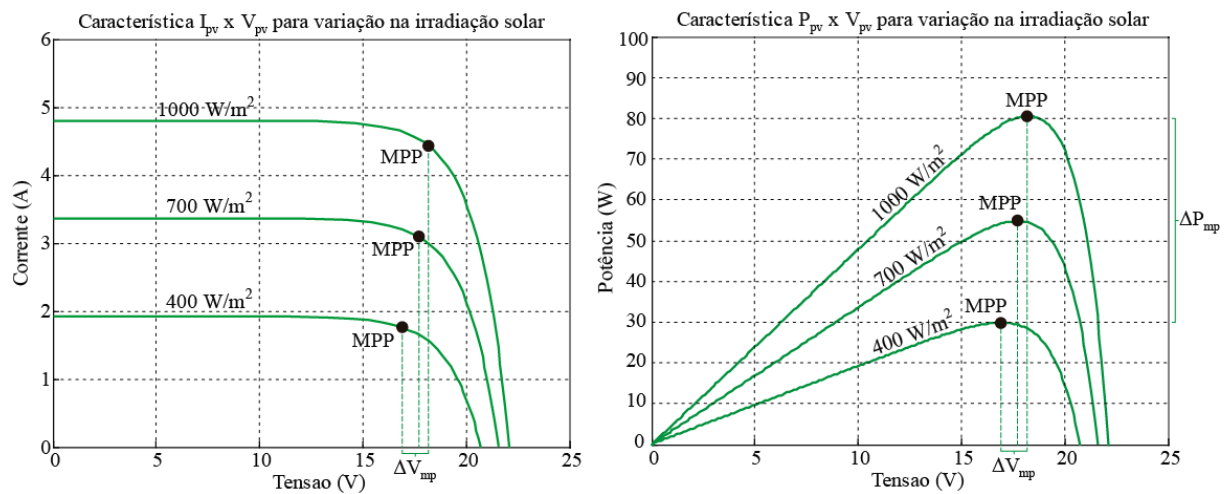
Esses dados são retirados com uma irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

### 2.3.4.2 Curva VxI

Ao determinar a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito nas condições de irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , condições essas padronizadas nos testes dos fabricantes, é possível determinar a potência do módulo fotovoltaico. Ou seja, conforme a variação de tensão ou corrente, há uma potência correspondente.

Na Figura 8 é demonstrada uma curva VxI de um módulo para diferentes irradiações.

Figura 8 – Variação de tensão e corrente conforme a modificação de irradiação incidente.



Fonte: (DUPONT, 2014)

Na Figura 8 é mostrado também os pontos de máximo potência, estes variado conforme a incidência de irradiação solar.

## 2.4 Análise das características locais para a geração de energia fotovoltaica

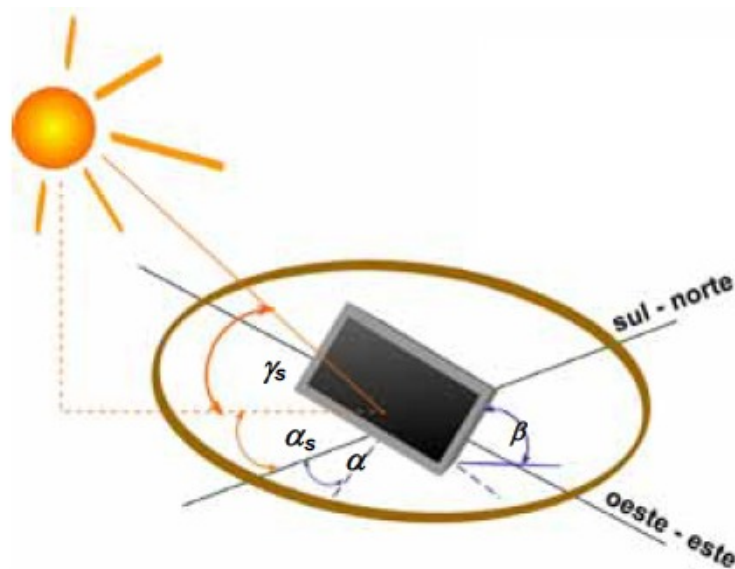
Existe diversos fatores do módulo fotovoltaico e externos que interferem no rendimento do equipamento. Dentre as principais são:

### 2.4.1 Definição do ângulo de inclinação

Deve-se haver um conhecimento do posicionamento do sol durante o decorrer do dia, determinando em primeiro lugar a latitude a ser instalada o PV. Isso faz com que a inclinação do painel seja feita afim de receber uma maior irradiação solar diária. Para isso, utiliza-se as orientações de direção da rosa dos ventos, norte, sul, leste e oeste, onde cada um representa uma componente angular com relação ao sol.

Adotando  $\alpha = 0^\circ$  para a direção Sul e Norte,  $\alpha = -90^\circ$  para leste e  $\alpha = 90^\circ$  para oeste. Essa decomposição é demonstrada na Figura 9

Figura 9 – Representação dos ângulos para determinação da inclinação do PV.



Fonte: (GREENPRO, 2004)

Onde:

$\alpha_s$  : Azimute solar

$\gamma_s$  : Ângulo de elevação solar

$\alpha$  : Azimute do PV

$\beta$  : inclinação do PV

Deve levar em conta que a cada estação do ano o sol muda de altura, estando mais perto ou mais longe do painel fotovoltaico. Ou seja, se o ângulo de incidência do sol é baixa ele deve percorrer uma maior distância, diminuindo a sua absorção.

A radiação solar na atmosfera para um determinado local em certo momento é denominado de Massa de Ar ou Fator AM, um múltiplo do percurso da radiação. Ela é definida como:

$$AM = \frac{1}{\text{sen}\gamma_s} \quad (2.2)$$

Usualmente adota-se o valor de AM como 1 (um).

## 2.4.2 Influência da temperatura irradiação e resistência no rendimento do PV

Na literatura utiliza-se como valor de referência de temperatura e irradiação os valores de 25° e 1000W/m<sup>2</sup> respectivamente. Com isso é apontado a potência padrão no painel fotovoltaico nessas condições. Porém conforme esses valores aumentam ou diminuem, há uma alteração nessa potência gerada.

### 2.4.2.1 Variação de irradiação

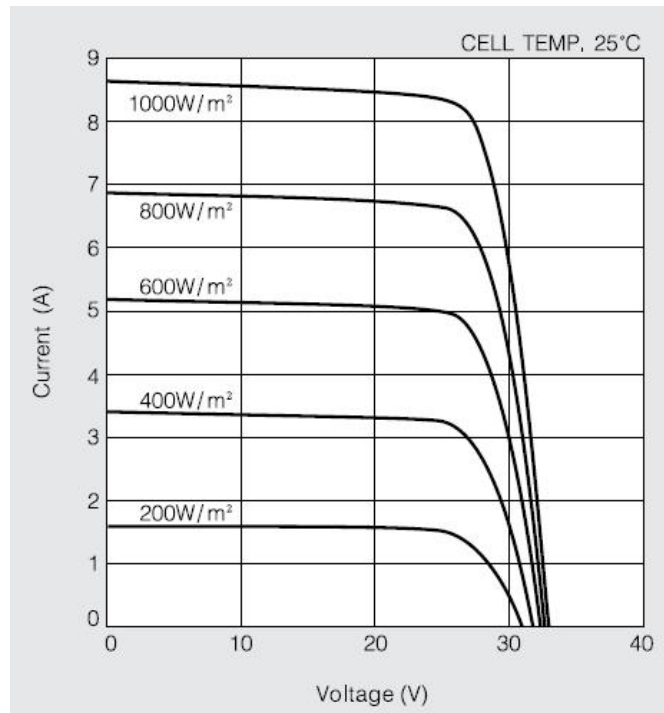
Sabe-se que a incidência de irradiação solar sob a terra não é constante e depende de diversos fatores como horário do dia, nuvens, chuva, época do ano, etc. Ou seja, a irradiação que irá incidir sobre o sistema será variante durante o dia.

A produção de corrente elétrica nas células do painel fotovoltaico dependem diretamente da irradiação incidente sobre elas, ou seja, quanto maior a irradiação solar incidente, maior será seu rendimento.

Na Figura 10 a empresa Kyocera apresenta o rendimento do seu painel fotovoltaico modelo KD210GX-LP conforme a diminuição da irradiação a uma temperatura fixa de 25 °C.



Figura 10 – Corrente-Tensão do painel fotovoltaico KD210GX-LP conforme variação da irradiação.



Fonte: (KYOCERA, 2017)

#### 2.4.2.2 Análise matemática da absorção de irradiação

A corrente gerada pela célula fotovoltaica dependem diretamente da irradiação incidente sobre ela. Essa relação da-se pela equação 2.3

$$i_{celula} = \frac{S}{S_{STD}} i_{SC} \quad (2.3)$$

Onde:

- $i_{celula}$  : corrente na célula;
- $S$  : irradiação local
- $S_{STD}$  : irradiação de referência. Usualmente  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$
- $i_{SC}$  : corrente de curdo circuito

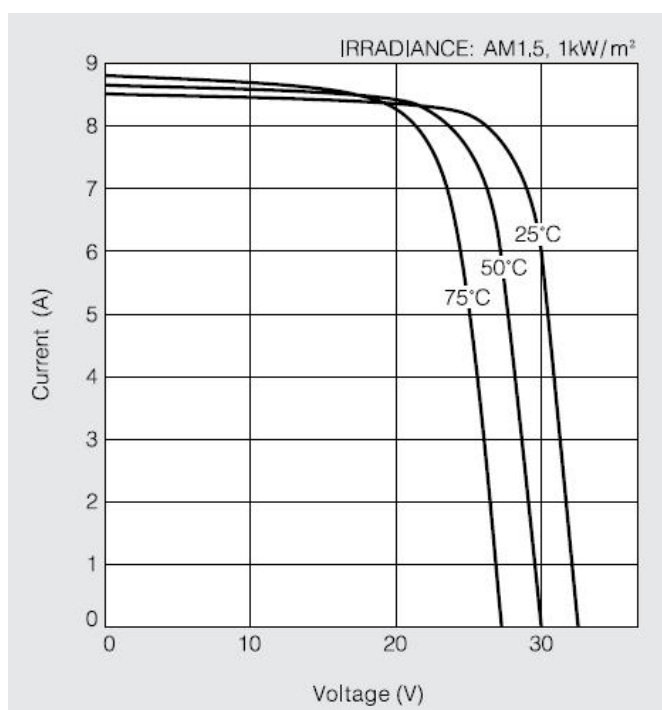
A equação 2.3 exemplifica exatamente influência da irradiação solar na produção da corrente elétrica nos terminais das células fotovoltaicas. Onde quanto mais próximo o valor de  $S$  à  $S_{STD}$ , maior será o valor de  $i_{SC}$  gerado pela célula.

### 2.4.2.3 Variação de temperatura

Painéis fotovoltaicos recebem diariamente uma grande quantidade de energia solar, isso faz com que eles aumentem sua temperatura. Ao ficarem quentes, isso faz com que a tensão produzida pelas células fotovoltaicas sejam menores a uma corrente constante, que por consequência diminuam sua potência.

Na Figura 11 é apresentado o rendimento de um PV a uma irradiação fixa de  $1000W/m^2$  com uma variação de temperatura.

Figura 11 – Corrente-Tensão do painel fotovoltaico KD210GX-LP conforme variação da temperatura.



Fonte: (KYOCERA, 2017)

#### 2.4.2.4 Análise matemática da absorção da temperatura

Com variação da temperatura ela irá afetar diretamente na corrente sobre o diodo, essa representada pela equação 2.1, onde quanto maior a corrente drenada pelo diodo, menor será a corrente total do painel fotovoltaico.

A corrente sobre o diodo é exposta na equação 2.4, denominada de Equação de Schottky.

$$i_D = i_o \left( e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

Onde:

- $i_o$  é a corrente de saturação reversa;
- $V_D$  é a tensão na camada  $pn$
- $n$  é o fator de idealidade do diodo ( $n = 2$  para silício cristalino e  $n < 2$  para silício amorfo)
- $V_T$  é a tensão térmica

O fator que interfere diretamente na igualdade conforme a variação de temperatura é a tensão térmica. Essa é descrita pela equação 2.5.

$$V_T = \frac{k \cdot T_{op}}{q} \quad (2.5)$$

Onde:

- $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} J/K$ )
- $T_{op}$  é a temperatura de operação da junção ( $K$ )
- $q$  é a magnitude da carga elétrica ( $1,6 \times 10^{-19} C$ )

A tensão térmica  $V_T$  varia conforme o material utilizado. Essa varia linearmente com o aumento da temperatura ambiente.

#### 2.4.3 Variação da resistência de carga

Um sistema fotovoltaico deve procurar sempre trabalhar no ponto de máxima potência, ou *MPP - Maximum Power Point*, ponto de intersecção entre a tensão e a corrente de máxima potência.

Como mostrado na Figura 8 ha uma ampla gama de operação dos níveis de tensão e corrente de célula fotovoltaica onde eles variam conforme a incidência de irradiação, variando a corrente, e temperatura, alterando os valores de tensão.

Assim é possível controlar o ponto de *MPP* variando o valor da resistência de carga do PV, sendo esse implementado por uma estratégia no controlador.

#### 2.4.4 Sombreamentos

Para a elaboração de um projeto de sistema fotovoltaico, faz-se necessário também o estudo de possíveis sombreamentos sobre os painéis fotovoltaicos. Existem três tipos de sombreamentos:

1. **Sombreamento temporário:** O sombreamento temporário é aquele que se dá por um período de tempo e depois some. Essa situação por ser resultado de uma nuvem passageira, folhas, pássaros e até mesmo poluição encrostada sobre o vidro do PV. Para evitar esse tipo de influência, deve ser feita uma manutenção rotineira sobre o equipamento, mantendo-o sempre limpo e livre de qualquer corpo que possa influenciar na absorção da irradiação.
2. **Sombreamento pela posição:** O sombreamento pela posição é aquele que ocorre devido a presença de árvores, edifícios vizinhos e estruturas altas próximas ao sistema.
3. **Sombreamento da construção:** Esse tipo de sombreamento se dá pela interferência do próprio edifício com relação as placas. Geralmente por não terem sido instaladas no ponto mais alto do mesmo. Dentre os principais elementos que influenciam nessa situação temos chaminés, antenas, para-raio, etc.

Os sombreamentos podem ser classificados também como total ou parcial. Total é aquele onde todas as células estão cobertas, não sendo possível a absorção da energia solar. Já o parcial é aquele onde algumas das células são sombreadas, enquanto outras estão com incidência de sol normal.

O sombreamento parcial influencia diretamente no rendimento do painel, pois conforme o arranjo em que as células fotovoltaicas estiverem (série ou paralelo), acarretará em uma deformidade no gráfico  $V \times I$  do PV.

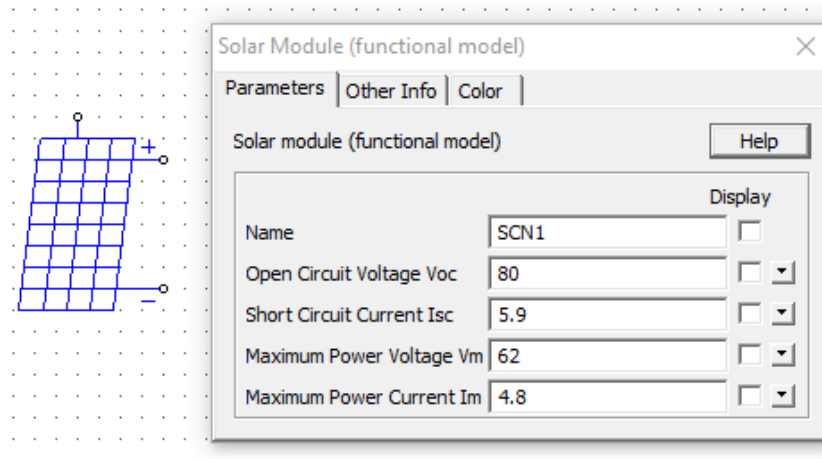
## 2.5 Modelagem de sistema fotovoltaico por meio de software PSIM

O software *PSIM*<sup>®</sup> é um poderoso programa de simulação de sistemas elétricos. Este apresenta aba para implementação de sistemas fotovoltaicos, divididos em um modelo funcional no qual já é definido as característica do PV e um modelo físico, no qual se pode alterar seus parâmetros, adequando-os para qualquer tipo de painel comercial.

### 2.5.1 Modelo Funcional

Com o modelo funcional é possível alterar os valores máximos de tensão e corrente. Essa possibilidade é interessante para analisarmos as características de um sistema fotovoltaico, porém de um PV com indicações elétricas já especificadas pelo *PSIM*<sup>®</sup>. Na Figura 12 apresenta o layout do PV e a janela de modificação de parâmetros.

Figura 12 – Modelo funcional de um painel fotovoltaico utilizado no PSIM.

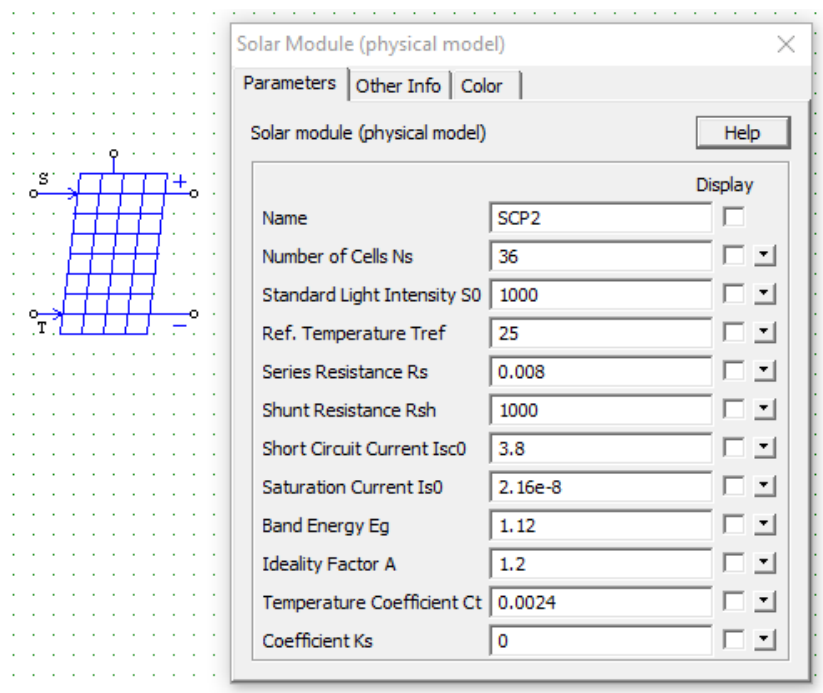


Fonte: (PSIM, 2017)

## 2.5.2 Modelo Físico

O modelo físico disponibilizado pelo *PSIM*<sup>®</sup> é capaz de alterarmos vários parâmetros do painel fotovoltaico, dando a liberdade de simular qualquer PV. Na aba "Help" da sua janela de parâmetros, é demonstrado o modo no qual o software faz a interação com os dados de entrada e como ele os manipula. Também é exposto os valores de constante nas quais ele utiliza para determinar suas grandezas. Na Figura 13 mostra todas as opções de modelagem que é possível implementar no PV, desde o número de células que o painel terá, até a corrente de saturação do diodo.

Figura 13 – Modelo físico de um painel fotovoltaico utilizado no PSIM.



Fonte (PSIM, 2017)

## 3 Desenvolvimento

### 3.1 Metodologia

O desenvolvimento prático do trabalho foi dividido em duas etapas. Inicialmente implementou-se situações de quebras do vidro, considerando apenas que o vidro estivesse danificado e que as demais camadas do painel estivessem em perfeito funcionamento em um painel fotovoltaico do modelo *Kyocera KD210GX-LPU*. Já na segunda etapa, foi implementada uma situação real com um painel fotovoltaico do mesmo modelo *Kyocera KD210GX-LPU*, tentando entender o seu comportamento em uma situação de quebra na qual não afeta apenas a camada de vidro. Esse painel danificado sofreu uma queda devido a uma má fixação em sua estrutura juntamente com uma situação severa de rajadas de vento.

Primeiramente verificou-se os dados de placa do modelo escolhido, esse com potência de 210 W, 26,6 volts de tensão e 7,9 amperes de corrente, no qual servirá como referência para a sua modelagem junto ao software PSIM. Para a retirada dos parâmetros construtivos elétricos do PV, utilizou-se os dados expostos em seu *datasheet*, como o seu número de células, corrente de circuito aberto e coeficiente de temperatura.

Já para a obtenção de suas resistências série e *shunt* fez-se necessários uma experimentação prática junto aos painéis. Sabe-se que a resistência série do painel é o valor da própria resistência do material semicondutor entre os seus limites da região de depleção e seus contatos metálicos. De modo ideal, esse valor deve ser igual a zero. Então para a simulação desse sistema, estipulou-se um valor igual a  $0,008\Omega$ , este que já vem indicado nos parâmetros iniciais do PV no PSIM. Já para a resistência *shunt*  $R_{shunt}$ , encobriu-se totalmente as células do painel fotovoltaico e com o auxílio de um multímetro verificou-se o valor da resistência do PV. Com esse resultado, dividiu-se ele por 54, valor total de células, afim de saber a  $R_{shunt}$  da cada uma delas.

Na Figura 14 é mostrado os valores dos dados obtidos. Onde a resistência *shunt* encontrada representa a de uma célula.

Figura 14 – Dados do painel fotovoltaico modelado.

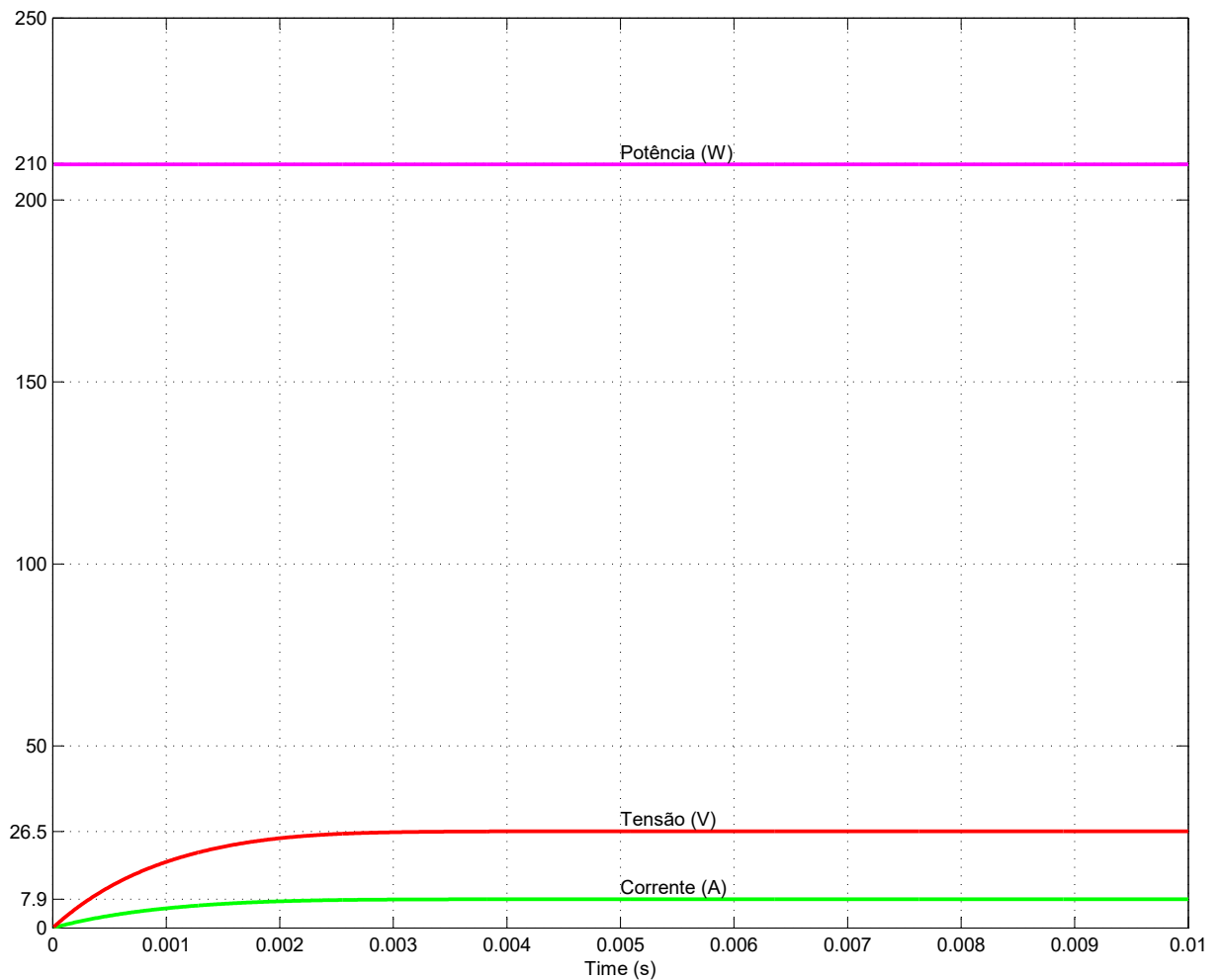
Parameter	Value	Display
Name	PV	<input checked="" type="checkbox"/>
Number of Cells Ns	54	<input type="checkbox"/>
Standard Light Intensity S0	1000	<input type="checkbox"/>
Ref. Temperature Tref	25	<input type="checkbox"/>
Series Resistance Rs	0.008	<input type="checkbox"/>
Shunt Resistance Rsh	53.2	<input type="checkbox"/>
Short Circuit Current Isc0	8.58	<input type="checkbox"/>
Saturation Current Is0	2.16e-8	<input type="checkbox"/>
Band Energy Eg	1	<input type="checkbox"/>
Ideality Factor A	1.25	<input type="checkbox"/>
Temperature Coefficient Ct	0.00515	<input type="checkbox"/>
Coefficient Ks	0	<input type="checkbox"/>

Fonte: Autor

Com todos os dados já conhecidos, fez-se a simulação do mesmo junto ao PSIM com os valores padrões de controle de temperatura  $25^{\circ}\text{C}$  e irradiação  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . O resultado da simulação foi uma potência igual a 209,78 W, tensão de 26,54 V e corrente de 7,85 A. Esses dados representados na Figura 15 e sendo praticamente idênticos aos do *datasheet* do fabricante.



Figura 15 – Parâmetros do modelo simulado.



Fonte: Autor

Ao realizar uma análise prévia do comportamento do painel fotovoltaico, verificou-se que o mesmo dava indícios de não ter diodo de *bypass*. Devido a isso abriu-se a *J-Box* de um dos painéis fotovoltaicos e retirou-se o silicone de isolamento. Ao fazer isso confirmou-se a ideia inicial. O painel tem apenas os terminais para a colocação dos diodos. Essa fator influencia na análise dos resultados haja visto que caso o painel apresentasse esse sistema de diodos, as áreas danificadas pelo impacto seriam isoladas e não contribuiriam na geração final do PV. Na Figura 16 é possível verificar essa análise.

Figura 16 – J-box do painel fotovoltaico sem a presença de diodo de *bypass*.

Fonte: Autor

Para a realização dos testes em campo, fixou-se os painéis fotovoltaicos a um suporte metálico de inclinação de  $30^\circ$ , voltadas para a direção oeste, embora essa não seja a melhor orientação, o objetivo era apenas ter geração no PV e não sua MPP. Para determinar sua temperatura, utilizou-se uma câmera térmica do modelo **FLIR T400**. Já o sensor de irradiação solar é da empresa **ICEL MANAUS**, modelo **SP-2000**. A câmera térmica foi utilizada pois essa apresenta boa praticidade de manuseio e um grau de erro mínimo assegurado pelo fabricante. O sensor de irradiação, piranômetro, foi fixado com a mesma inclinação dos painéis, captando assim as incidências solares do PV. Na Figura 17 é representada a configuração do sistema adotado para as medidas em campo.

Para obtenção dos parâmetros elétricos, o painel fotovoltaico foi associado a uma carga de  $3,3671\Omega$ , essa sendo a carga de máxima potência.



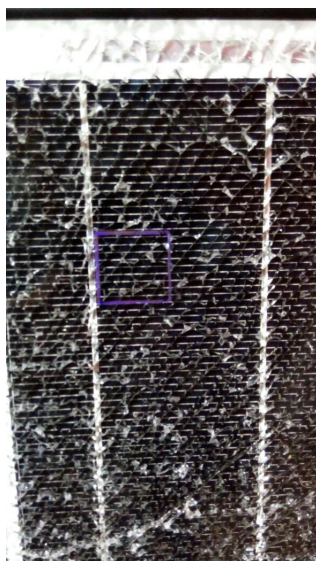
Figura 17 – Arranjo dos PV na estrutura de medição.

Fonte: Autor

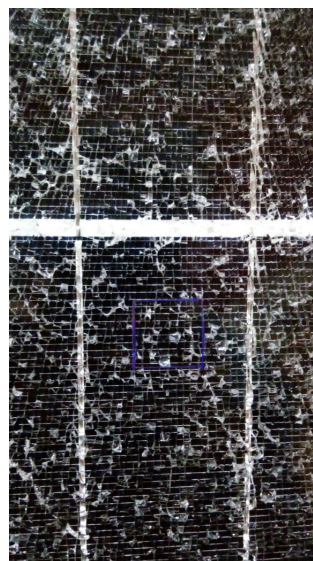
Já a heterogeneidade das quebras sob a placa fotovoltaica é apresentado na Figura 18. Os níveis da danos são divididos em 4 níveis, onde o 1 é o menos severo e o 4 o mais severo.

Figura 18 – Diferentes níveis de danos existentes no painel fotovoltaico.

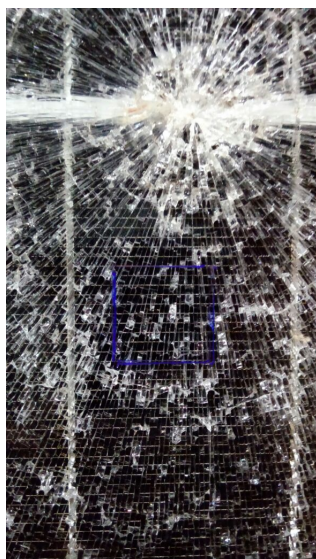
(a) Grau de dano nível 1,  
50%.



(b) Grau de dano nível 2,  
60%.



(c) Grau de dano nível 3,  
75%.

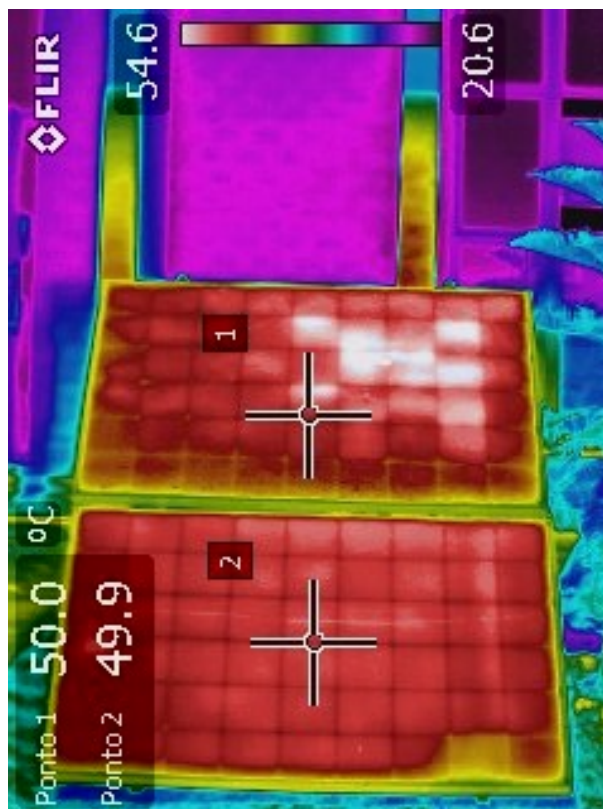


(d) Grau de dano nível 4,  
100%.



Quando a heterogeneidade da temperatura no arranjo, essa é mostrada na Figura 19. É possível perceber diferentes pontos de aquecimento da placa danificada.

Figura 19 – Distribuição de temperatura sob as placas fotovoltaicas.



Fonte: Autor

Como é possível ver na figura, a placa danificada apresenta uma concentração de calor sobre as células de maneira irregular, tendo como pontos mais quentes a área na qual o vidro está mais danificado. Essa reação dá-se por dois motivos: Primeiro porque os raios solares tendem a ficar "presos" naquela área, fazendo sua temperatura aumentar. Segundo e mais importante é que células fotovoltaicas danificadas, tendem a agir sob o circuito como uma carga, consequentemente esquentando aquele ponto. Como já foi exposto anteriormente, o PV em análise não tem diodo de *Bypass* fazendo com que essa situação de carga sob a célula perdure.

## 3.2 Implementação de casos

Com a modelagem do painel fotovoltaico realizada, é feito um estudo de casos no qual tem por objetivo analisar situações de quebra do vidro de proteção do PV. Deve-se saber que essa análise levará em conta que o dano será apenas no vidro, já as outras camadas, EVA e silício, estão em pleno funcionamento.

Na situação de quebra do vidro, alteram-se duas variáveis: a temperatura, com um aumento de 5% e irradiação conforme a área total correspondente em que as rachaduras ocupam a região da célula.

O valor de temperatura foi determinado por meio da câmara térmica, onde em diferentes dias e incidência solar, o painel com o vidro danificado com relação ao sem danos, teve aumento de 5% de variação de temperatura.

Já os valores de irradiação usou-se como referência a Figura 18, onde percebeu-se diferentes tipos de padrão de quebra, esses sendo mais ou menos severos. Assim, foi simulado cenários com 50%, 60%, 75% e 100% de área de absorção do painel comprometidas. Sabendo-se que esses valores da área correspondente a quebra é feita da maneira analítica, tendo assim um desvio padrão.

### 3.2.1 Painel com redução de 50% de absorção de irradiação

Para os testes com o painel com redução de 50% de absorção utilizou-se dois parâmetros de entrada de irradiação e temperatura. Para a região do painel onde não havia danos, a irradiação e temperatura foram de  $800W/m^2$  e  $49^{\circ}C$  respectivamente. Já na região danificada, a irradiação e temperatura foram de  $400W/m^2$  e  $51,45^{\circ}C$  respectivamente.

Foi utilizado os valores de referência de  $800W/m^2$  e  $49^{\circ}C$  por esses serem disponibilizados pelo *datasheet* do fabricante e também por ser dados mais próximos aos encontrados em um cenário real de instalação de um painel fotovoltaico. Esse contribui assim com  $157,07W$  nessas condições. Já com o valor de referência de  $1000W/m^2$  e  $25^{\circ}C$  a capacidade de geração é de  $210W$ .

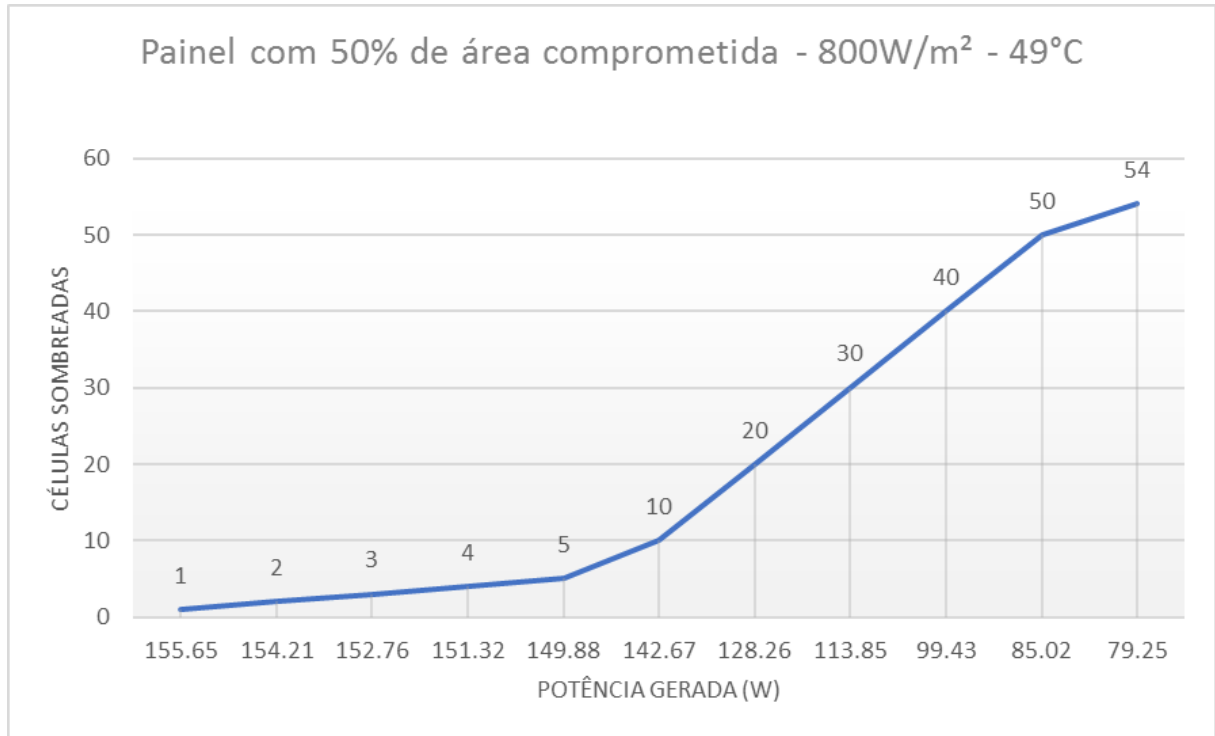
Na tabela 1 é demonstrado o comportamento da potência do painel conforme o número de células afetado com a quebra do vidro.

Tabela 1 – Vidro com redução de 50% na capacidade de absorção.

<b>Parâmetros nas células não danificadas:</b> $800W/m^2 - 49^{\circ}C$	
<b>Parâmetros nas células danificadas:</b> $400W/m^2 - 51,45^{\circ}C$	
<b>Número de células com redução de absorção</b>	<b>Potência total gerada (W)</b>
0	157.07
1	155.65
2	154.21
3	152.76
4	151.32
5	149.88
10	142.67
20	128.26
30	113.85
40	99.43
50	85.02
54	79.25

O gráfico de queda de tendência de queda de absorção é exposta na Figura 20.

Figura 20 – Gráfico da queda de potência conforme o número de células afetadas pelo dano.



Fonte: Autor

### 3.2.2 Painel com redução de 60% de absorção de irradiação

Para os testes com o painel com redução de 60% de absorção utilizou-se dois parâmetros de entrada de irradiação e temperatura. Para a região do painel onde não havia danos, a irradiação e temperatura foram de  $800W/m^2$  e  $49^{\circ}C$  respectivamente. Já na região danificada, a irradiação e temperatura foram de  $320W/m^2$  e  $51,45^{\circ}C$  respectivamente.

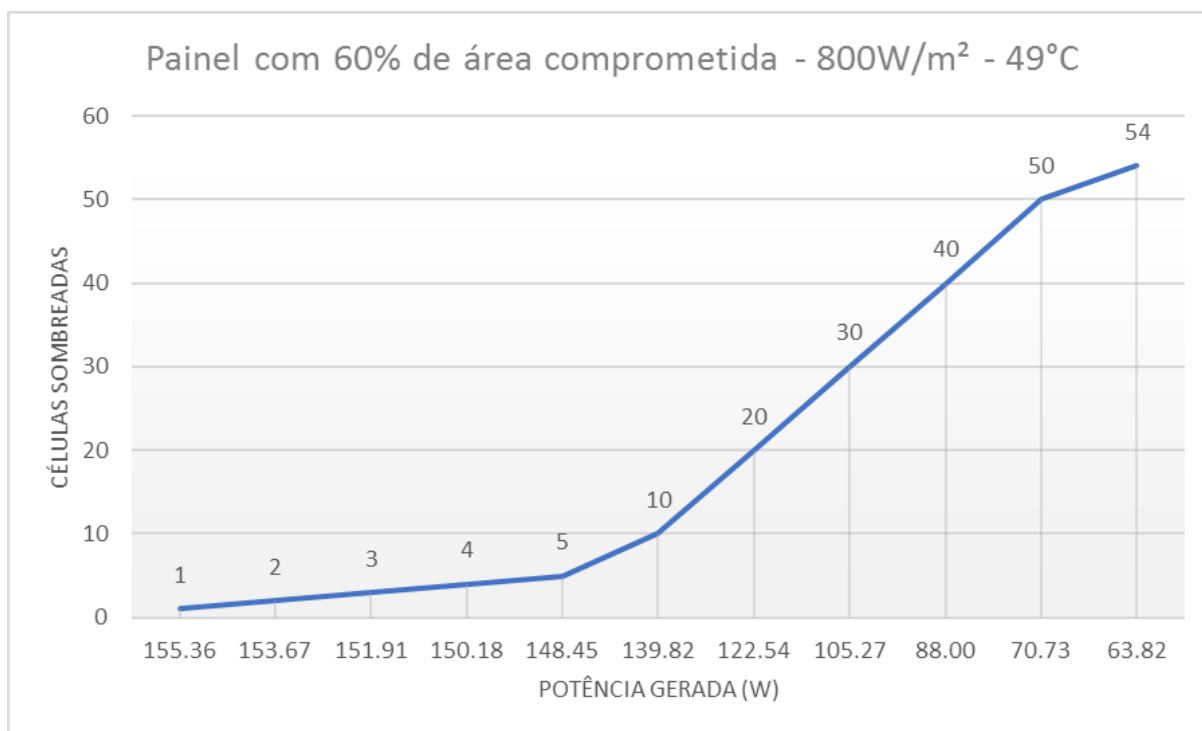
Na tabela 2 é demonstrado o comportamento da potência do painel conforme o número de células afetado com a quebra do vidro.

Tabela 2 – Vidro com redução de 60% na capacidade de absorção.

Parâmetros nas células não danificadas: $800W/m^2 - 49^{\circ}C$	
Parâmetros nas células danificadas: $320W/m^2 - 51,45^{\circ}C$	
Células com redução de absorção	Potência total gerada (W)
0	157,07
1	155,36
2	153,67
3	151,91
4	150,18
5	148,45
10	139,82
20	122,54
30	105,27
40	88,00
50	70,73
54	63,82

O gráfico de queda de tendência de queda de absorção é exposta na Figura 21.

Figura 21 – Gráfico da queda de potência conforme o número de células afetadas pelo dano.



Fonte: Autor



### 3.2.3 Painel com redução de 75% de absorção de irradiação

Para os testes com o painel com redução de 75% de absorção utilizou-se dois parâmetros de entrada de irradiação e temperatura. Para a região do painel onde não havia danos, a irradiação e temperatura foram de  $800W/m^2$  e  $49^{\circ}C$  respectivamente. Já na região danificada, a irradiação e temperatura foram de  $200W/m^2$  e  $51,45^{\circ}C$  respectivamente.

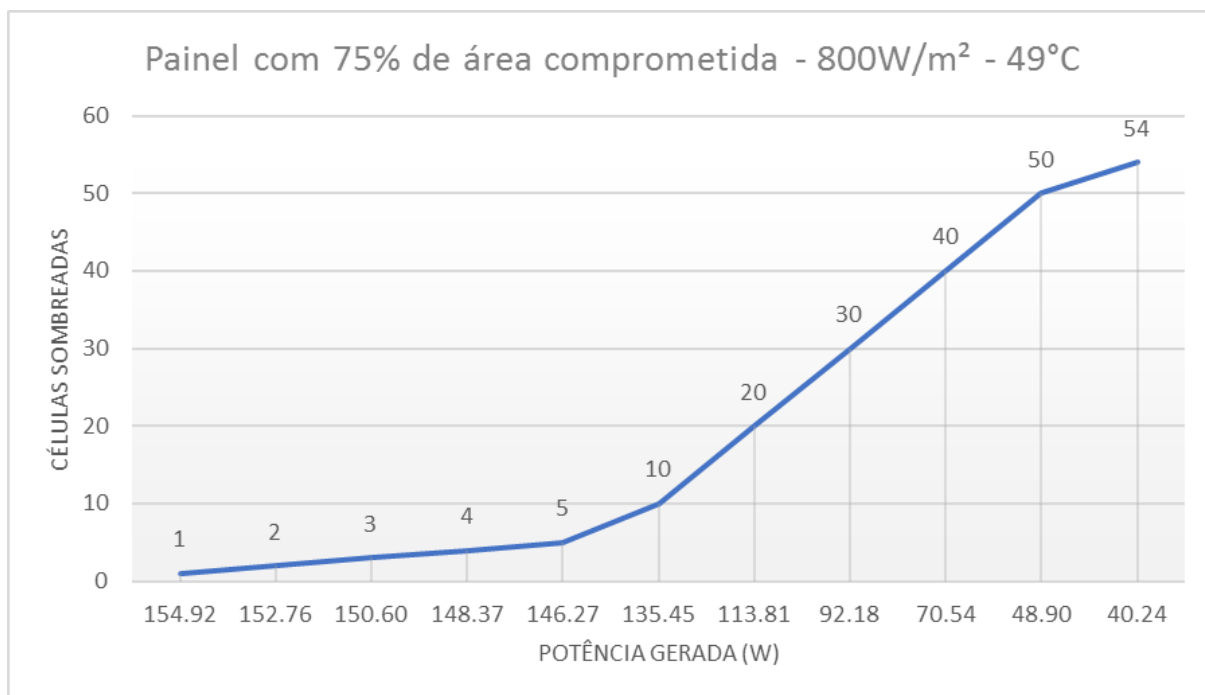
Na tabela 3 é demonstrado o comportamento da potência do painel conforme o número de células afetado com a quebra do vidro.

Tabela 3 – Vidro com redução de 75% na capacidade de absorção.

<b>Parâmetros nas células não danificadas:</b> $800W/m^2 - 49^{\circ}C$	
<b>Parâmetros nas células danificadas:</b> $200W/m^2 - 51,45^{\circ}C$	
<b>Células com redução de absorção</b>	<b>Potência total gerada (W)</b>
0	157,07
1	154,92
2	152,76
3	150,60
4	148,37
5	146,27
10	135,45
20	113,81
30	92,18
40	70,54
50	48,90
54	40,24

O gráfico de queda de tendência de queda de absorção é exposta na Figura 22.

Figura 22 – Gráfico da queda de potência conforme o número de células afetadas pelo dano.



Fonte: Autor

### 3.2.4 Painel com redução de 100% de absorção de irradiação

Para os testes com o painel com redução de 100% de absorção utilizou-se dois parâmetros de entrada de irradiação e temperatura. Para a região do painel onde não havia danos, a irradiação e temperatura foram de  $800W/m^2$  e  $49^{\circ}C$  respectivamente. Já na região danificada, a irradiação e temperatura foram de  $0W/m^2$  e  $51,45^{\circ}C$  respectivamente.

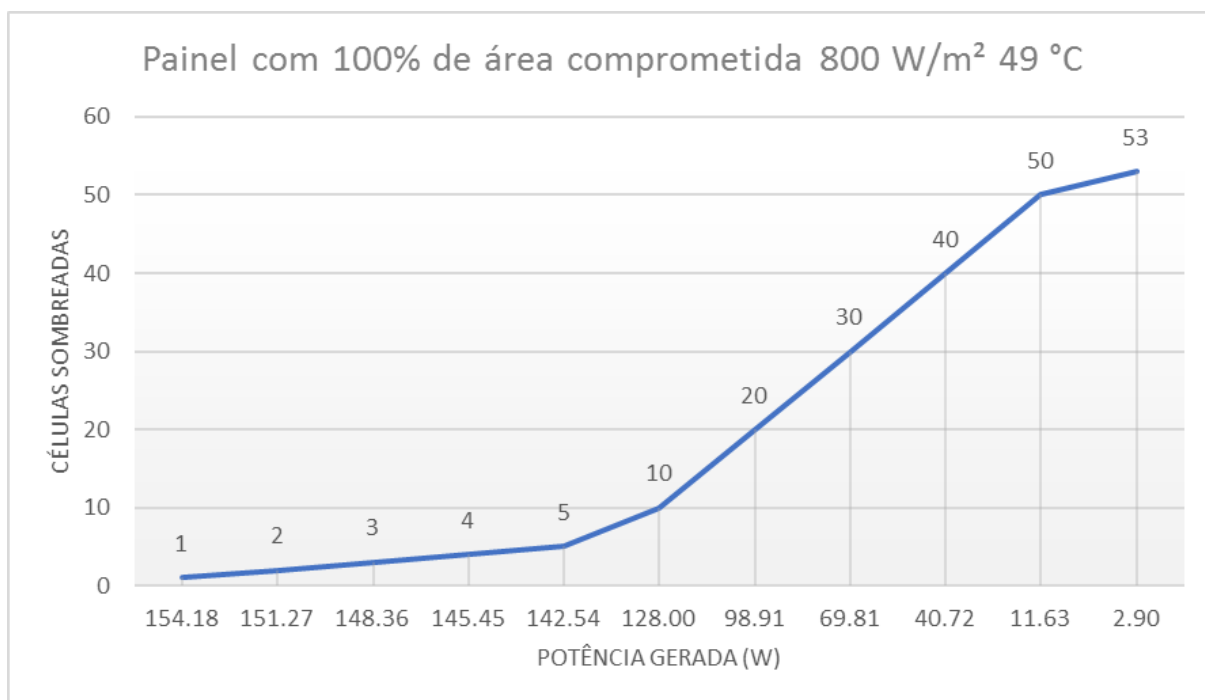
Na tabela 4 é demonstrado o comportamento da potência do painel conforme o número de células afetado com a quebra do vidro.

Tabela 4 – Vidro com redução de 100% na capacidade de absorção.

Parâmetros nas células não danificadas: $800W/m^2 - 49^{\circ}C$	
Parâmetros nas células danificadas: $0W/m^2 - 51,45^{\circ}C$	
Células com redução de absorção	Potência total gerada (W)
0	157,07
1	154,18
2	151,27
3	148,36
4	145,45
5	142,54
10	128,00
20	98,91
30	69,81
40	40,72
50	11,63
53	2,90

O gráfico de queda de tendência de queda de absorção é exposta na Figura 23.

Figura 23 – Gráfico da queda de potência conforme o número de células afetadas pelo dano.

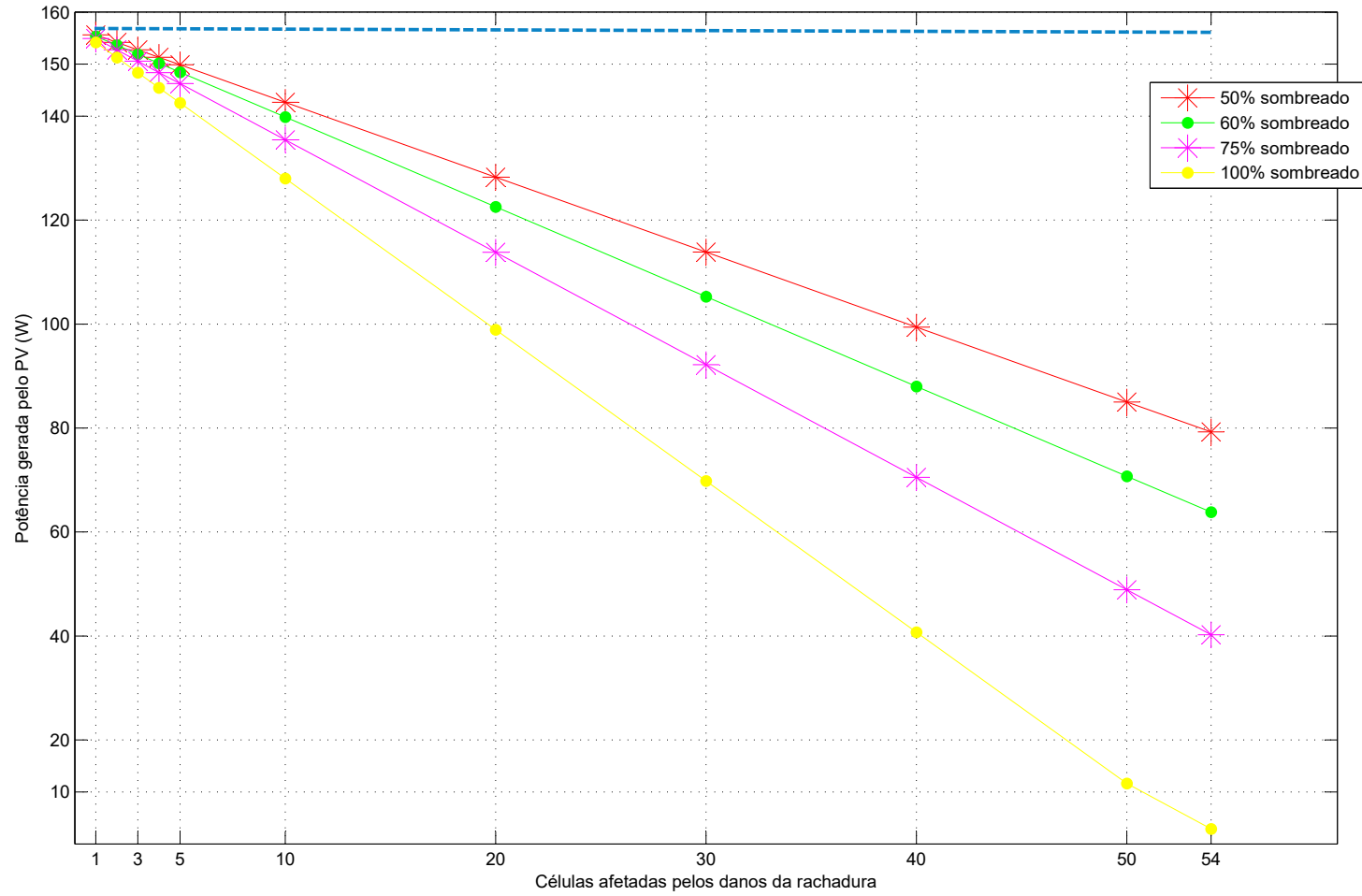


Fonte: Autor

### 3.2.5 Comparativo de resultados

Com o estudo de cada um dos casos de sombreamento feito, é possível analisarmos juntos esses casos. Para isso, elaborou-se a Figura 24 na qual tem por objetivo comparar cada um dos resultados de potência conforme o número de células fotovoltaicas afetadas com a queda de absorção da irradiação solar. Para fins de referência, é representado também o valor de 157 W de potência, essa sendo a condição de máxima à  $800 \text{ W/m}^2$  e  $49^\circ\text{C}$  que o PV pode gerar.

Figura 24 – Comparativo de potência gerada nos diferentes tipos de queda de absorção da irradiação.



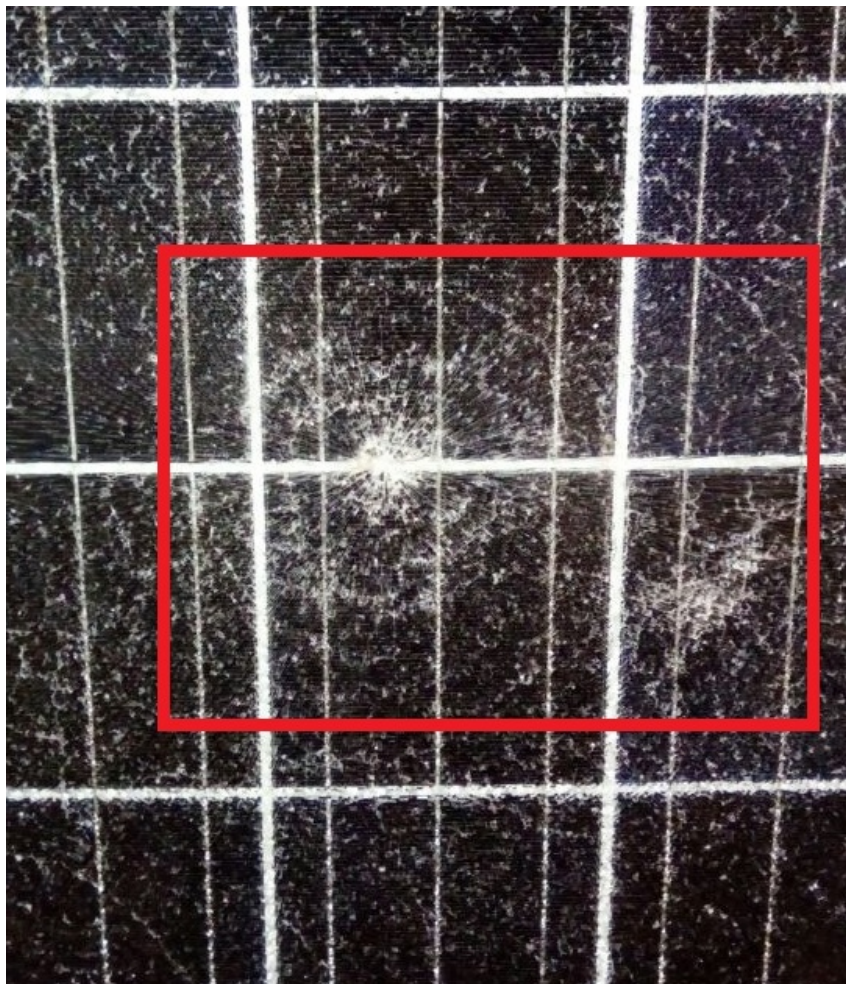
Fonte: Autor

Na Figura 24, percebe-se a drástica queda de potência conforme a intensidade das rachaduras sobre o vidro. Com isso, é possível mensurar o impacto que tal situação de quebra pode acarretar ao sistema, fazendo assim uma reflexão da necessidade imediata de troca do painel fotovoltaico ou não.

### 3.3 Implementação prática da modelagem do PV

Para implementação prática da análise antes realizada, foi estudado um painel fotovoltaico do mesmo modelo anteriormente analisado, *Kyocera KD210GX-LPU*, porém esse havia sofrido uma queda e teve sua estrutura danificada. Nesse impacto, houveram dois pontos de significativos, esses mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Pontos com maior severidade de impacto.



Fonte: Autor

O objetivo inicial foi tentar modelar esse painel danificado e entender o seu comportamento ao sofrer tal dano. Logo a primeira análise percebeu-se que com a queda o painel não sofreu alterações apenas em seu vidro, mas também na sua camada de EVA e

silício, haja visto a existência de elevações na sua parte traseira nos pontos no qual sofreu maior impacto. Com isso, fugindo dos casos antes levantados de quebra apenas do vidro de proteção, tendo assim que levar em consideração outras interferências na geração do PV.

No teste prático para verificar seu comportamento ao ser exposto ao sol, obtiveram-se os seguintes resultados descritos na tabela 5 onde apresentou os valores de tensão, corrente, temperatura na célula, irradiação média no ambiente e potência gerados pelo sistema proposto na Figura 19.

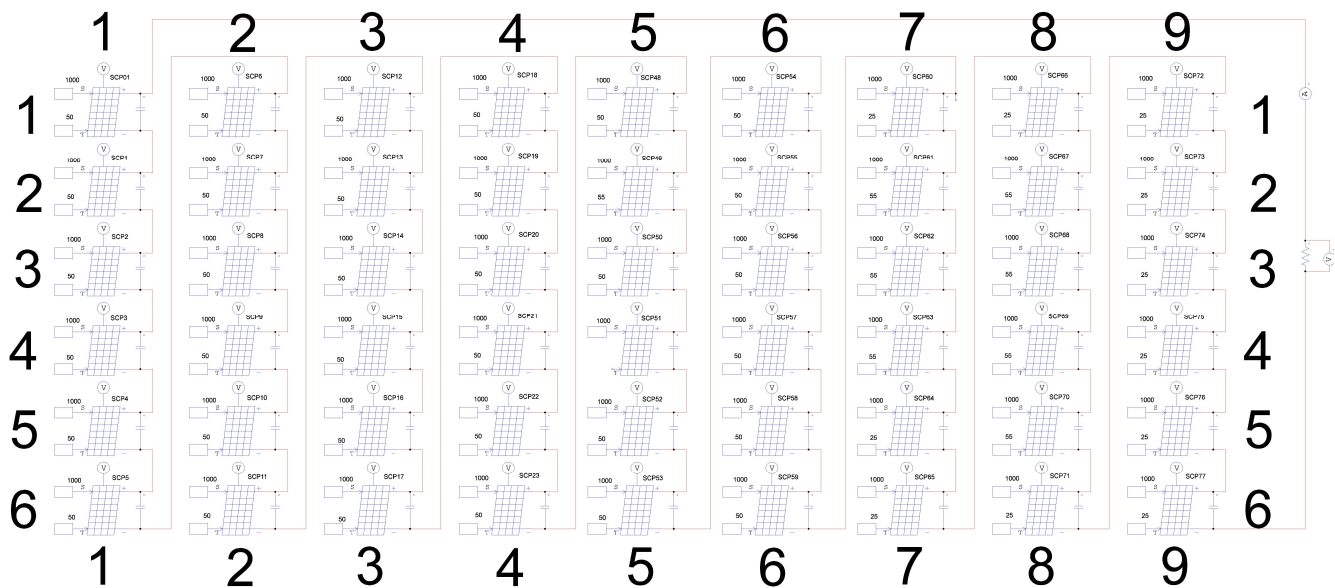
Tabela 5 – Resultados Práticos Obtidos

Grandezas	Painel sem Danos	Painel Danificado
Tensão (V)	23,9	10,14
Corrente (A)	7,75	3,3
Temperatura da Célula ( $^{\circ}C$ )	44	47
Irradiação Média ( $W/m^2$ )	950	945
Potência (W)	185,225	33,462

Fonte: Autor

Estes resultados mostram que o painel sofreu uma importante avaria, tendo sua potência gerada à carga de máxima potência ( $3,3671\Omega$ ) bem reduzida. Para entender o porque dessa diminuição de rendimento, não podemos realizar os mesmos passos feitos no estudo anterior de quebra do vidro. Com isso, construiu-se um arranjo no software *PSIM* no qual se pode simular individualmente cada uma das células fotovoltaicas, tendo um maior controle sobre os parâmetros no qual podem estar realizando influência sobre ela.

Figura 26 – Modelagem do arranjo com 54 células fotovoltaicas



Fonte: Autor

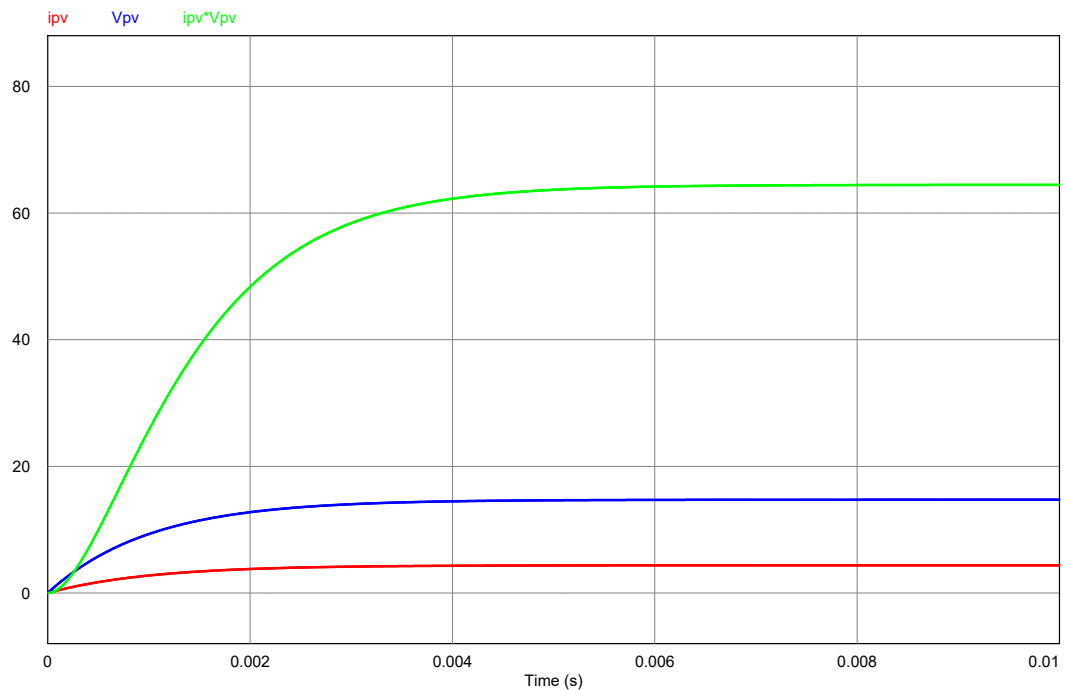
Utilizando o arranjo exposto na Figura 26 analisou-se a Figura 19 afim de identificar as células com pontos quentes de temperatura. Como dito anteriormente aquelas que apresentam algum tipo de defeito agirão como uma carga elétrica, conseqüentemente esquentando. Esses defeitos podem ser desde uma má configuração da camada de EVA, assim como uma falha na conversão de energia pelas camadas do silício.

No total foram encontradas 13 células de diferente coloração. Então para realizar a simulação do sistema, essas células tiveram como dado de entrada uma irradiação próxima de zero, não gerando assim corrente. Para as demais, foi adotado uma capacidade de absorção da irradiação de 50% à uma temperatura de 47°C.

Os resultados obtidos são expostos na Figura 27, onde obteve um valor de 64,37 W de potência, 14,72 volts de tensão e 4,37 amperes de corrente.



Figura 27 – Comportamento do painel fotovoltaico com a inoperância de 13 células e redução de 50% de absorção da irradiação.



Fonte: Autor

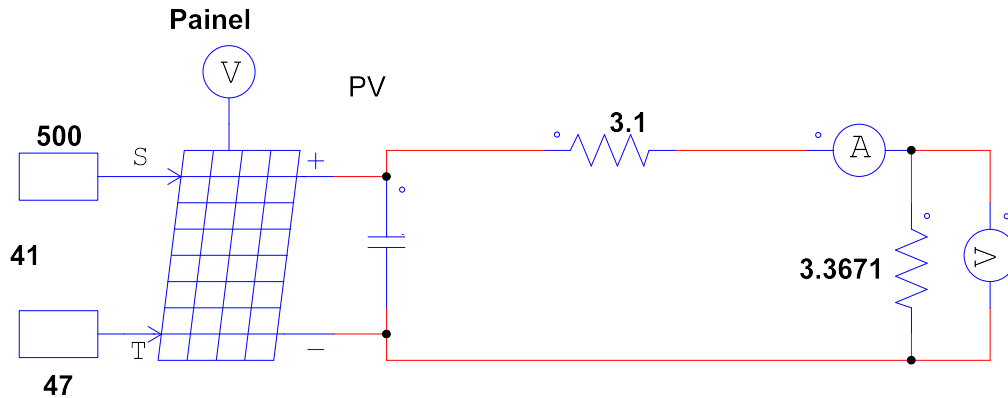
Analisando os resultados simulados com o real medido, percebe-se que o valor da potência simulada é praticamente o dobro, indicando assim que há outros fatores que estão influenciando na geração do painel fotovoltaico.

Devido a impossibilidade de analisarmos internamente o painel fotovoltaico e estudar o quão afetado foi a camada de EVA e a capacidade de conversão de energia do silício, faz-se a análise partindo do princípio de que as mesmas por apresentarem algum tipo de defeito, estão agindo como uma resistência elétrica ao arranjo.

Como todas as células fotovoltaicas estão associadas em série e cada uma que apresenta defeito acaba se tornando resistências ao circuito, essas podem ser representadas por uma resistência total série ( $R_{T_s}$ ) onde representa o somatório de resistências nas quais cada célula danificada interfere com as demais em funcionamento no PV.

Sabendo que essa resistência interfere na Resistência de Máxima Potência do PV, haja visto que não há uma estratégia de MPP, então ela acabará interferindo no rendimento do painel fotovoltaico. Essa configuração é representado na Figura 28, onde o valor da resistência total série ( $R_{T_s}$ ) encontrado foi de  $3,1\Omega$ .

Figura 28 – Representação do sistema utilizado para determinar a resistência total série ( $R_{T_s}$ ) correspondentes ao número de células danificadas.

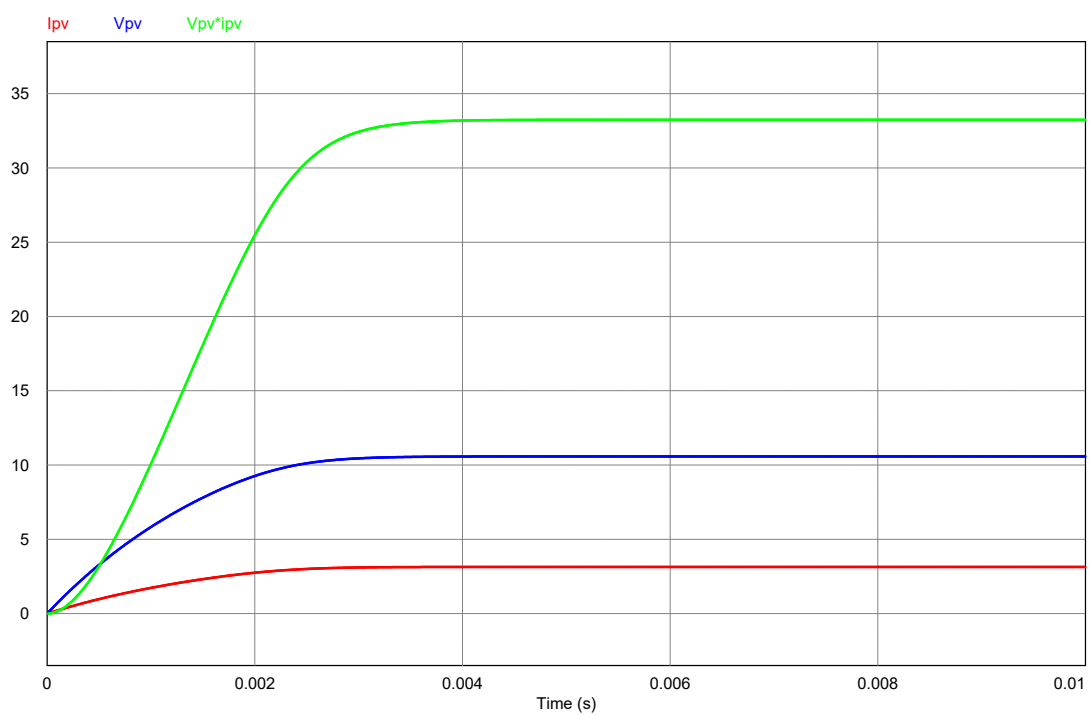


Fonte: Autor

Esse valor de resistência foi determinado a partir de análise empírica, variando o seu valor até atingirmos uma potência próxima aquela encontrada na prática. Já era esperado um valor próximo a essa resistência pois com o teste considerando PV apenas com a queda da capacidade de absorção, obteve-se uma potência com o dobro da encontrada em teste prático, logo a resistência final de carga considerando a influência da resistência da área quebrada também deveria ser o dobro a resistência de carga por serem grandezas inversamente proporcionais.

A potência encontrada utilizando essa configuração foi de 36,5 W, valor esse muito próximo ao medido na prática de 33,462 W . Esse é representado na Figura 29.

Figura 29 – Parâmetros encontrados de tensão, corrente e potência ao associarmos uma resistência devido aos danos do PV.



## 4 Conclusão

Na primeira análise do desenvolvimento prático do trabalho, foram criadas situações de quebra do vidro tomando como base o padrão de rachaduras existentes no painel fotovoltaico disponibilizado pelo Grupo de Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE). Devido ao vidro temperado ser mau condutor de calor, ele esfria muito rápido na superfície e segura o calor na parte interna. Passando o tempo, esse calor se transforma em energia armazenada dentro do material. Ao levar um impacto, a energia é liberada por igual, tendo assim um certo padrão de quebra. Por isso adotou-se uma porcentagem fixa de 50%, 60%, 75% e 100% da área ocupada pelas rachaduras em toda a área do PV. Embora na maioria das situações na qual um painel fotovoltaico sofre algum tipo de dano em seu vidro ele se quebra por inteiro, foi-se analisando o comportamento de sua potência gerada desde a quebra do vidro sobre uma célula fotovoltaica até atingir a sua totalidade de 54 células. Incidentes onde se quebra uma pequena região do PV podem ocorrer por uma chuva de granizo, vandalismo com arremessos de pedras e até descargas atmosféricas.

Os resultados de geração obtidos apontam uma variação aproximada de 2 à 4 watts por célula afetada com o sombreamento realizado pelo vidro. Esse resultado se analisarmos individualmente pode ser considerado irrelevante. Porém analisando-se em um sistema de grande porte instalado, durante um universo de meses e sabendo que geração solar tem um rendimento relativamente baixo de conversão de energia, esses valores de potência perdida acaba se tornando importante, necessitando ser avaliado pelo investir do sistema.

Já na segunda análise, com o painel fotovoltaico que sofreu um importante dano nas suas principais estruturas (vidro, EVA e silício), a análise se torna muito mais severa e dificultosa, haja visto a inviabilidade técnica de analisar individualmente cada componente afetado e mensurar a sua interferência na geração final de energia. Devido a isso, analisou-se o conceito básico de que as células fotovoltaicas ao sofrerem algum tipo de dano em sua estrutura, comporta-se como uma resistência elétrica e passa então a consumir energia. Primeiramente, foi verificado o número de células que apresentaram pontos quentes ao serem expostas a luz, esse sendo 13 num total de 54. O valor de interferência de absorção da irradiação pelas rachaduras foi estipulado em 50%, com uma temperatura de  $47^{\circ}C$ . Foi simulado qual seria a contribuição das 41 células, nas condições antes descritas, caso elas não estivessem fornecendo energia para as 13 danificadas. Foi encontrado uma potência de 64,37 watts. Assim, é dissipada uma potência de 30,9 W nas células danificadas. Sabendo que a corrente medida em campo é de 3,3 amperes, então a resistência exercida pelas células danificadas é de  $3,1\Omega$ .

Ao implementar essa nova configuração na simulação, de uma resistência de  $3,1\Omega$

na saída do PV, verificou-se que a potência encontrada foi de 36,5 W, valor esse muito próximo ao encontrado experimentalmente em campo de 33,46 W. Essa variação de 3,04 W, dá-se justamente pela dificuldade de ser feita a análise de cada uma das células afetadas, assim como da real irradiação absorvida pelas células não danificadas.

Neste trabalho buscou-se desenvolver uma modelagem capaz de compreender e estudar diferentes tipos de danos causados ao vidro de um painel fotovoltaico. O Brasil embora seja um dos principais países no mundo com capacidade de produção de energia elétrica e térmica a partir da incidência solar, ainda estamos apresentamos pouca implementação desses recursos se comparados a outros países como China, Alemanha e Estados Unidos da América. Embora a resolução RN 482/12 da ANEEL no ano de 2012 veio a incentivar investimentos nessa área, desenvolver qualquer tipo de estudo nessa área ajuda a incentivar essa nossa inserção entre grandes produtores de energia.

Quanto ao estudo desse tipo de situação de quebra do painel fotovoltaico e consequentemente a diminuição do seu rendimento, mostra-se bem importante pois o montante a ser investido para a implementação desse tipo de fonte é bem significativo e a taxa de amortização levam-se alguns anos conforme o tamanho da instalação e região no Brasil para ser abatida. Com isso, é possível determinar o impacto que um painel fotovoltaico danificado pode causar ao sistema implementado, aumentando assim o tempo de amortização do investimento.

Com relação aos resultados obtidos, fica como uma possível vertente do trabalho uma pesquisa que aponte até qual intensidade de dano e quanto de diminuição de potência acabariam tornando o investimento menos interessante. O gráfico da Figura 24 mostra a queda linear de potência conforme o número de células afetada, sendo possível com ele criar limites e parâmetros nos quais apontem o impacto que determinado dano ao PV irá causar no retorno do investimento feito para um sistema fotovoltaico.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Um método matemático de mensurar a área das rachaduras sobre um vidro de painel fotovoltaico;
- Um estudo que aponte a relação de queda de potência perdida durante um horizonte de anos com uma relação de células danificadas;
- Estudar experimentalmente as perdas nas células fotovoltaicas que sofrem danos físicos severos.

## Referências

- AGENCY, I. E. *Key world energy statistics*. [S.l.]: International Energy Agency, 2007. Citado na página 14.
- AGENCY, I. E. *Solar Energy Perspectives*. 2011. Disponível em: <[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar\\_Energy\\_Perspectives2011.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Energy_Perspectives2011.pdf)>. Citado na página 17.
- ANEEL, R. N. N. 482. *Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências*, v. 17, 2012. Citado na página 17.
- BRASIL, M. Plano decenal de expansão de energia 2024. *MME (Ministério de Minas e Energia), Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro*, 2015. Citado na página 17.
- BRASIL, P. *Brasil deve integrar Top 20 em energia solar em 2018*. 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/07/brasil-deve-integrar-top-20-em-energia-solar-em-2018>>. Citado na página 17.
- CTES. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Especial. Rio de Janeiro: PRC-PRODEEM, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- DUPONT, F. *Estudo, Análise E Implementação De Sistemas de Conversores Estáticos de Elevada Eficiência: Um Estudo De Caso De Fontes Renováveis Aplicada a Estações de Telecomunicações*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- FADIGAS, E. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. *Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo*, 2012. Citado na página 21.
- GABOR, A. M. Solar panel design factors to reduce the impact of cracked cells and the tendency for crack propagation. *NREL PV Module Reliability Workshop*, 2015. Citado na página 15.
- GREENPRO, A. P. C. Energia fotovoltaica-manual sobre tecnologias, projecto e instalação. *Europa: Comissão Europeia*, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.
- JEON, C. Numerical analysis on the thermal characteristics of photovoltaic module with ambient temperature variation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 91, n. 17, p. 404–407, 2011. Citado na página 15.
- KYOCERA. *Datasheet: KD210GX-LP*. 2017. Disponível em: <<https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/KD210GX-LP.pdf?>> Citado 3 vezes nas páginas 15, 32 e 33.
- LUQUE, A. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. West Sussex, England: WILEY, 2002. Citado na página 14.

- NAKABAYASHI, R. *Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica*. Tese (Doutorado) — Tese de Mestrado, Instituto de Energia e Ambiente da USP, São Paulo, 2015. Citado na página 19.
- NASCIMENTO, C. A. do. *Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. [S.l.]: INPE, 2006. v. 1. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- PINHO, M. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2 ed. ed. Rio de Janeiro, Brasil: GTES - CEPEL - DTE - CRESESB, 2014. Citado na página 15.
- PSIM. *SPICE Module*. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- RÜTHER, R. *Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*. [S.l.]: Editora UFSC, 2004. Citado na página 19.
- SOLAR, G. *Solar Shading*. 2017. Citado na página 25.
- TR, M.; AC, R. O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica - edição 2016. *Florianópolis: Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina*, 2016. Citado na página 19.
- TUTORIALS, E. *Bypass Diodes in Solar Panels*. 2016. Citado na página 26.