

**Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis  
Coordenação de Engenharia Elétrica**

**Vanessa da Costa Marques**

**Modelagem de Painel Fotovoltaico Submetido a Sombreamento e  
Conectado à Rede Elétrica Monofásica**

**João Pessoa - PB  
Maio 2017**

**VANESSA DA COSTA MARQUES**

**MODELAGEM DE PAINEL FOTOVOLTAICO SUBMETIDO A  
SOMBREAMENTO E CONECTADO À REDE ELÉTRICA  
MONOFÁSICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação de Engenharia  
Elétrica da UFPB como um dos pré-  
requisitos para a obtenção do título em  
Bacharel em Engenharia Elétrica sob  
orientação do Prof. Rogério Gaspar de  
Almeida.**

**João Pessoa - PB  
Maio 2017**

M357m Marques, Vanessa da Costa

Modelagem de Painel Fotovoltaico Submetido a Sombreamento e Conectado à Rede Elétrica Monofásica / Vanessa da Costa Marques. – João Pessoa, 2017.

96 f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Cortinas de estacas pranchas metálicas 2. Análise 3. Taludes 4. Cortina ancorada I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 55 (043)

**Vanessa da Costa Marques**

**Modelagem de Painel Fotovoltaico submetido a Sombreamento e  
Conectado à Rede Elétrica Monofásica**

**Trabalho de Conclusão de Curso Submetido à Coordenação de  
Engenharia Elétrica da UFPB como parte dos requisitos necessários  
para à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

**Data de Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_**

**Aprovado por:**

---

**Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Orientador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Alexandre César de Castro (Avaliador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes (Avaliador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

**João Pessoa – PB**  
**Maior 2017**

Dedico este trabalho aos meus pais, Valdir e Vera, ao meu irmão Vagner, tios e tias, primos e primas, avôs (in memoriam) e avós (in memoriam).

Eu sou a luz do mundo. Quem me segue, nunca andar  em trevas, mas terá a luz da vida. João 8:12.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que iluminou e abençoou todos os meus caminhos e passos desde o início do curso de engenharia elétrica até a realização deste trabalho de conclusão do curso.

Agradeço aos meus pais, Valdir Rangel Marques e Vera Lúcia da Costa Marques, e ao meu irmão Vagner da Costa Marques, por todo empenho, carinho, apoio e dedicação que me foram dados, foram fundamentais durante todo o meu processo de formação.

Agradeço ao meu orientador prof. Rogério por ter depositado sua confiança em meu trabalho, contribuindo para a minha formação, sempre paciente, otimista e disponível para me ajudar durante esta importante etapa de minha formação.

Agradeço aos amigos que a engenharia me presenteou Ítalo, Luan, Lucas, Matheus Henrique, e ao meu namorado Matheus Araújo por todas as conversas, conselhos, ensinamentos e apoio em diversas situações da vida e do curso. Agradeço também aos amigos Ullisses, Gilvan, Rodrigo Tolêdo, Daniela e Grigório, por todos os momentos de estudos e trocas de conhecimentos e a todos os outros tantos amigos que contribuíram com a minha formação. Obrigada amigos, pelos momentos de descontração que vivemos juntos, eles foram fundamentais para aliviar as preocupações e dificuldades vividas ao longo do curso.

## RESUMO

Este trabalho pretende analisar através de simulação computacional os módulos fotovoltaicos submetidos a diferentes situações de sombreamento parcial e os seus respectivos desempenhos. Também é analisado o sombreamento dos painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica de dois modos, através de um conversor CC-CC do tipo Boost, ou através de dois conversores CC-CC do tipo Boost. Todas as simulações foram realizadas com a utilização do *software* comercial MATLAB/Simulink<sup>®</sup>.

**Palavras-Chaves:** Painel Fotovoltaico. Sombreamento. Conversor Boost. Rede Elétrica.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dopagem do tipo N do semiconductor .....	21
Figura 2.2 – Dopagem tipo P do semiconductor .....	21
Figura 2.3 – Processo hierarquizado de agrupamentos .....	22
Figura 2.4 – Esquema de funcionamento do diodo de bypass. ....	23
Figura 2.5 - Esquema de funcionamento do diodo de bypass em painéis reais. ....	24
Figura 2.6 – Arranjo de módulos fotovoltaicos simplificados .....	25
Figura 2.7 - Característica P-V-I de saída com diferentes valores de temperatura de operação e insolação constante. ....	26
Figura 2.8 - Característica P-V-I de saída com diferentes níveis de insolação e temperatura de operação constante.....	27
Figura 2.9 - a) Curva IV; b) Curva PV do arranjo fotovoltaico. ....	28
Figura 2.10 - Modelos de dois diodos da célula fotovoltaica.....	28
Figura 2.11 - Configuração Série-Paralela de Células Fotovoltaicas.....	29
Figura 2.12 - Padrão de sombreamento dos módulos utilizados na simulação. ....	29
Figura 2.13 – Característica I-V do sistema fotovoltaico.....	30
Figura 2.14 - Característica P-V do sistema fotovoltaico.....	30
Figura 2.15 - Simulação de um módulo de 36 células com um diodo <i>bypass</i> por 18 células conectadas em série. ....	31
Figura 2.16 - Curvas características I-V e P-V do modulo simulado para 3 condições diferentes de radiação. ....	32
Figura 2.17 - Circuito equivalente mais complexo para uma célula fotovoltaica. ....	32
Figura 3.1 - Célula fotovoltaica ideal com carga R.....	35
Figura 3.2 - a) Célula fotovoltaica em curto-circuito. b) Célula fotovoltaica com terminais em aberto. ....	36

Figura 3.3 – Célula Fotovoltaica sombreada. ....	37
Figura 3.4 - Modelo de Célula Fotovoltaica com Resistência em Paralelo.....	38
Figura 3.5 - Modelo de célula fotovoltaica com resistência em série. ....	39
Figura 3.6 - Modelo de Célula fotovoltaica com resistência em série e em paralelo.....	40
Figura 3.7 - Modelo de célula fotovoltaica com resistência em série e em paralelo.....	41
Figura 3.8 - Modelo de célula fotovoltaica com fonte de corrente fotogerada. ....	42
Figura 3.9 - Curvas típicas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico. ....	43
Figura 3.10 - Obtenção da corrente fotogerada ( $I_{fg}$ ) no ambiente SIMULINK®.....	45
Figura 3.11 - Obtenção da corrente ( $I_{or}$ ) no ambiente SIMULINK®.....	46
Figura 3.12 - Obtenção da corrente ( $I_o$ ) no ambiente SIMULINK®.....	46
Figura 3.13 - Obtenção da corrente $I$ no ambiente SIMULINK®.....	47
Figura 3.14 - Célula Fotovoltaica no ambiente SIMULINK®.....	47
Figura 3.15 - Modelo completo da célula fotovoltaica ambiente SIMULINK®.....	48
Figura 3.16 - 36 células fotovoltaicas conectadas em série, com diodos <i>bypass</i> . ....	50
Figura 3.17 - Grupo de 18 células fotovoltaicas conectadas em série.....	51
Figura 3.18 - Módulo Fotovoltaico sem sombreamento. ....	53
Figura 3.19 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento. ....	53
Figura 3.20 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.....	54
Figura 3.21 - Módulo Fotovoltaico com sombreamento. ....	55
Figura 3.22 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento. ....	55
Figura 3.23 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento. ....	56
Figura 3.24 - Módulo Fotovoltaico com sombreamento. ....	57
Figura 3.25 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento, sem diodo <i>bypass</i> .....	57
Figura 3.26 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento, sem diodo <i>bypass</i> .....	58
Figura 3.27 - Módulo Fotovoltaico sem sombreamento. ....	59
Figura 3.28 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento. ....	59

Figura 3.29 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.....	60
Figura 3.30 - Módulo Fotovoltaico com sombreamento parcial. ....	61
Figura 3.31 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento. ....	61
Figura 3.32 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento. ....	62
Figura 4.1 - Modelo Equivalente Simplificado e Modelo Célula por Célula.....	67
Figura 4.2 - Característica I-V dos modelos Equivalente e Célula por Célula.....	68
Figura 4.3 - Característica I-V dos modelos Equivalente, Célula por Célula e do MATLAB®. .....	69
Figura 4.4 - Módulos Fotovoltaicos Sem Sombreamento. ....	71
Figura 4.5 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.....	72
Figura 4.6 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento. ....	72
Figura 4.7 - Módulos Fotovoltaicos Submetido a Sombreamento. ....	73
Figura 4.8 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento. ....	74
Figura 4.9 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento. ....	74
Figura 4.10 - Módulos Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica. ....	75
Figura 4.11 - Potência dos Painéis Conectados à Rede Elétrica. ....	76
Figura 4.12 – Primeiro grupo de quatro Módulos Fotovoltaicos Sem Sombreamento. ....	77
Figura 4.13 – Segundo grupo de quatro Módulos Fotovoltaicos Sem Sombreamento. ....	78
Figura 4.14 - Curva I-V do primeiro grupo de quatro módulos fotovoltaicos, sem sombreamento.....	79
Figura 4.15 - Curva P-V do primeiro grupo de quatro módulos fotovoltaicos, sem sombreamento.....	79
Figura 4.16 - Curva I-V do segundo grupo de quatro módulos fotovoltaicos, sem sombreamento.....	80
Figura 4.17 - Curva P-V do segundo grupo de quatro módulos fotovoltaicos, sem sombreamento.....	80
Figura 4.18 – Primeiro grupo de quatro Módulos Fotovoltaicos Sem Sombreamento. ....	81

Figura 4.19 – Segundo grupo de quatro Módulos Fotovoltaicos Submetidos a Sombreamento. .....	82
Figura 4.20 - Curva I-V do primeiro grupo de módulos fotovoltaico, sem sombreamento. ....	83
Figura 4.21 - Curva P-V do primeiro grupo de módulos fotovoltaico, sem sombreamento. ..	83
Figura 4.22 - Curva P-V do segundo grupo de módulo fotovoltaico, com sombreamento. ....	85
Figura 4.23 - Curva I-V do segundo grupo de módulo fotovoltaico, com sombreamento. ....	85
Figura 4.24 - Módulos Conectados a Rede Elétrica Através De Dois Conversores Boost. ....	86
Figura 4.25 - Potência dos Painéis Conectados à Rede Elétrica. ....	87
Figura 4.26 - Tensão dos Painéis Conectados à Rede Elétrica. ....	89
Figura 4.27 - Corrente dos Painéis Conectados à Rede Elétrica. ....	90
Figura 4.28 - Potência dos painéis com um Boost <i>versus</i> com dois Boosts. ....	91
Figura 4.29 - Impacto do Sombreamento Parcial na Rede Elétrica. ....	93

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Características elétricas do módulo Solaris S140 P .....	52
Tabela 4.1 – Dados do Módulo Fotovoltaico LF-335WP-US.....	68

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1. Motivação .....	17
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivos Específicos .....	17
1.3. Organização do Trabalho.....	18
<b>2. EMBASAMENTO TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1. Física dos Semicondutores .....	19
2.1.1. O Efeito Fotovoltaico .....	21
2.1.2. Célula, Módulo e Array Fotovoltaico.....	22
2.1.3. Diodo de <i>Bypass</i> .....	22
2.2. Revisão Bibliográfica .....	24
<b>3. MÓDULO FOTOVOLTAICO COM SOMBREAMENTO .....</b>	<b>34</b>
3.1. Modelo de Célula Fotovoltaica Ideal pelo seu Circuito Equivalente .....	34
3.2. Modelo de Célula Fotovoltaica Real pelo seu Circuito Equivalente.....	37
3.3. Parâmetro da Célula Fotovoltaica.....	42
3.4. Modelo de Célula Fotovoltaica para Simulação no Ambiente Computacional SIMULINK <sup>®</sup> .....	43
3.4.1. Implementação do Modelo no SIMULINK <sup>®</sup> .....	45
3.5. Modelo Fotovoltaico com Sombreamento Parcial .....	49
3.5.1. Análise do Sombreamento do Módulo Fotovoltaico .....	51
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>64</b>
4.1. Considerações Preliminares.....	65
4.1.1. Modelo Simplificado do Painel Fotovoltaico.....	65
4.2. Configurações de ligação dos Painéis Fotovoltaicos à Rede Elétrica .....	69

4.2.1. Avaliação dos Painéis ligados com Um ou Dois Boots à Rede Elétrica. ....	90
4.3. Comportamento da rede elétrica.....	92
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>94</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma forma de energia secundária, obtida a partir de diferentes fontes de energia primária. Os níveis de consumo de energia elétrica têm aumentado ao passar dos anos, e com isso as fontes primárias de energia utilizadas vem se tornando escassas. Devido à diminuição da reserva de combustíveis fósseis, ao aumento do efeito do aquecimento global, aos problemas relacionados à degradação do meio ambiente na geração de energia elétrica, crises energéticas surgiram e obrigaram o homem a procurar outras fontes de energias, as renováveis (COUTINHO, 2016).

A geração poderá então apresentar maiores custos com o passar dos anos, e com o crescimento do consumo existe a necessidade de expansão do sistema nacional interligado, SIN, e da capacidade das linhas de transmissão, LTs, que o compõem. Além da necessidade de novas fontes de energia, também existe a necessidade de uma energia renovável que promova redução dos impactos ambientais. Desse modo, percebe-se a importância do investimento em novas fontes de energias renováveis, como a energia fotovoltaica, pois é importante aproveitar recursos locais próximo aos pontos de consumo para produção de energia elétrica, diminuindo assim as perdas durante a transmissão de energia elétrica e evitando os investimentos em obras de expansão (DRIEMEIER, 2009).

A energia solar fotovoltaica é uma das mais promissoras formas de energia renovável, pois a energia solar é relativamente bem distribuída pela superfície da terra. Nas últimas décadas tem tido um enorme crescimento a nível mundial, com diversos programas governamentais a incentivarem a instalação deste sistema (LOPES, 2013).

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico. A representação típica da característica de saída de um dispositivo fotovoltaico denomina-se curva corrente tensão, também conhecida como curva I-V. Os principais fatores que afetam a característica I-V do gerador fotovoltaico são a intensidade de radiação e a temperatura. Logo, o estudo sobre o posicionamento do painel fotovoltaico na instalação, o impacto do sombreamento nas células fotovoltaicas, é de grande importância, pois é através desse estudo que se pode melhorar a eficiência da geração de energia elétrica das instalações.



É indispensável nesse estudo o uso de ferramentas de simulação, pois aliada a elas se pode fazer simulações e testes de como se comporta o painel fotovoltaico, ou a rede elétrica conectada ao painel, antes de fazer qualquer instalação, e de acordo com os resultados obtidos, tomar decisões para melhorar a eficiência de futuras instalações fotovoltaicas.

## **1.1. Motivação**

Diante do exposto, fez-se necessário modelar o painel fotovoltaico conectado à rede elétrica monofásica para estudo do desempenho dos módulos considerando o efeito do sombreamento. A análise de diferentes situações de intensidade de radiação sobre o painel fotovoltaico é de extrema importância, pois, afeta principalmente a corrente, definindo a corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico. A análise do sombreamento incidente no painel fotovoltaico pode ser determinante na escolha do local de instalação mais apropriado, pois o sombreamento afeta a radiação incidente e é um fator que influencia diretamente na quantidade de energia produzida pelo sistema fotovoltaico.

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho visa modelar o painel fotovoltaico representando matematicamente cada célula de cada módulo individualmente de modo a estudar como o efeito do sombreamento afeta o desempenho dos módulos fotovoltaicos, e qual o efeito no sistema elétrico caso este painel fotovoltaico seja conectado à rede elétrica monofásica.

### **1.2.1. Objetivos Específicos**

- Modelar o painel fotovoltaico, célula por célula e de forma simplificada equivalente;
- Implementar o modelo no ambiente de simulação SIMULINK<sup>®</sup> presente no *software* MATLAB<sup>®</sup>;
- Analisar o sombreamento parcial sobre o painel fotovoltaico;

- Conectar o painel fotovoltaico na rede elétrica monofásica e analisar a rede elétrica submetida ao sombreamento parcial do painel fotovoltaico;
- Avaliar e discutir os resultados obtidos.

### **1.3. Organização do Trabalho**

O trabalho está organizado em cinco capítulos, descritos conforme a ordem abaixo:

- No capítulo 2 serão apresentadas a fundamentação teórica do TCC e a revisão bibliográfica. Sendo apresentados os principais trabalhos que tem cuja especialidade o sombreamento parcial em módulos fotovoltaicos;
- No capítulo 3 será apresentado a modelagem da célula fotovoltaica e sua implementação no SIMULINK<sup>®</sup>;
- No capítulo 4 serão apresentadas as discussões referentes aos resultados obtidos dependendo do tipo de sombreamento a qual o painel solar estava submetido;
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões referentes aos resultados obtidos com este trabalho.

## **2. EMBASAMENTO TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico à respeito das células fotovoltaicas, que são basicamente constituídas por semicondutores. Este embasamento contém teorias acerca da composição das células fotovoltaicas e sua capacidade de produzir energia elétrica através da incidência solar, a qual chama-se de efeito fotovoltaico. Em seguida, será abordada a situação de sombreamento parcial sobre as células fotovoltaicas e suas consequências na produção de energia elétrica além de uma breve revisão bibliográfica de textos nesta área do conhecimento.

### **2.1. Física dos Semicondutores**

No universo existem objetos com escalas de grandezas enormes como planetas, estrelas, bem como também existem objetos com escalas de grandezas muito pequenas, como é o caso de partículas que compõem a matéria, em que a menor destas partículas é chamada de átomo.

O átomo é formado por um núcleo com carga positiva, e por elétrons que tem cargas negativas, e estes últimos orbitam ao redor do núcleo em distintas camadas energéticas. Para cada carga negativa de um elétron, existe uma partícula com carga positiva dentro do núcleo, o próton. Assim as cargas positivas e negativas, do núcleo e dos elétrons, respectivamente, se combinam, tornando o átomo eletricamente neutro (ATKINS & JONES, 2012).

A atividade química do átomo é determinada pelos elétrons de valência. Estes elétrons circundam a camada energética mais externa do átomo, também chamada de camada de valência. Os átomos de um mesmo elemento ou de diferentes elementos são capazes de se combinar através do ganho, perda ou compartilhamento de elétrons da camada de valência, essas combinações ou ligações químicas entre os elementos podem ser explicadas pela teoria do octeto, teoria esta proposta pelos cientistas Lewis e Kossel. A teoria diz que, os átomos adquirem estabilidade eletrônica quando apresentam oito elétrons na sua camada mais externa. Quando existe compartilhamento de elétrons entre os átomos, não ocorrem perdas ou

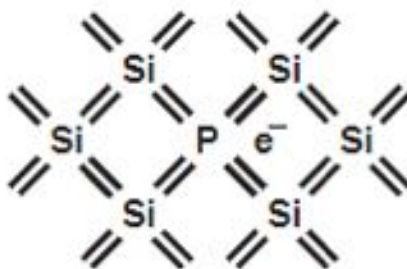
ganhos de elétrons, e as estruturas formadas são eletricamente neutras e denominadas moléculas. Contudo, no compartilhamento tem-se a ligação covalente, em que os átomos formam pares eletrônicos, ou seja, existe um elétron de cada átomo na ligação. Isto é, os elétrons pertencem simultaneamente aos dois átomos (USBERCO, 2006).

Os materiais semicondutores são formados por átomos tetravalentes, ou seja, possuem quatro elétrons na sua camada mais externa. Os semicondutores no seu estado puro apresentam alta resistência à passagem de elétrons, logo caso se queira que o semicondutor funcione como condutor deve-se adicionar ou remover certa quantidade de elétrons do material. (BRAGA, 2008).

As células fotovoltaicas são fabricadas com materiais semicondutores, e a maioria é feita de silício. Entretanto, o silício puro não possui elétrons livres em sua camada de valência, pois só contém quatro elétrons na sua camada mais externa, o que o torna um mau condutor elétrico. Com efeito, as células fotovoltaicas utilizam silício em sua forma impura, ou seja, com acréscimo de impurezas no semicondutor outrora intrínseco. Este processo é denominado de dopagem em que o condutor dopado é chamado de condutor extrínseco. Ao se introduzir átomos de um elemento em outro, pode-se ter excesso de elétrons ou falta de elétrons. Se existir elétrons em excesso, pode-se dizer que há elétrons livres e estes estão fracamente ligados ao átomo, logo, com pouca energia, podem entrar na faixa de condução. Neste caso, se diz que a dopagem é tipo N. Entretanto, se faltar elétrons para satisfazer as ligações necessárias, pode-se dizer que existem lacunas, e que a dopagem é tipo P.

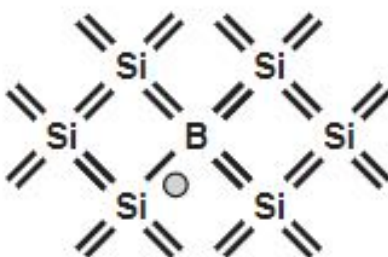
Em geral, no processo de dopagem do silício são utilizados átomos de fósforo e boro. O átomo de fósforo contém cinco elétrons em sua camada de valência, e por outro lado, o átomo de silício contém quatro elétrons em sua camada de valência, logo, ao se introduzir o fósforo no silício, haverá um elétron em excesso, e neste caso, diz-se que o fósforo é um dopante doador de elétrons, ou dopante tipo N, como ilustrado na Figura 2.1. Se, por outro lado, for introduzido o átomo de boro no átomo de silício, sabendo-se que o boro contém apenas três elétrons em sua camada de valência, faltará um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício, ou seja, haverá uma lacuna (BRAGA, 2008). Dessa forma, se pode dizer que o boro é um dopante tipo P, como visto na Figura 2.2.

Figura 2.1 – Dopagem do tipo N do semiconductor



Fonte: (Razavi. 2009).

Figura 2.2 – Dopagem tipo P do semiconductor.



Fonte: (Razavi. 2009).

### 2.1.1. O Efeito Fotovoltaico

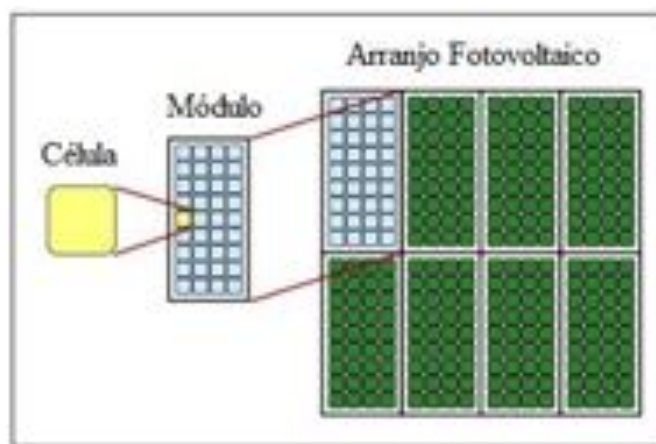
A maioria das células fotovoltaicas são feitas de silício dopado e consistem de uma junção PN. Como foi abordado anteriormente, na dopagem tipo N têm-se elétrons em excesso e na dopagem tipo P têm-se falta de elétrons, desta forma, ao juntar os canais P e N, os elétrons são atraídos e ocupam o lugar das lacunas, dando origem a duas correntes de difusão que transportam uma grande carga de um lado para o outro da junção, e isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado N, que o torna eletricamente positivo. Isto ocorre até que a corrente de difusão caia a zero, pois os terminais em aberto não podem transportar corrente indefinidamente. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado N para o lado P. Este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado N. Quando as células fotovoltaicas estão expostas sob a radiação solar, ocorre um movimento de cargas na junção PN das células expostas aos fótons. Esse

movimento de cargas, ou corrente elétrica, devido à presença da luz solar é chamado de efeito fotovoltaico.

### 2.1.2. Célula, Módulo e Arranjo Fotovoltaico

A célula fotovoltaica transforma a energia luminosa solar em corrente elétrica, através do efeito fotovoltaico. O módulo ou painel fotovoltaico é uma associação de células fotovoltaicas. Essas interligações de células quando feitas em série, são realizadas para obtenção de tensões mais elevadas, e quando feitas em paralelo são realizadas para obtenção de correntes mais elevadas. O arranjo é uma interligação de vários módulos fotovoltaicos. Os módulos podem ser conectados através de ligações em série, paralelo ou mista, desse modo é possível obter diferentes valores de tensão e corrente. O processo de agrupamento é ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Processo hierarquizado de agrupamentos



Fonte: Adaptado de (Carneiro. 2010).

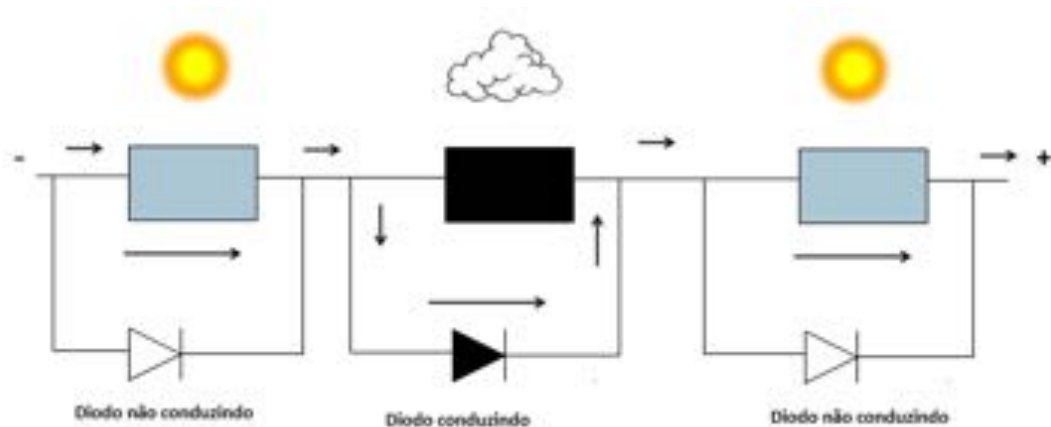
### 2.1.3. Diodo de *Bypass*

Os diodos de *bypass* funcionam como dispositivos de proteção. Eles são utilizados para evitar que todo o módulo ou painel fotovoltaico seja afetado caso ocorra algum evento, como por exemplo, o sombreamento parcial. O diodo de *bypass* é utilizado de modo que apenas a célula defeituosa seja substituída caso apresente defeito, ou que a célula afetada pelo

sombreamento não prejudique as demais. Desse modo, a célula sombreada não gera energia elétrica, mas também não se comporta como carga para as demais células.

Os diodos de *bypass* são ligados em paralelo, com cada célula que integra uma fileira em série, para que possam desviar a corrente produzida pelas demais células da fileira. Quando não existe sombreamento na célula, o diodo de *bypass* encontra-se reversamente polarizado, não permitindo que por ele circule corrente elétrica. Quando existe sombreamento na célula, o diodo de *bypass* encontra-se diretamente polarizado e, portanto, permitindo que por ele circule corrente. O esquema de funcionamento do diodo de *bypass* é ilustrado na Figura 2.4.

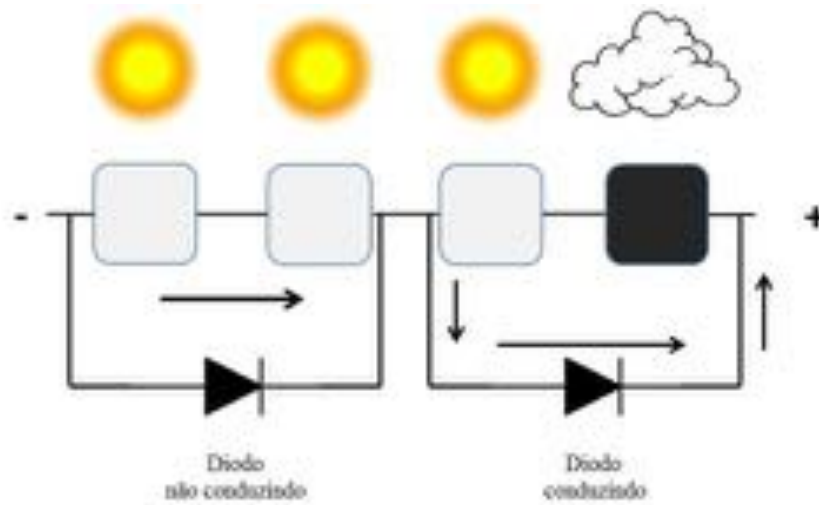
Figura 2.4 – Esquema de funcionamento do diodo de *bypass*.



Fonte: Adaptado de (Coutinho. 2016).

Entretanto os painéis reais apresentam diodos *bypass* que, em regra, são conectados a grupos de células e não a cada célula, e geralmente dividem o módulo pela metade, como apresentado na Figura 2.5. O ideal seria um diodo para cada célula, mas isso elevaria o custo de produção dos painéis.

Figura 2.5 - Esquema de funcionamento do diodo de bypass em painéis reais.



Fonte: (Coutinho. 2016).

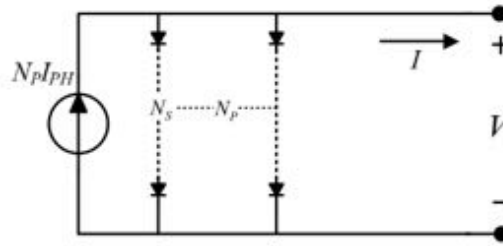
## 2.2. Revisão Bibliográfica

Com o sombreamento de apenas um módulo do sistema fotovoltaico, a corrente do sistema diminui e, conseqüentemente sua potência também, pois um módulo sombreado funciona como uma carga para um sistema fotovoltaico. Dessa forma, é importante minimizar o sombreamento de módulos, fazendo um estudo acerca do melhor local para sua instalação, a fim de maximizar o aproveitamento da energia solar disponível. Em alguns casos, não é possível evitar o sombreamento parcial, pois o sombreamento é causado por folhas de árvores ou nuvens, por exemplo. Entretanto, para evitar que toda potência gerada pelo sistema seja perdida pelo fato de se ter um módulo sombreado, podem ser usados dispositivos de proteção.

Samer Said *et al* (2012) apresentaram um estudo relativo aos efeitos do sombreamento parcial sobre um arranjo de módulos fotovoltaicos baseado no modelo matemático simplificado, de uma célula fotovoltaica ideal, como ilustrada na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Arranjo de módulos fotovoltaicos simplificados



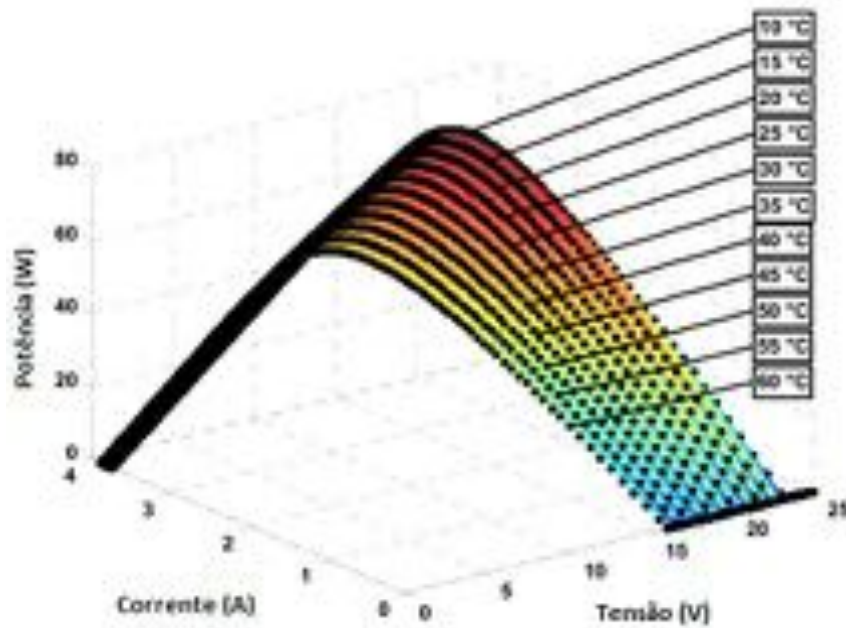
Fonte: (Said, 2012).

Os autores analisaram o comportamento dos módulos fotovoltaicos em duas situações distintas. Na primeira situação, os módulos fotovoltaicos estavam submetidos à variação de temperatura e níveis de insolação solar constante sobre os módulos. Na segunda situação, os módulos estavam parcialmente sombreados, ou seja, estavam submetidos a diferentes níveis de insolação solar e temperatura constante.

A Figura 2.7 mostra a simulação do arranjo obtida pelos autores, com temperatura de operação variando e níveis de insolação constantes. A representação típica da característica de saída de um dispositivo fotovoltaico denomina-se curva corrente *versus* tensão, também conhecida como curva I-V. A curva potência *versus* tensão ou curva P-V do dispositivo fotovoltaico, também é utilizada para as análises de resultados.

Na análise dos cenários propostos pelos autores, os mesmos concluem que com o aumento da temperatura de operação, a corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico aumenta, contudo a potência máxima de saída diminui.

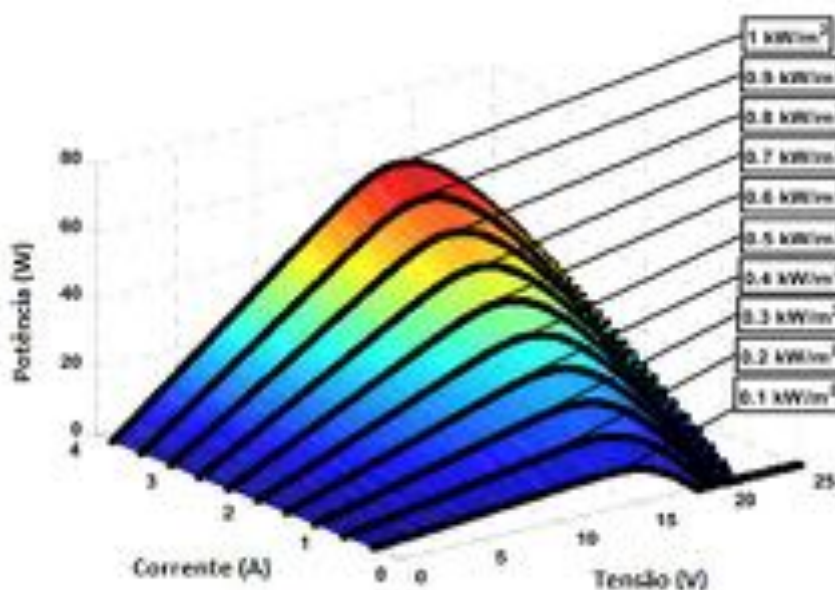
Figura 2.7 - Característica P-V-I de saída com diferentes valores de temperatura de operação e insolação constante.



Fonte: Adaptado de (Said, 2012).

Na análise do caso em que a temperatura de operação permanece constante e ocorre mudança da insolação, os autores concluem que se houver aumento da insolação nos módulos, a corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico aumenta e a potência máxima de saída aumenta, e vice-versa, como verificado na Figura 2.8. Estudando este mesmo caso, em particular, os autores introduziram diodos de *bypass* em cada módulo do arranjo, pois os módulos sombreados limitam o fluxo da corrente.

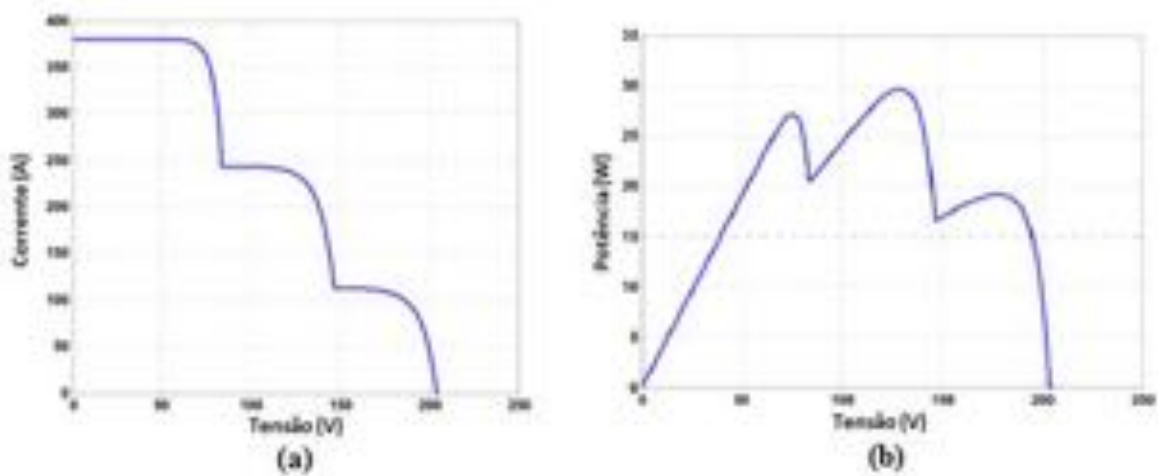
Figura 2.8 - Característica P-V-I de saída com diferentes níveis de insolação e temperatura de operação constante.



Fonte: Adaptado de (Said, 2012).

Os autores, por conseguinte, analisaram as curvas I-V e P-V dos módulos fotovoltaicos. A Figura 2.9.(a) mostra a característica da curva I-V, que devido ao efeito do sombreamento parcial no arranjo fotovoltaico apresentou múltiplos passos, que indicam que as células não sombreadas conduzem a corrente máxima por um tempo, até que estas se igualem a corrente da célula com menor incidência solar. A Figura 2.9.(b) mostra a característica da curva P-V, que apresentou múltiplos picos de potência. Com base nas análises das curvas I-V e P-V, os autores concluíram que a eficiência do algoritmo responsável por rastrear o máximo ponto de potência, também chamado de MPPT pode ser diminuída. Pois, a característica P-V apresenta múltiplos picos de potência, então o MPPT pode não ser capaz de rastrear o pico correto, no caso o de maior potência.

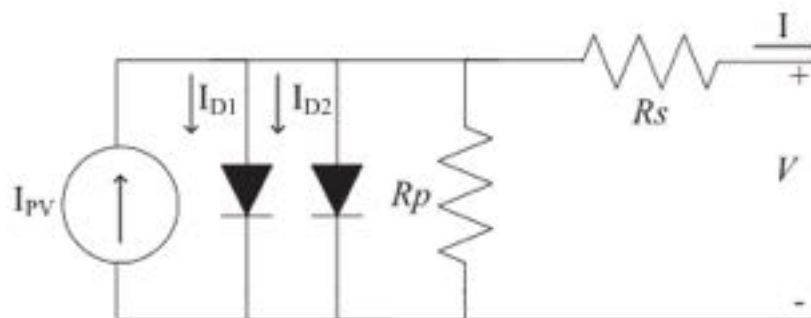
Figura 2.9 - a) Curva I-V; b) Curva P-V do arranjo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (Said. 2012).

Ishaque *et al* (2011) apresentaram um modelo de célula fotovoltaica que contém dois diodos, pois segundo os autores, este modelo com dois diodos tem melhor precisão no nível de irradiância baixo, que ocorre durante a condição de sombreamento parcial. Os autores explicaram que o modelo simplificado ou de diodo único desconsidera a perda da recombinação na região de depleção, entretanto, na célula solar real, a recombinação representa uma perda substancial que não pode ser adequadamente modelada usando um diodo simples. Portanto ao se levar em consideração essa perda é necessário um modelo mais preciso, e a este modelo dá-se o nome de modelo de dois diodos, conforme ilustrado na Figura 2.10.

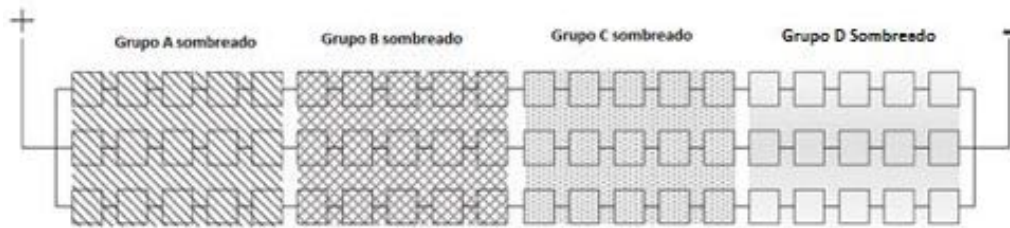
Figura 2.10 - Modelos de dois diodos da célula fotovoltaica.



Fonte: (Ishaque. 2010).

Na simulação realizada pelos referidos autores, foi utilizada a configuração série-paralela de células fotovoltaicas, como verificado na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Configuração Série-Paralela de Células Fotovoltaicas.



Fonte: Adaptado de (Ishaque. 2010).

Quatro situações de sombreamentos distintos foram consideradas e simuladas por (Ishaque. 2010), conforme apresentado na Figura 2.12.

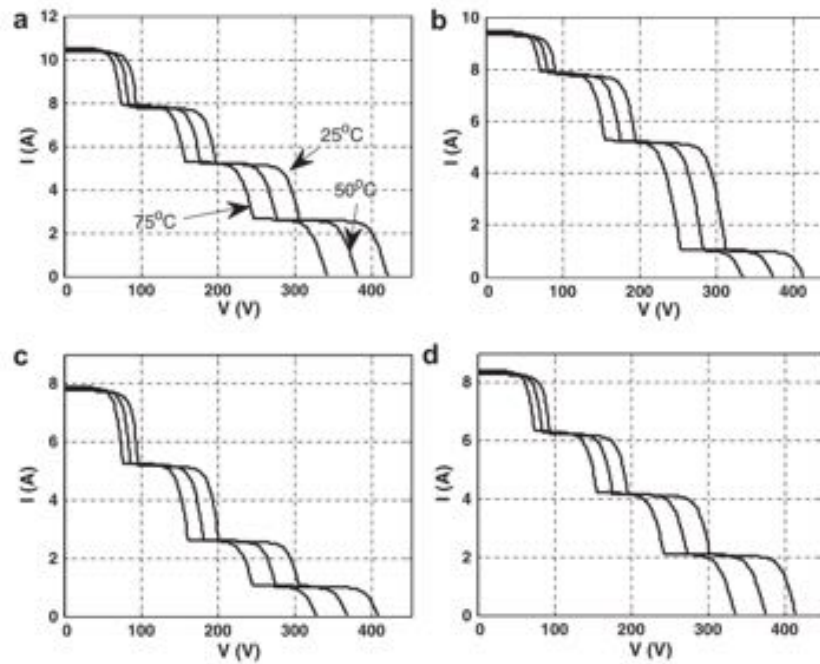
Figura 2.12 - Padrão de sombreamento dos módulos utilizados na simulação.

CURVAS	Sombreamento grupo A (kW/m <sup>2</sup> )	Sombreamento grupo B (kW/m <sup>2</sup> )	Sombreamento grupo C (kW/m <sup>2</sup> )	Sombreamento grupo D (kW/m <sup>2</sup> )
a	1	0.75	0.5	0.25
b	0.9	0.75	0.5	0.1
c	0.75	0.5	0.25	0.1
d	0.8	0.6	0.4	0.2

Fonte: Adaptado de (Ishaque. 2010).

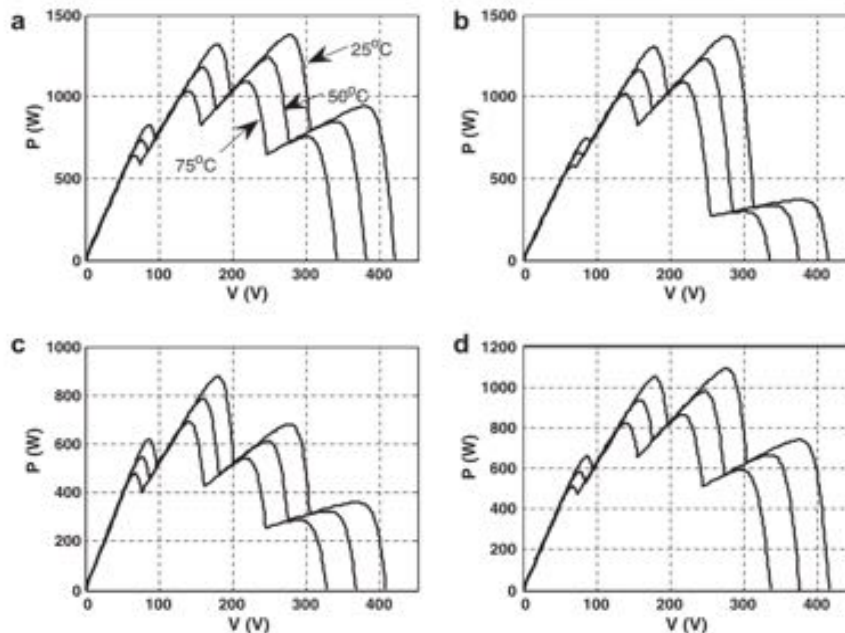
Para cada curva, a avaliação foi feita em três diferentes temperaturas, 25°C, 50°C e 75°C, como ilustrado nas Figuras 2.13 e 2.14. A Figura 2.13 exibe as curvas de característica I-V do sistema fotovoltaico, e a Figura 2.14 exibe as curvas de característica P-V do sistema fotovoltaico. As simulações realizadas constataram que o comportamento das curvas exibem um número múltiplo de degraus e picos que são iguais aos números de níveis de irradiância que são impostos no arranjo.

Figura 2.13 – Característica I-V do sistema fotovoltaico.



Fonte: (Ishaque. 2010).

Figura 2.14 - Característica P-V do sistema fotovoltaico.

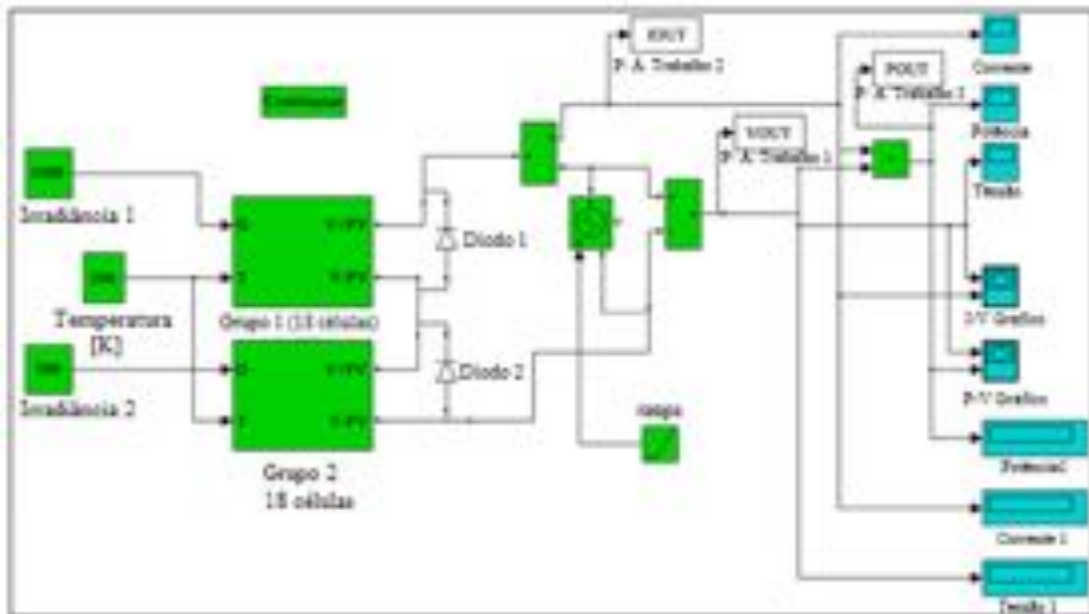


Fonte: (Ishaque. 2010).

Alsayid *et al* (2013) apresentaram um estudo relativo aos efeitos do sombreamento parcial sobre um arranjo de células fotovoltaicas baseado em diferentes situações de sombreamento. Foram utilizados dois grupos de células fotovoltaicas conectados em série, representando um módulo. Cada grupo é formado por dezoito células fotovoltaicas em série,

totalizando trinta e seis células fotovoltaicas em série. Cada grupo foi conectado a um diodo de *bypass*, que conduz caso ocorra situação de sombreamento sobre algum grupo de células. O modelo matemático utilizado para simulação do módulo fotovoltaico foi baseado nas equações do modelo de diodo simples. A Figura 2.15 ilustra a implementação do sistema fotovoltaico pelos autores, composto pelos grupos de células fotovoltaicas e diodos de *bypass* no software MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup> para simulação do módulo em diferentes condições de sombreamento.

Figura 2.15 - Simulação de um módulo de 36 células com um diodo *bypass* por 18 células conectadas em série.

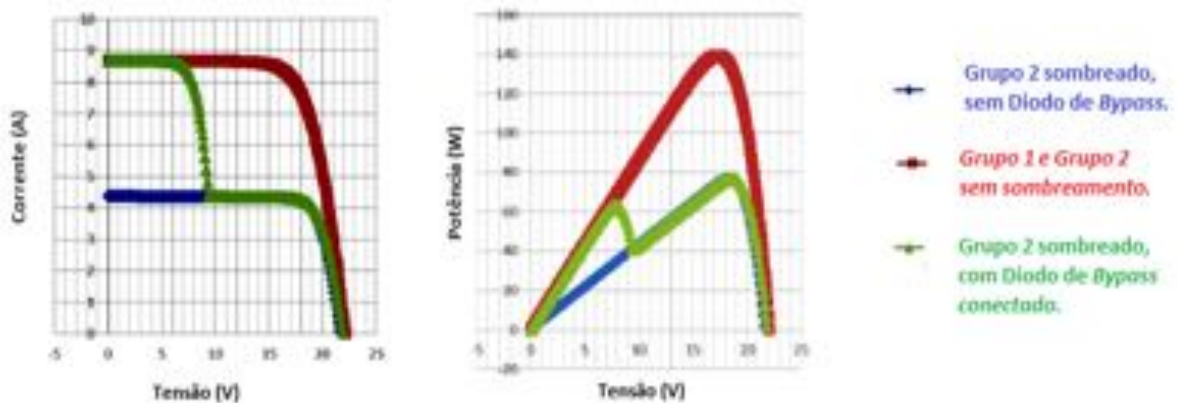


Fonte: Adaptado de (Alsayid, 2013).

Os autores simularam três casos distintos como ilustrado na Figura 2.16. No primeiro caso não existe sombreamento nos grupos de células. No segundo caso, existe sombreamento em um grupo de células. E por fim, o terceiro caso é semelhante ao segundo caso, entretanto, com os diodos de *bypass* desconectados.



Figura 2.16 - Curvas características I-V e P-V do módulo simulado para 3 condições diferentes de radiação.

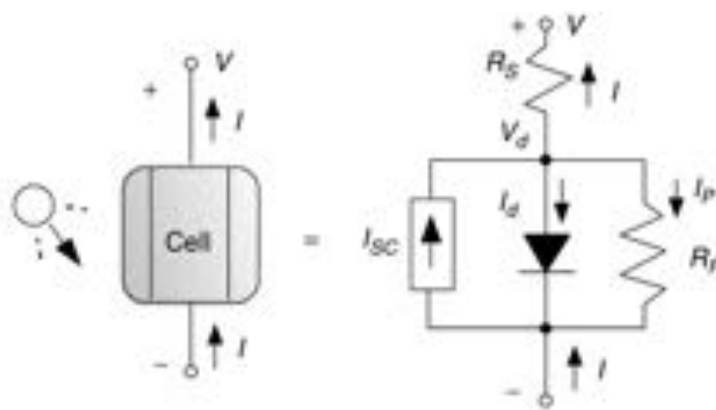


Fonte: Adaptado de (Alsayid. 2013).

Nos casos em que houve sombreamento parcial, pode-se observar que a corrente diminui de forma a criar um novo patamar com um valor de corrente menor, e no caso particular em que o diodo de *bypass* não está presente, ela já inicia de outro patamar cujo valor é menor. Nesses casos a potência de saída é inferior à potência máxima.

Masters (2004) e Sumanthi *et al* (2015) modelam a célula fotovoltaica acrescentando a resistência série e paralela ao modelo ideal proposto por Said (2012). O modelo proposto por Masters (2004) é ilustrado na figura 2.17. Este autor explica que caso se queira lidar com a realidade e com o problema do sombreamento, um modelo mais complexo se faz necessário.

Figura 2.17 - Circuito equivalente mais complexo para uma célula fotovoltaica.



Fonte: (Masters. 2004).

Com base nas literaturas descritas, o estudo proposto por este trabalho de conclusão de curso optou por modelar a célula fotovoltaica com base na estrutura de circuito equivalente proposto por Masters (2004) e Sumanthi *et al* (2015). Por conseguinte, a avaliação dos efeitos



do sombreamento nos painéis fotovoltaicos foi baseado nos procedimentos apresentados por Alsayid *et al* (2013).

### **3. MÓDULO FOTOVOLTAICO COM SOMBREAMENTO**

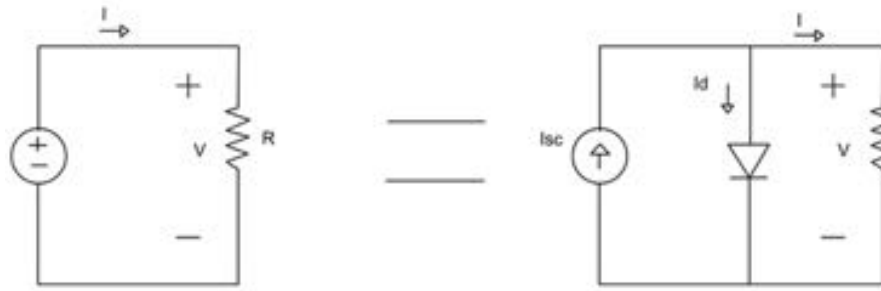
No âmbito das fontes renováveis de energia, a energia fotovoltaica é uma opção para quem deseja produzir sua própria energia até mesmo em casa, pois ela não apresenta riscos à saúde das famílias e seu impacto sobre o meio ambiente é baixíssimo, já que não emite resíduos poluentes sobre o mesmo. Entretanto, algumas pessoas não levam em consideração o local de instalação de painéis fotovoltaicos. Além da necessidade de incidência solar sobre o painel, é necessário que a área seja o mais livre possível de sombreamento, muitas vezes causado por edificações que circundam o ambiente, árvores, mudanças diárias de ângulos de sol, existência de nuvens.

O sombreamento parcial sobre a célula fotovoltaica diminui a produção de energia elétrica e torna a característica fotovoltaica mais complexa, com múltiplos picos. Neste capítulo será apresentado o modelo de uma célula fotovoltaica e suas equações características que serão utilizadas para implementação do modelo e simulação da célula no ambiente MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup>.

#### **3.1. Modelo de Célula Fotovoltaica Ideal pelo seu Circuito Equivalente**

A célula fotovoltaica ideal pode ser representada por uma fonte de corrente contínua, cujo valor é proporcional ao nível de radiação  $G$  que incide sobre a célula, em paralelo com um diodo, como ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Célula fotovoltaica ideal com carga R.

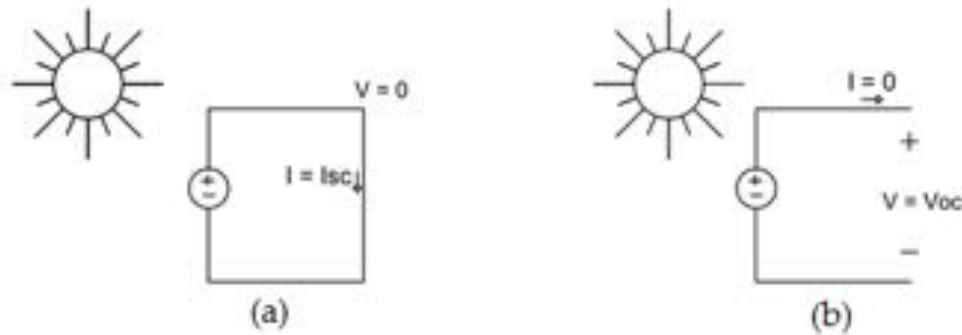


Fonte: Da Autora.

A partir da análise da célula fotovoltaica apresentado na figura 3.1, pode-se descrever a corrente de saída,  $I$ , da célula fotovoltaica, como sendo a diferença entre a corrente da fonte de corrente contínua,  $I_{sc}$ , e a corrente que circula no diodo em paralelo,  $I_d$ , produzindo assim a equação 3.1. Para representar a célula fotovoltaica, deve-se levar em conta as perdas de condução e as correntes de fuga, que são representadas, respectivamente, no modelo elétrico, por uma resistência em série e uma resistência em paralelo, acrescentadas ao modelo ideal.

A corrente de curto-circuito,  $I_{sc}$ , é a corrente que flui quando os terminais estão em curto circuito, conforme apresenta a Figura 3.2.(a), e a tensão de circuito aberto,  $V_{oc}$ , é a tensão entre os terminais, quando os fios são deixados abertos, conforme ilustra a Figura 3.2.(b).  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ , são duas variáveis de interesse para a célula e para o seu circuito equivalente.

Figura 3.2 - a) Célula fotovoltaica em curto-circuito. b) Célula fotovoltaica com terminais em aberto.



Fonte: Da Autora.

Quando se tem o caso representado pela figura 3.2.(a), não existe corrente no diodo, portanto a tensão no diodo é zero, e toda a corrente flui através do curto circuito. A  $I_{sc}$  deve ter o mesmo valor da fonte de corrente ideal.

$$I = I_{sc} - I_d \quad (3.1)$$

O diodo de junção P-N é descrito pela equação (3.2), conforme Masters (2004). Onde  $I_o$  é a corrente de saturação reversa do diodo;  $q$  é a constante carga do elétron;  $k$  é a constante de Boltzman;  $T$  é a temperatura da célula fotovoltaica e  $V_d$  é a tensão sobre o diodo.

$$I_d = I_o \left( e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Substituindo a equação (3.2) na equação (3.1), tem-se a equação (3.3), que também indica a equação da corrente de saída da célula fotovoltaica.

$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Quando os terminais da célula fotovoltaica são deixados abertos, tem-se que a corrente de saída é zero,  $I=0$ . Neste caso, a tensão sobre o diodo,  $V_d$ , é igual a tensão de circuito aberto,  $V_{oc}$ . ( $V_d=V_{oc}$ ).

Substituindo então  $I$  e  $V_d$  na equação (3.3), e fazendo simplificações, tem-se a tensão de circuito aberto da célula fotovoltaica, indicada na equação (3.4).

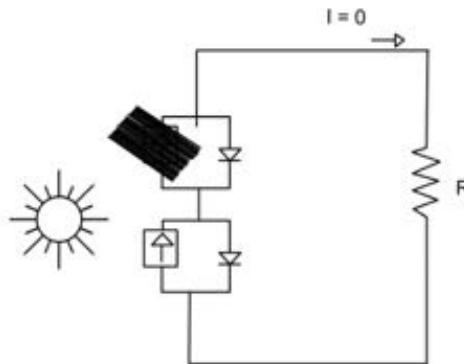
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \right) \quad (3.4)$$

Em ambas as equações a corrente de curto circuito  $I_{sc}$  é diretamente proporcional à insolação.

### 3.2. Modelo de Célula Fotovoltaica Real pelo seu Circuito Equivalente

Existem momentos em que um circuito fotovoltaico equivalente mais complexo do que o apresentado anteriormente é necessário. Por exemplo, considere o impacto do sombreamento sobre um conjunto de células ligadas em série, como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Célula Fotovoltaica sombreada.



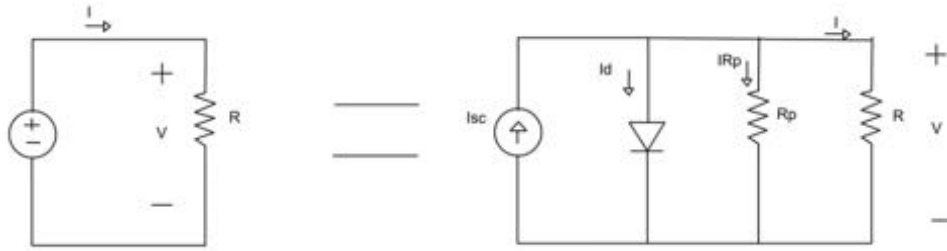
Fonte: Da Autora.

O circuito equivalente simples de células em série, sugere que nenhuma corrente pode fluir para a carga se qualquer célula estiver sombreada.

Embora sejam verdade que os módulos fotovoltaicos sejam muito sensíveis ao sombreamento, ainda existirá alguma corrente fluindo para a carga quando a célula estiver sombreada. Precisa-se então de um modelo mais complexo para lidar com a realidade e com o problema do sombreamento. O modelo mais complexo inclui uma resistência de fuga paralela, e uma resistência em série.

Para se analisar o circuito mais complexo, considera-se inicialmente que a célula fotovoltaica ideal mostrada na figura 3.1 tenha sido modificada para incluir apenas uma resistência em paralelo,  $R_p$ . A fonte de corrente ideal  $I_{sc}$  neste caso fornece corrente para o diodo, para a resistência paralela ( $R_p$ ) e para a carga.

Figura 3.4 - Modelo de Célula Fotovoltaica com Resistência em Paralelo.



Fonte: Da Autora.

A partir da análise da célula fotovoltaica com resistência em paralelo, apresentada na Figura 3.4, pode-se descrever a corrente de saída,  $I$ , da célula fotovoltaica como sendo a diferença entre a corrente da fonte de corrente contínua,  $I_{sc}$ , a corrente que circula no diodo em paralelo,  $I_d$ , e a corrente que circula na resistência em paralelo ao diodo,  $I_{Rp}$ . Gerando assim a equação (3.5).

$$I = I_{sc} - I_d - I_{Rp} \quad (3.5)$$

Sabendo que a corrente que circula na resistência em paralelo,  $R_p$ , é dada pela divisão da tensão sobre ela,  $v$ , dividido por  $R_p$ . Substituindo esses dados na equação (3.5), tem-se a equação (3.6).

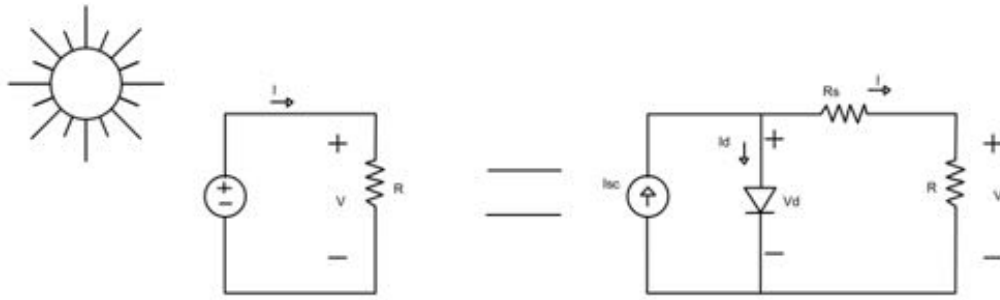
$$I = (I_{sc} - I_d) - \frac{v}{R_p} \quad (3.6)$$

O termo em parêntese na equação (3.6) é a mesma corrente que havia no modelo simples, na equação (3.1). Logo, o que a equação (3.6) diz é que em qualquer tensão, a resistência de fuga paralela,  $R_p$ , faz com que a corrente de carga seja diminuída por  $\frac{v}{R_p}$ . Para uma célula que tem perdas inferiores a 1% devido a sua resistência paralela, a mesma pode ser dimensionada pela equação (3.7) (Masters. 2004).

$$R_p > \frac{100 \cdot V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.7)$$

Considere agora que a célula fotovoltaica ideal mostrada na figura 3.1 tenha sido modificada para incluir apenas uma resistência série,  $R_s$ .

Figura 3.5 - Modelo de célula fotovoltaica com resistência em série.



Fonte: Da Autora.

A resistência em série,  $R_s$ , pode estar associada a ligação entre a célula e as suas ligações de fio, ou a resistência do próprio semicondutor.

Analisando o circuito da figura 3.5, aplicando a lei dos nós, e substituindo a equação do diodo, citada acima, tem-se a equação (3.8), que caracteriza a corrente de saída da célula.

$$I = I_{sc} - I_d = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{q \cdot v_d}{K \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

Com o impacto de  $R_s$ , a tensão no diodo,  $v_d$ , é dada pela tensão sobre a carga,  $V$ , mais a tensão sobre a resistência em série,  $R_s \cdot I$ , onde  $I$  é a corrente de saída da célula, conforme mostra a equação (3.9)

$$V_d = V + R_s \cdot I \quad (3.9)$$

Substituindo a variável  $V_d$ , na equação (3.8), pela tensão do diodo, mostrada na equação (3.9), tem-se a corrente de saída conforme mostra a equação (3.10).

$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{K \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.10)$$

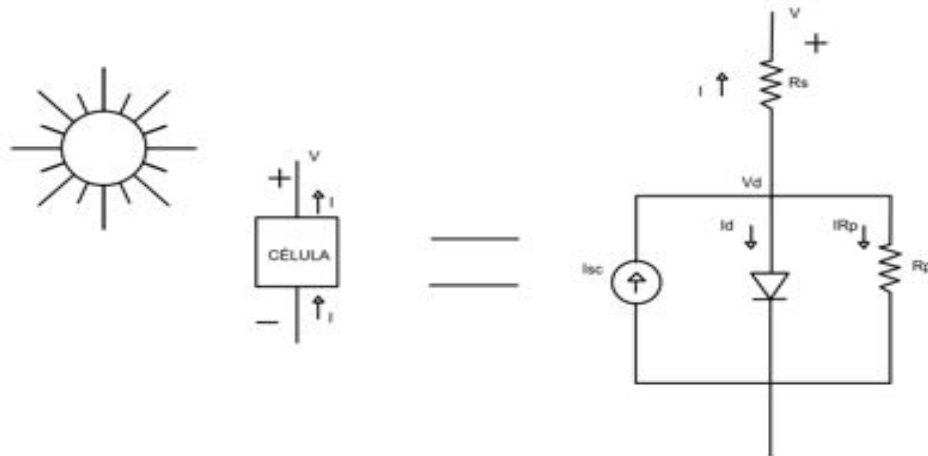
A equação (3.10) pode ser interpretada como a curva I-V fotovoltaica com a tensão deslocada por  $R_s \cdot I$ .

Para uma célula que tem menos que 1% em perdas resultantes da resistência séria,  $R_s$ , pode ser dimensionado pela equação (3.11) (Masters. 2004).

$$R_s < \frac{0,01 \cdot V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.11)$$

Como citado anteriormente, o modelo equivalente que melhor representará a realidade inclui uma resistência de fuga paralela, bem como uma resistência em série. Pode-se agora generalizar este circuito equivalente fotovoltaico, como mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Modelo de Célula fotovoltaica com resistência em série e em paralelo.



Fonte: Da Autora.

A partir da análise da célula fotovoltaica com resistência em série e em paralelo, apresentada na figura 3.6, pode-se descrever a corrente de saída,  $I$ , da célula fotovoltaica como sendo a diferença entre a corrente da fonte de corrente contínua,  $I_{sc}$ , a corrente que circula no diodo em paralelo,  $I_d$ , e a corrente que circula na resistência em paralelo ao diodo,  $I_{Rp}$ , produzindo assim a equação 3.12.

$$I = I_{sc} - I_d - I_{Rp} \quad (3.12)$$

Substituindo na equação (3.12) a equação da corrente do diodo apresentada na equação (3.2), e a corrente no resistor paralelo em função de  $v_d$  Tem-se a equação (3.13)

$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{q \cdot v_d}{K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{v_d}{R_p} \quad (3.13)$$

Substituindo na equação (3.13) a tensão do diodo apresentada na equação (3.9), tem-se a equação (3.14).

$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{K \cdot T}} - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (3.14)$$

Para a equação (3.14) não há solução explícita da tensão ( $V$ ) ou corrente ( $I$ ). A abordagem baseia-se na incrementação de valores de tensão do diodo  $v_d$ . Para cada valor de  $v_d$ , os valores correspondentes da corrente  $I$  e da tensão  $V$  podem ser encontrados.



Com um valor de  $v_d$  assumido, se pode encontrar facilmente a corrente  $I$  pela equação (3.13). Em seguida a tensão de uma célula individual pode ser encontrada pela equação (3.15), mostrada abaixo:

$$V = V_d - R_S \cdot I \quad (3.15)$$

Em todos os modelos mostrados acima, a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico na célula fotovoltaica foi denominada de  $I_{sc}$ , entretanto a corrente de curto circuito é a máxima corrente que a célula pode gerar. A corrente gerada pelo efeito fotovoltaico através da célula fotovoltaica é denominada de corrente fotogerada,  $I_{fg}$ . A corrente fotogerada pode ou não ser a corrente de curto circuito, vai depender do nível de radiação do sol em que se encontra a célula fotovoltaica, como mostra a equação (3.16).

$$I_{fg} = \frac{G}{G_{r\acute{m}ax}} \times I_{sc} \quad (3.16)$$

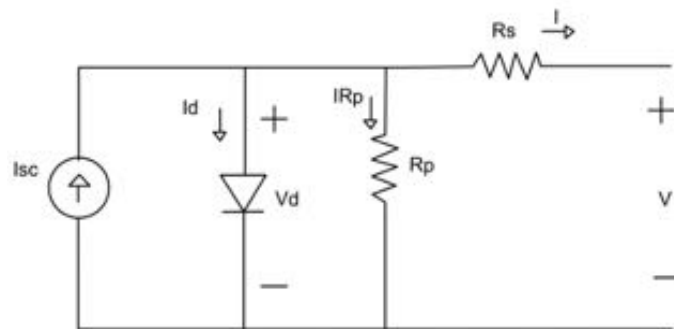
Onde:

$G$  = Irradiância que incide sobre a célula fotovoltaica.

$G_{r\acute{m}ax}$  = Valor da Irradiância padrão, (1000 W/m ).

Nos casos mostrados acima,  $G = G_{r\acute{m}ax}$ . Logo,  $I_{fg} = I_{sc}$ .

Figura 3.7 - Modelo de célula fotovoltaica com resistência em série e em paralelo.



Fonte: Da Autora.

Aplicando a lei dos nós de Kirchoff na Figura 3.7, tem-se que a corrente gerada pela fonte é dada pela equação (3.17):

$$I_{sc} = I_d + I_{Rp} + I \quad (3.17)$$

Isolando a  $I_{sc}$  na equação (3.16), tem-se que o valor da corrente de curto circuito é dado conforme a equação (3.18):

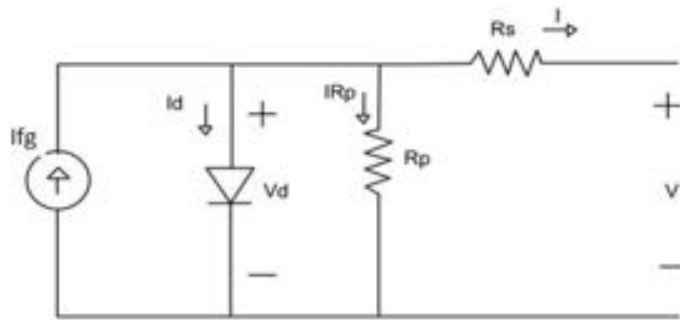
$$I_{sc} = \frac{G_{r\text{máx}}}{G} \times I_{fg} \quad (3.18)$$

Substituindo a equação (3.17) na equação (3.18), e isolando a corrente fotogerada,  $I_{fg}$ , tem-se a equação (3.19):

$$I_{fg} = \frac{G}{G_{r\text{máx}}} \times (I_d + I_{Rp} + I) \quad (3.19)$$

O modelo pode ser redesenhado, conforme explicado acima, nomeando a fonte de corrente constante, de corrente fotogerada, ou  $I_{fg}$ . Conforme mostra a figura 3.8.

Figura 3.8 - Modelo de célula fotovoltaica com fonte de corrente fotogerada.



Fonte: Da Autora.

### 3.3. Parâmetro da Célula Fotovoltaica

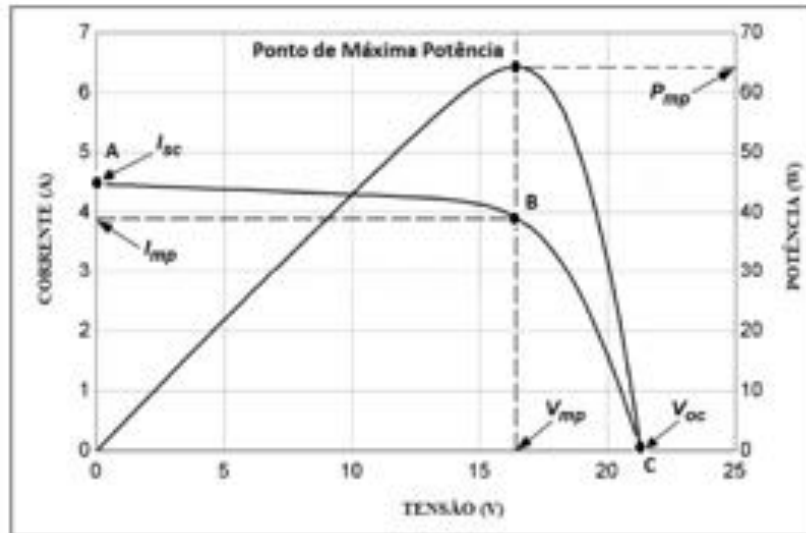
A representação típica da característica de saída de um dispositivo fotovoltaico denomina-se curva corrente tensão, também conhecida como curva I-V. Os principais fatores que afetam a característica I-V do gerador fotovoltaico são a intensidade de radiação e a temperatura. Também se pode traçar a curva potência tensão, ou curva P-V do dispositivo fotovoltaico. Existem pontos de corrente e tensão na curva I-V que são de fundamental importância para o entendimento do comportamento da célula, esses pontos são: A corrente de curto circuito; a tensão de circuito aberto; a tensão de máxima potência; e a corrente de máxima potência, como pode ser visto na Figura 3.9.

A Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) é a máxima corrente que pode ser entregue pela célula. Corresponde ao ponto que a tensão e a potência da célula são nulas.

A Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) é a máxima tensão que pode ser fornecida pela célula. Corresponde ao ponto que a corrente e a potência da célula são zero ( $I=0$ ).

O ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ) é onde se encontra a máxima potência que pode ser fornecida pela célula. O ponto  $P_{mp}$  ocorre no ponto em que  $I \times V$  é máximo, ou seja, no cruzamento do ponto de tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) com o ponto de corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ ).

Figura 3.9 - Curvas típicas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (Duffie, 2006).

A intensidade de radiação e a temperatura são os principais fatores que afetam a característica da curva I-V. Com o aumento da temperatura o desempenho dos módulos é afetado, pois causa a diminuição da tensão e corrente do módulo. Já com a diminuição da intensidade de radiação sob os módulos, tem-se também uma redução de eficiência dos módulos, neste caso a corrente é a principal afetada, definindo a corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico. Este trabalho irá se deter em analisar a intensidade de radiação sobre os módulos.

### 3.4. Modelo de Célula Fotovoltaica para Simulação no Ambiente Computacional SIMULINK®

A equação básica da teoria de semicondutores que descreve matematicamente a característica I-V da célula fotovoltaica ideal é a equação (3.10). Sumanthi et al (2015) reescreve a equação (3.10) em função da corrente fotogerada,  $I_{fg}$ , e do fator de idealidade do diodo,  $\alpha$ . Conforme mostra a equação (3.20).

$$I = I_{fg} - I_o \left( e^{\frac{q \cdot (v_d)}{\alpha \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.20)$$

O potencial térmico é dado por  $vt'$ . Conforme a equação (3.21).

$$vt' = \frac{K \cdot T}{q} \quad (3.21)$$

Para fins de futuras simplificações multiplica-se o potencial térmico pelo fator de idealidade, conforme mostra a equação (3.22).

$$vt = \frac{K \cdot T}{q} \times \alpha \quad (3.22)$$

A equação (3.14) é reescrita em função da corrente fotogerada e do  $vt'$ . Conforme mostra a equação (3.23)

$$I = I_{fg} - I_o \left( e^{\frac{(V + R_s \cdot I)}{vt' \cdot \alpha}} - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (3.23)$$

Sumanthi et al (2015) adiciona um termo dependente da variação de temperatura,  $\Delta T$  e do coeficiente de temperatura da corrente,  $KI$ , na corrente fotogerada, então se reescreve a equação (3.16) em função de  $KI$ , e de  $\Delta T$  conforme mostra a equação (3.24).

$$I_{fg} = (I_{sc} + KI \cdot \Delta T) \times \frac{G}{G_{r\text{máx}}} \quad (3.24)$$

Sumanthi et al (2015) apresenta a equação da corrente de saturação de referência,  $I_o^r$ , e a equação da corrente de saturação reversa do diodo,  $I_o$ , conforme apresentam respectivamente as equações (3.25) e (3.26), onde  $KV$  é o coeficiente de temperatura da tensão.

$$I_o^r = \frac{I_{sc} + KI \cdot \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc} + KV \cdot \Delta T}{\alpha \cdot vt'}\right) - 1} \quad (3.25)$$

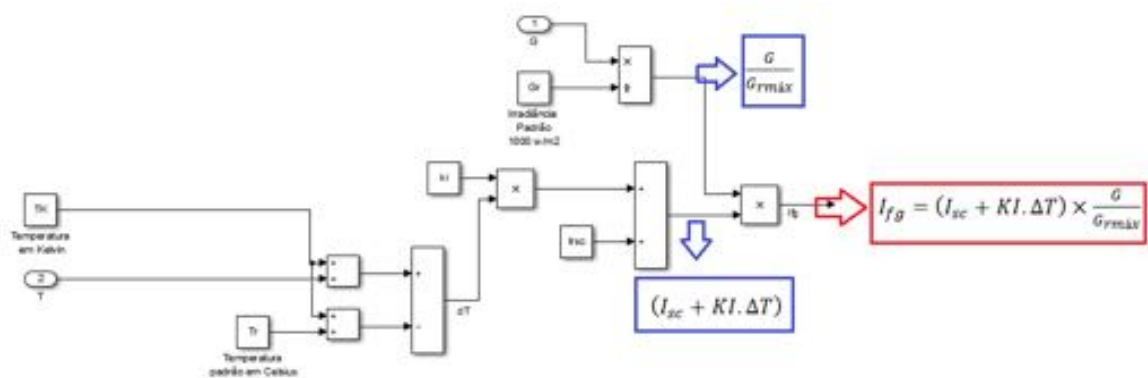
Além dos parâmetros já apresentados, existem ainda:  $T^r$ , que é a referência de temperatura padrão da célula,  $vt^r$  que é o potencial térmico de referência e  $E_g$ , que representa a energia de gap e equivalente a 1,12eV (elétron-Volt).

$$I_o = I_o^r \cdot \left(\frac{T}{T^r}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{E_g}{\alpha}\right)\left(\frac{1}{vt^r} - \frac{1}{vt}\right)\right) \quad (3.26)$$

### 3.4.1. Implementação do Modelo no SIMULINK®

Para implementar o módulo fotovoltaico no ambiente SIMULINK®, foram usadas as equações características do modelo da célula fotovoltaica, mostradas no item anterior. Inicialmente foi implementado a equação (3.24) para obtenção da corrente fotogerada da célula, como pode ser visto na Figura 3.10.

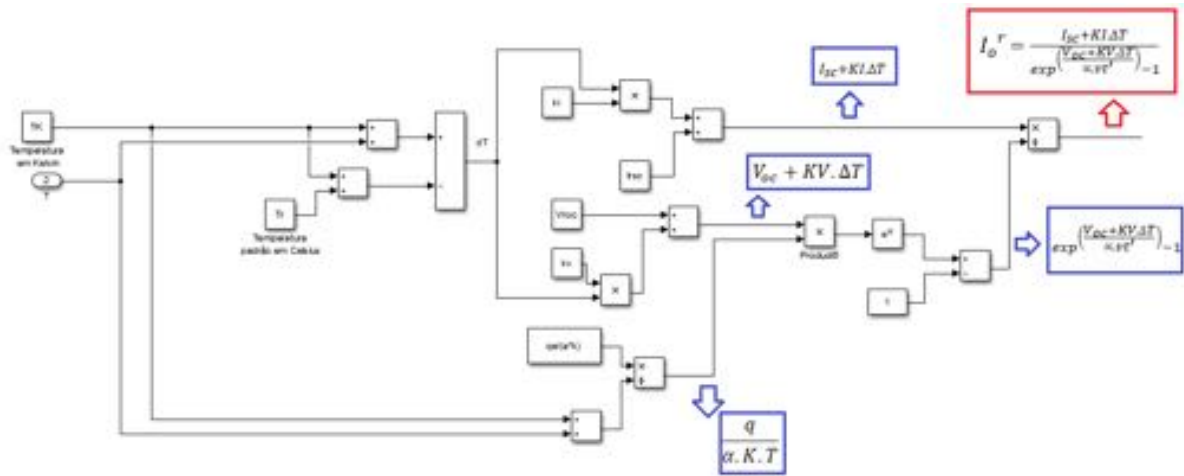
Figura 3.10 - Obtenção da corrente fotogerada ( $I_{fg}$ ) no ambiente SIMULINK®.



Fonte: Da Autora.

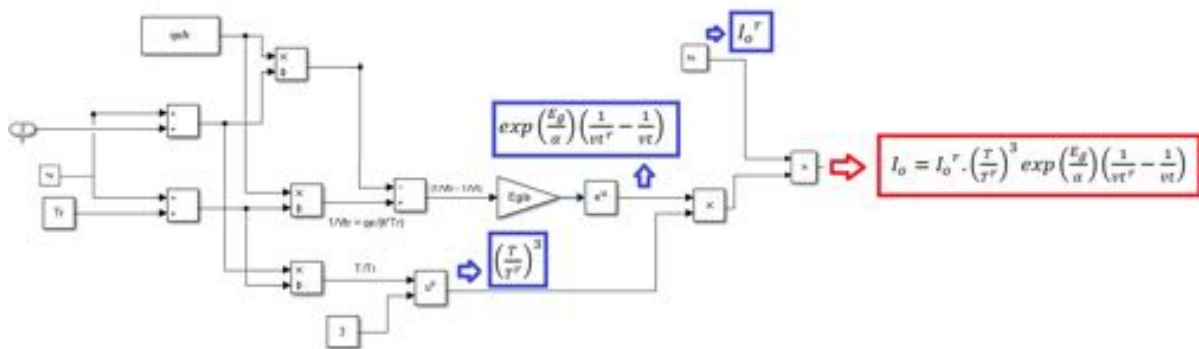
Para obtenção da corrente  $I_o^T$  e  $I_o$ , foram implementadas as equações (3.25) e (3.26) no ambiente SIMULINK®, como pode ser visto nas Figuras 3.11 e 3.12 respectivamente.

Figura 3.11 - Obtenção da corrente ( $I_o^r$ ) no ambiente SIMULINK®.



Fonte: Da Autora.

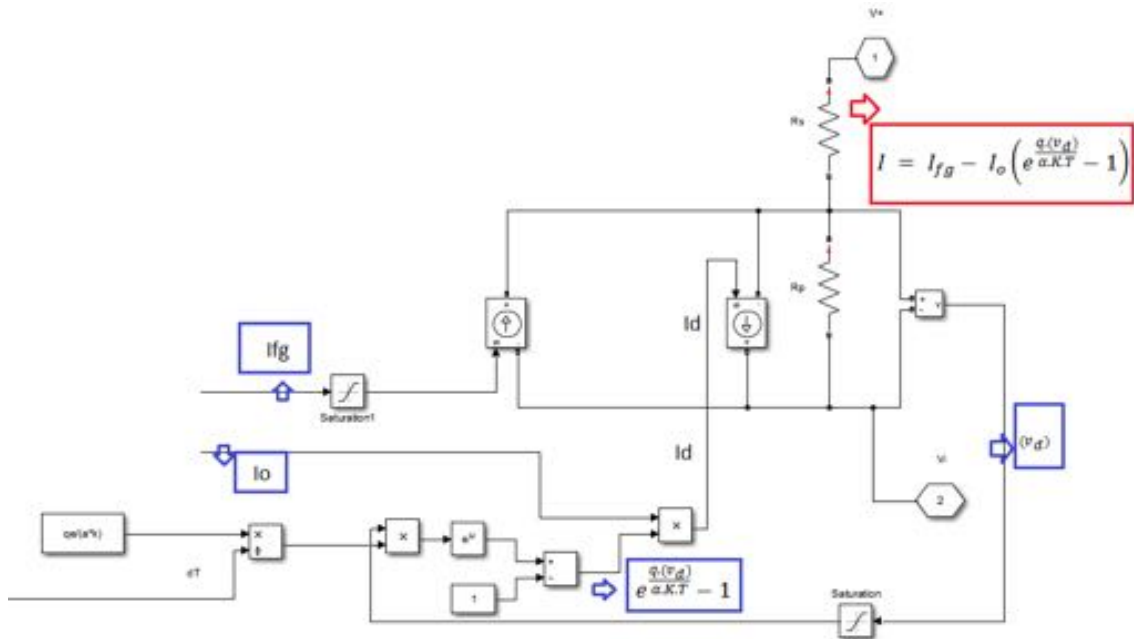
Figura 3.12 - Obtenção da corrente ( $I_o$ ) no ambiente SIMULINK®.



Fonte: Da Autora.

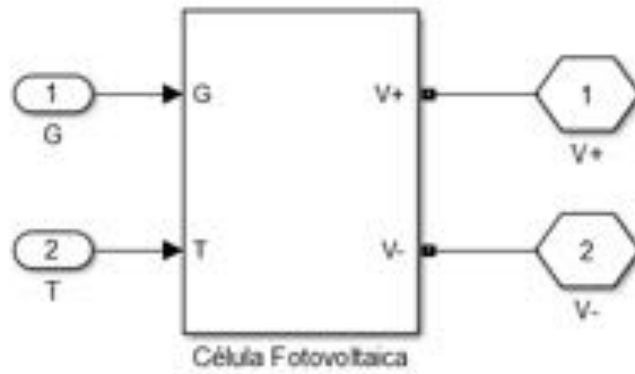
Já tendo obtido  $I_{fg}$  e  $I_o$ , pode-se obter a corrente  $I$ , que alimenta a carga, apresentada na equação (3.23), como pode ser visto na Figura 3.13. A Figura 3.14 apresenta o exterior da célula fotovoltaica no ambiente SIMULINK®, e a Figura 3.15 apresenta o modelo completo da célula fotovoltaica ambiente SIMULINK®.

Figura 3.13 - Obtenção da corrente  $I$  no ambiente SIMULINK®.



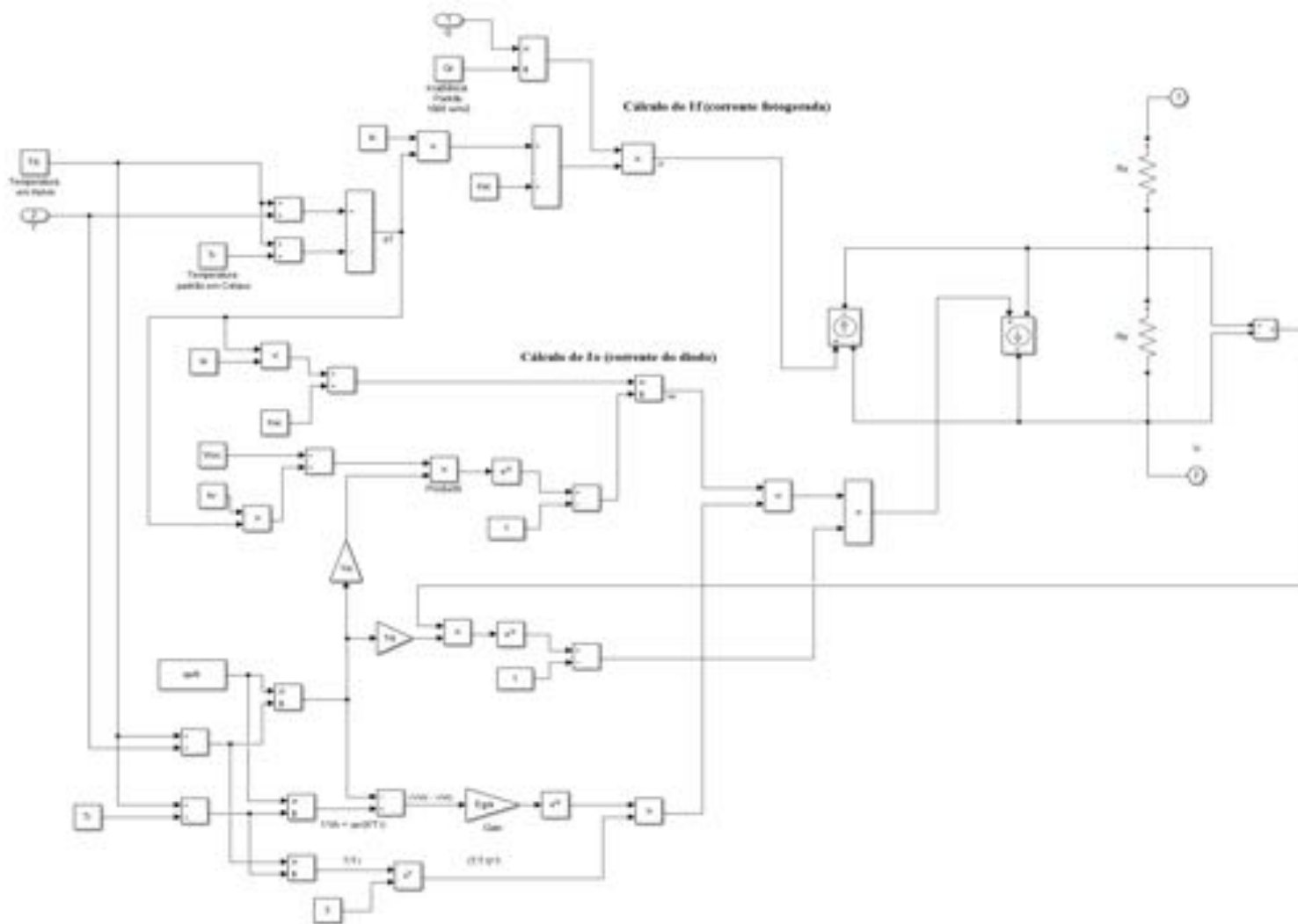
Fonte: Da Autora.

Figura 3.14 - Célula Fotovoltaica no ambiente SIMULINK®.



Fonte: Da Autora.

Figura 3.15 - Modelo completo da célula fotovoltaica ambiente SIMULINK®.



Fonte: Da Autora.



### 3.5. Modelo Fotovoltaico com Sombreamento Parcial

O desempenho de um módulo solar fotovoltaico conectado em série é afetado caso as células não estejam igualmente iluminadas. Todas as células em série de um módulo fotovoltaico são forçadas a transportar a mesma corrente, mesmo que algumas células estejam sombreadas e produzam menos correntes fotovoltaica.

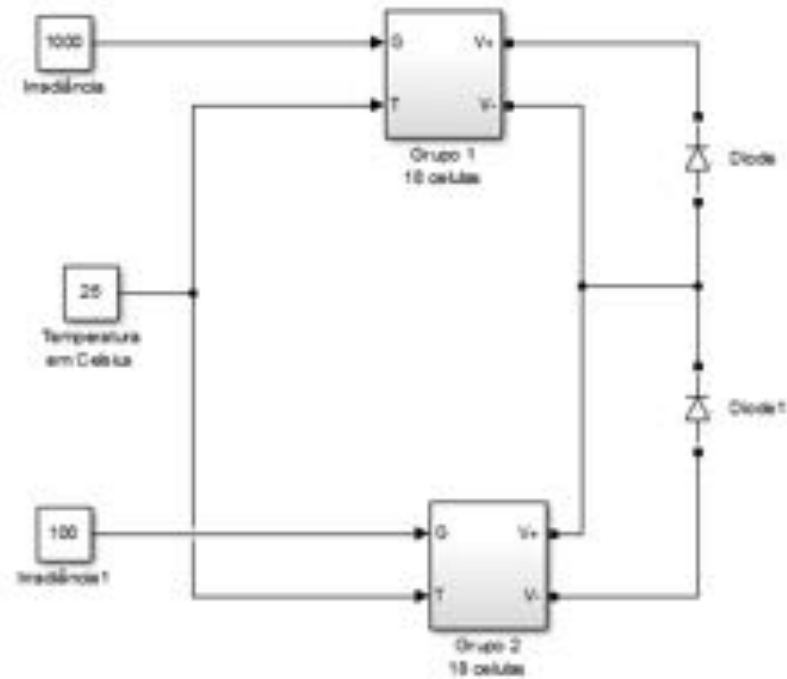
As células fotovoltaicas sombreadas podem ficar polarizadas inversamente, agindo como cargas, drenando potência de células totalmente iluminadas. Caso isso aconteça, e o sistema não esteja adequadamente protegido, o mesmo pode ser danificado irreversivelmente.

Para minimizar os efeitos causados pelo sombreamento, como perda da produção de energia e danos por polarização inversa são utilizados diodos de *bypass*. O diodo de *bypass* é utilizado para que a corrente possa contornar o módulo que está levemente irradiado, a fim de evitar que a única corrente do módulo possa reduzir a corrente de todo o conjunto fotovoltaico, no caso de vários módulos conectados em série.

Por um lado, esta solução é facilmente adaptável e permite melhorar a produção de energia de todo o conjunto fotovoltaico, mas por outro lado, implica em renunciar a energia produzida pelo módulo que é contornado pelo diodo de *bypass*.

Para análise de diferentes situações de sombreamento, será simulado um módulo com 36 células em série, divididas em dois grupos de 18 células, onde a cada 18 células conectadas em série terá um diodo de *bypass*, como se pode ver na Figura 3.16.

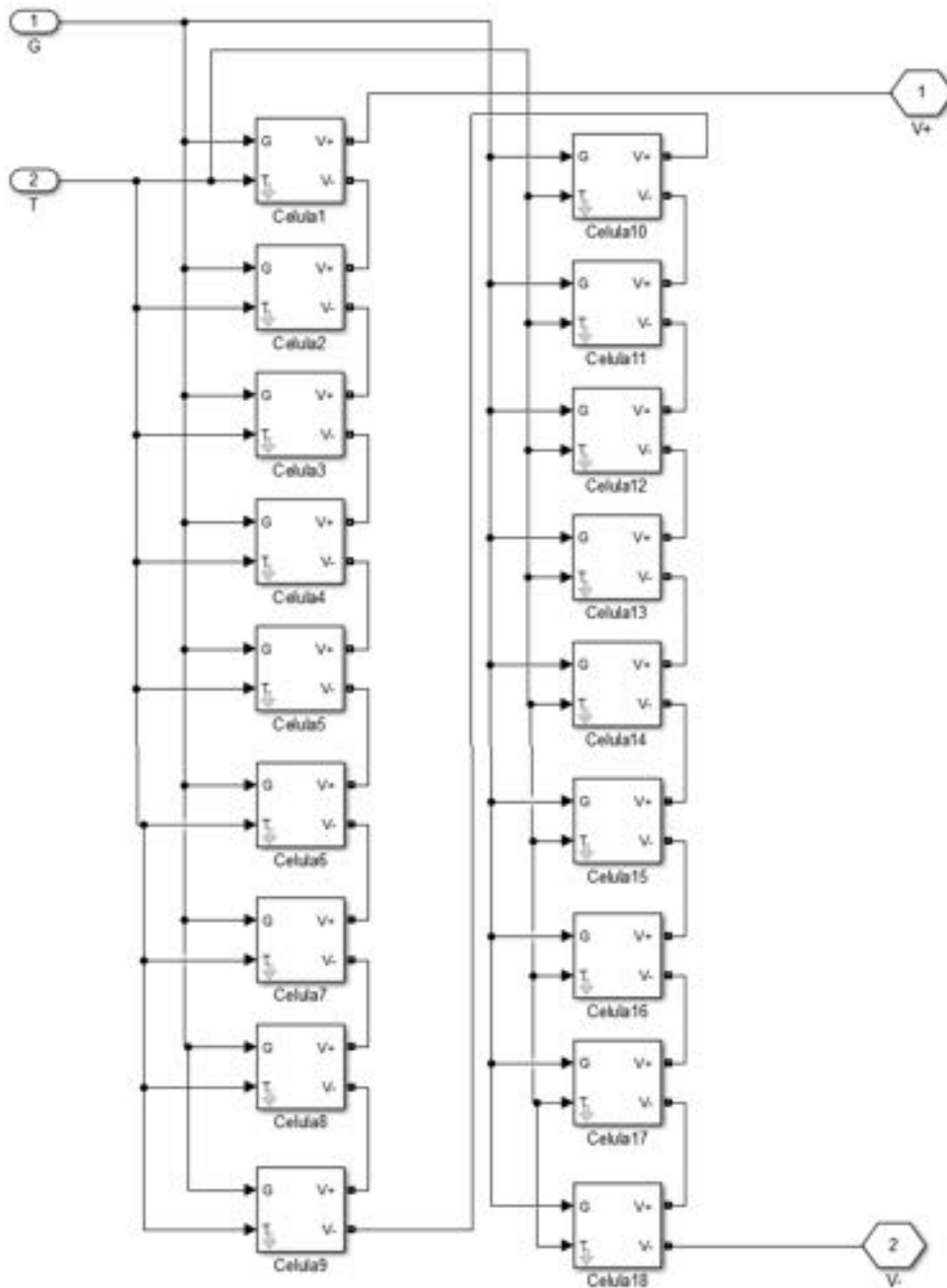
Figura 3.16 - 36 células fotovoltaicas conectadas em série, com diodos *bypass*.



Fonte: Da Autora.

Dentro de cada grupo mostrado na figura 3.16, grupo 1 e grupo 2, tem-se 18 células fotovoltaicas em série, como se pode ver na figura 3.17.

Figura 3.17 - Grupo de 18 células fotovoltaicas conectadas em série.



Fonte: Da Autora.

### 3.5.1. Análise do Sombreamento do Módulo Fotovoltaico

Tendo como base os modelos apresentados anteriormente, serão analisados, neste tópico, diferentes situações de sombreamento parcial e os efeitos que estes podem causar em um módulo fotovoltaico.

Na simulação no ambiente SIMULINK<sup>®</sup> foram utilizadas as características elétricas do módulo Solaris S140 P, em condições de teste padrão, o que significa a irradiação solar  $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ , e distribuição espectral  $AM=1,5$ . As características elétricas do módulo estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características elétricas do módulo Solaris S140 P

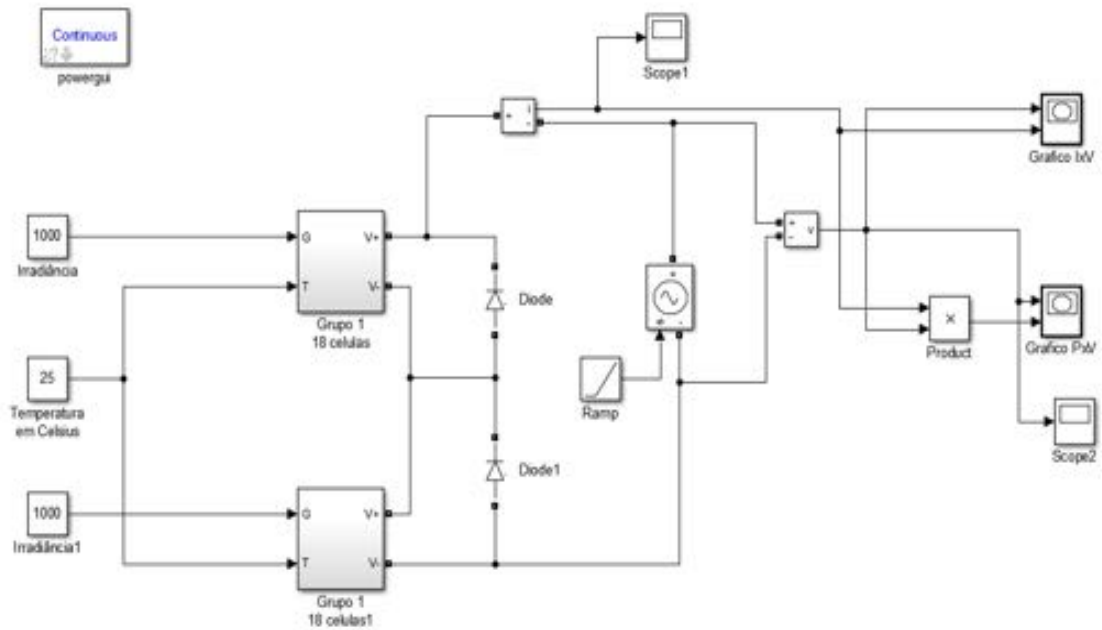
Solaris S140 P	
Potência Pico ( $P_{m\acute{a}x}$ )	140 Wp
Corrente em Máxima Potência ( $I_{mp}$ )	7,65 A
Tensão em Máxima Potência ( $V_{mp}$ )	18,36 V
Corrente em Curto Circuito ( $I_{sc}$ )	8,17 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	21,96 V
Temperatura Nominal Operação Célula (NOCT)	47°C
Resistência paralela ao diodo ( $R_p$ )	3,96Ω
Resistência série ( $R_s$ )	0.0027Ω

Fonte: Da Autora.

- **CASO 1:** *Simulação do módulo com 36 células conectadas em série, com diodo bypass, sem sombreamento.*

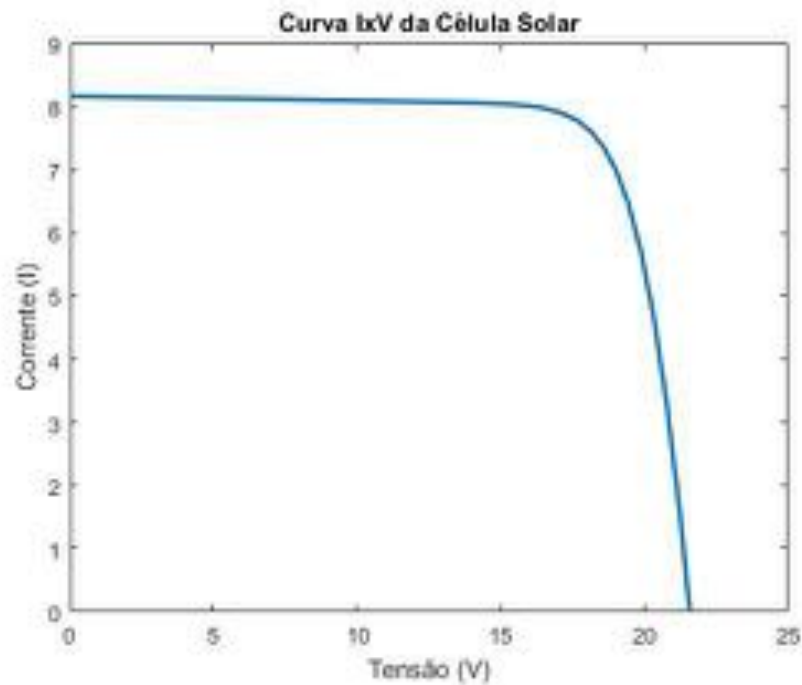
Para simulação do módulo fotovoltaico sem sombreamento foi utilizada nos dois grupos de célula a irradiação solar  $G=1000\text{W/m}^2$  implicando que não existe sombreamento, e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , conforme apresenta a Figura 3.18.

Figura 3.18 - Módulo Fotovoltaico sem sombreamento.



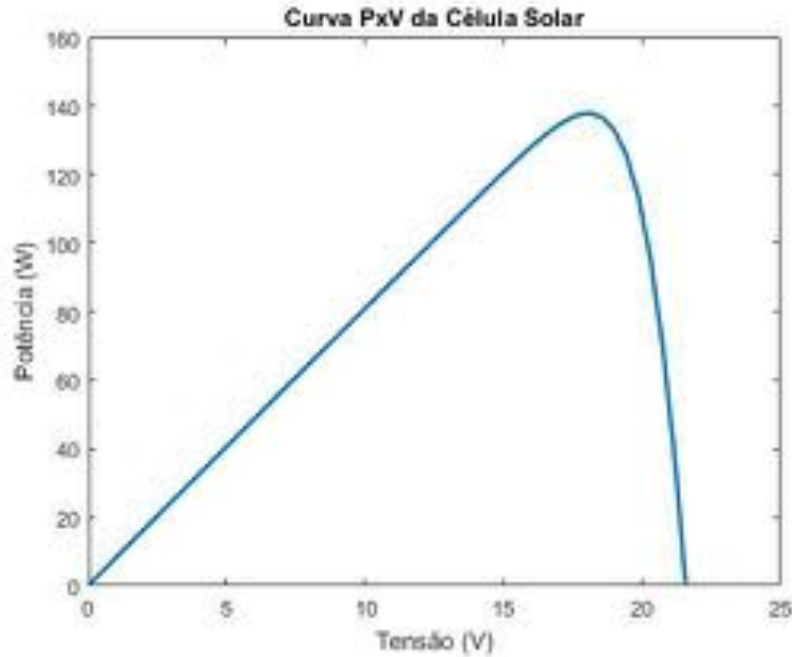
Fonte: Da Autora.

Figura 3.19 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Figura 3.20 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.



Fonte: Da Autora.

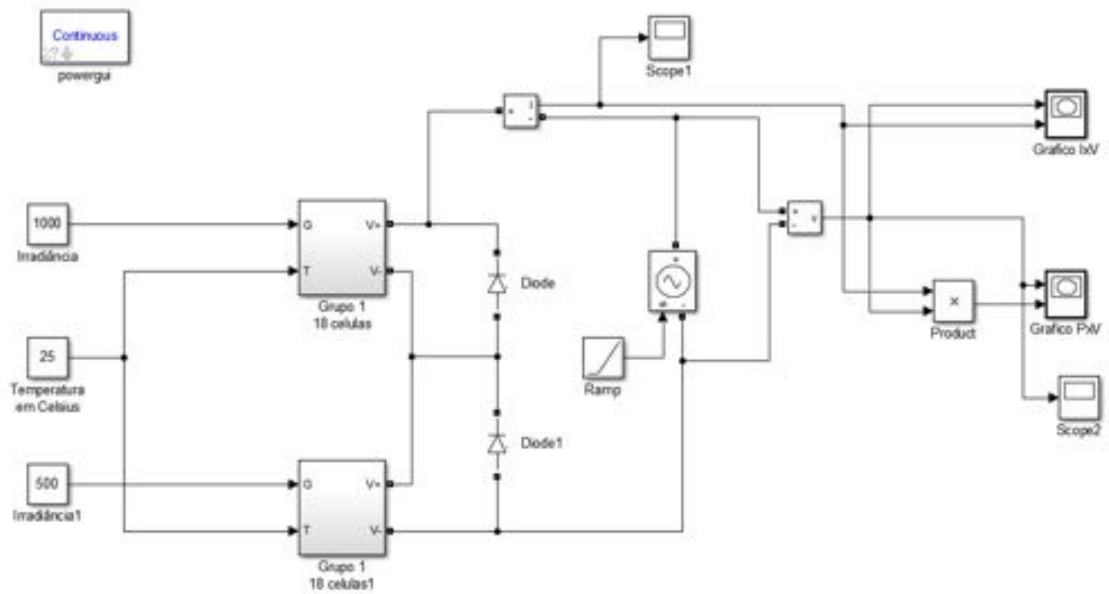
De acordo com as simulações realizadas, pode-se ver na Figura 3.19 que a corrente de curto-circuito é muito próxima de 8,17 A e a tensão de circuito aberto está muito próxima de 21,96 V.

Já sobre a característica P-V resultante mostrada na Figura 3.20, a potência máxima também está bem próxima da esperada que é 140 W.

- **CASO 2:** *Simulação do módulo com 36 células conectadas em série, com diodo bypass, submetida a sombreamento parcial.*

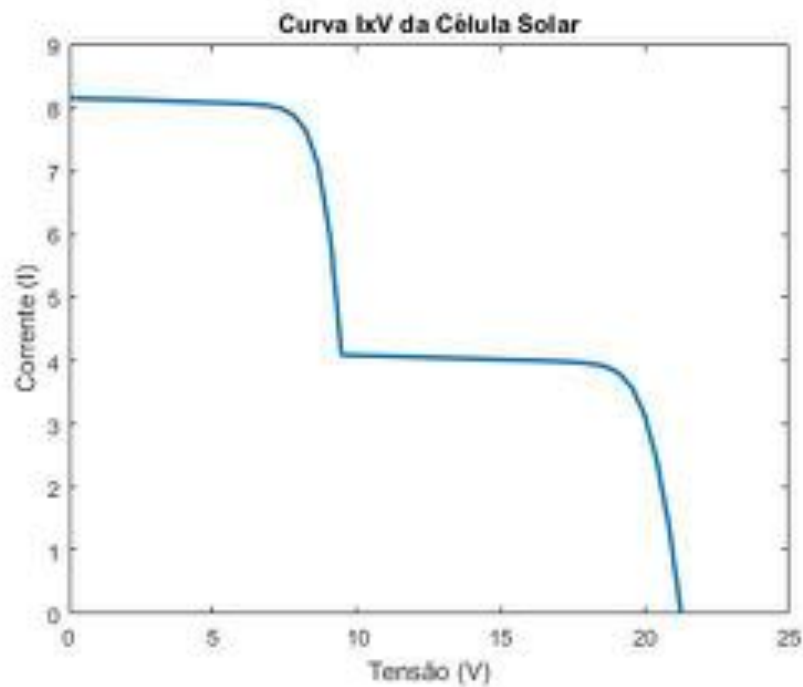
Para simulação do módulo fotovoltaico com sombreamento, foram utilizadas no grupo 1 de 18 células  $G=1000\text{W/m}^2$  implicando que não existe sombreamento neste grupo, e no grupo 2 de 18 células  $G=500\text{W/m}^2$  implicando que o grupo 2 está parcialmente sombreado, e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , conforme apresenta a Figura 3.21.

Figura 3.21 - Módulo Fotovoltaico com sombreamento.



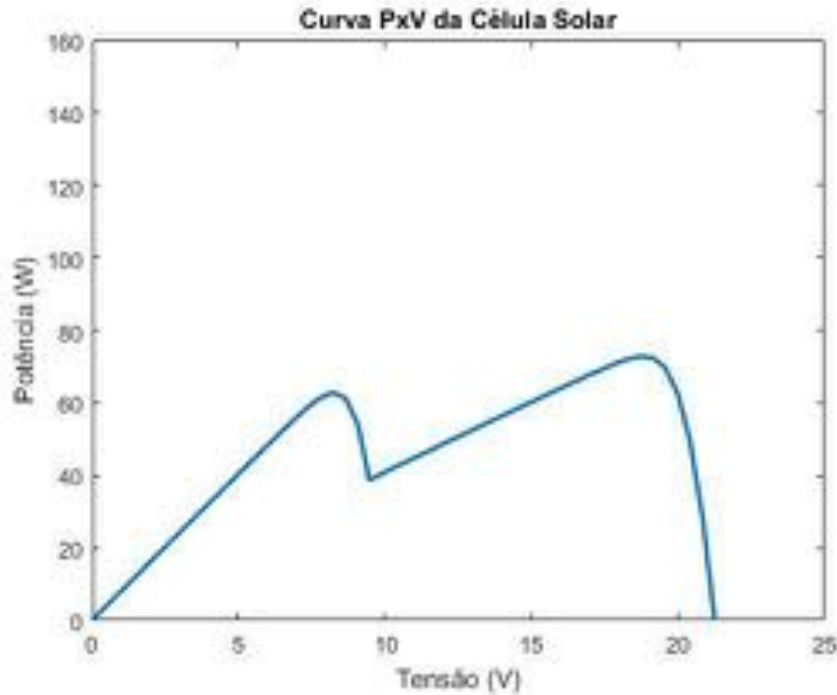
Fonte: Da Autora.

Figura 3.22 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Figura 3.23 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Neste caso em que os dois grupos não estão igualmente iluminados, pode-se observar a presença de degrau na característica I-V mostrada na Figura 3.22, e a presença de picos múltiplos na característica P-V mostrada na Figura 3.23, ambas introduzidas pela presença do diodo *bypass*.

Na figura 3.22, observa-se que devido a presença dos diodos *bypass* é possível que as células não sombreadas conduzam a sua corrente máxima por um tempo, até que se igualam a corrente da célula sombreada.

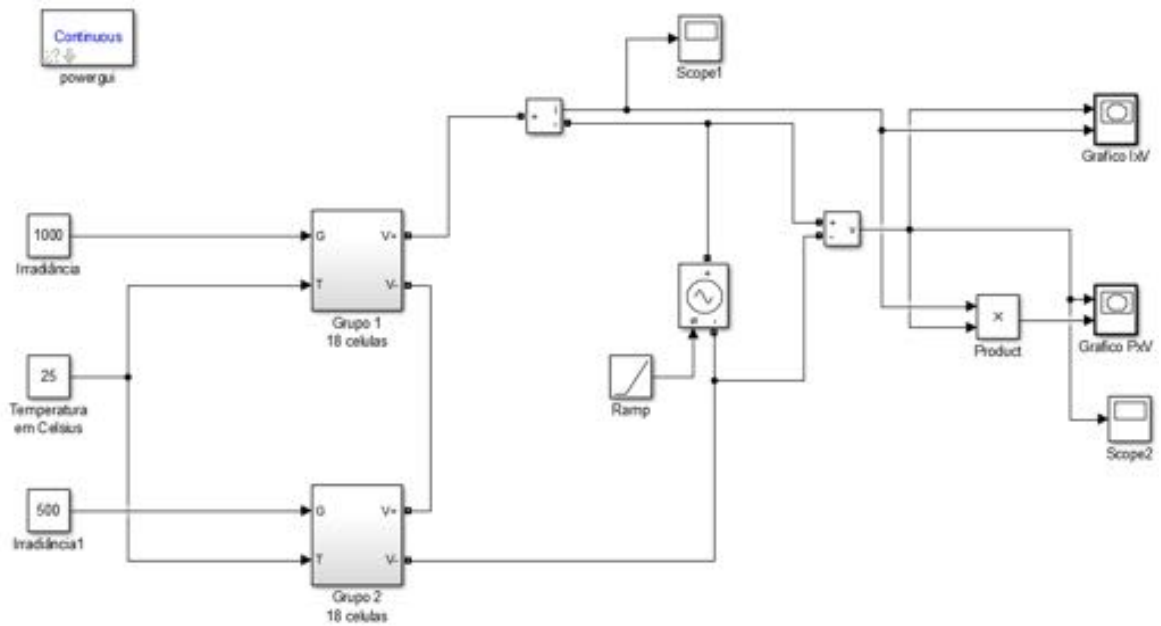
Na figura 3.23, devido ao sombreamento, pode-se perceber que a potência fornecida por cada grupo difere da potência máxima, e é menor que 140 W.

- **CASO 3:** Simulação do módulo com 36 células conectadas em série, sem diodo *bypass*, submetida a sombreamento parcial.

Neste caso os dois grupos não estão igualmente iluminados e estão sem diodos *bypass*, como apresentado na Figura 3.24.

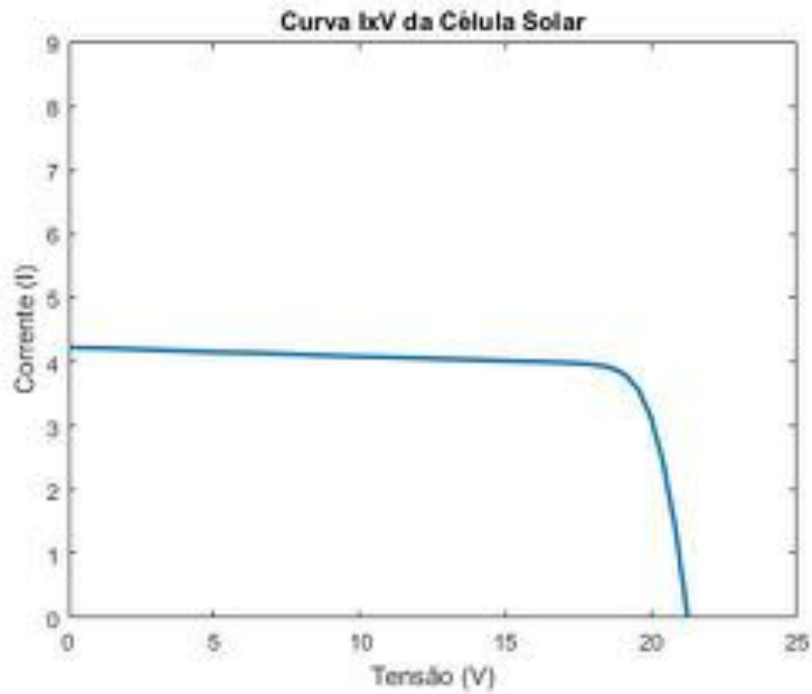


Figura 3.24 - Módulo Fotovoltaico com sombreamento.



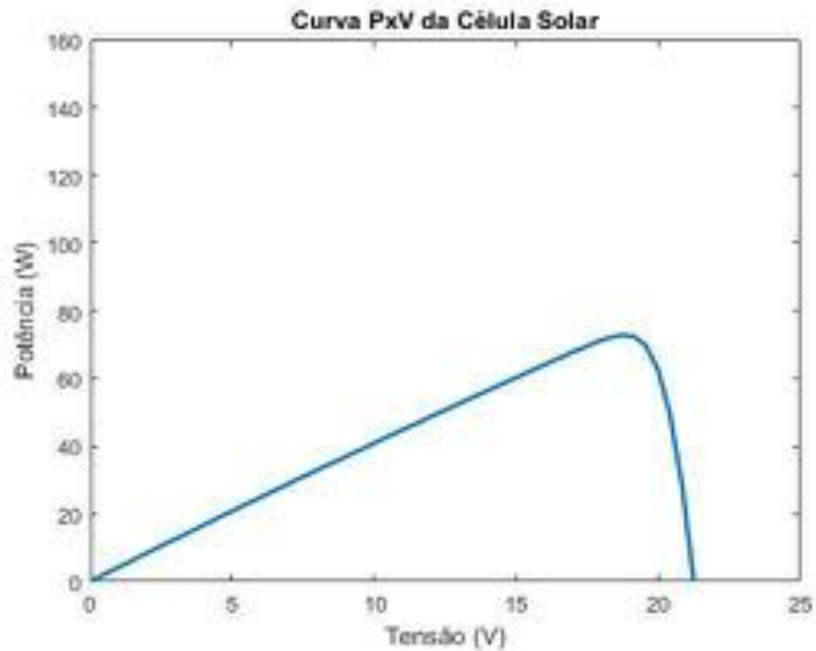
Fonte: Da Autora.

Figura 3.25 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento, sem diodo *bypass*.



Fonte: Da Autora.

Figura 3.26 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento, sem diodo *bypass*.



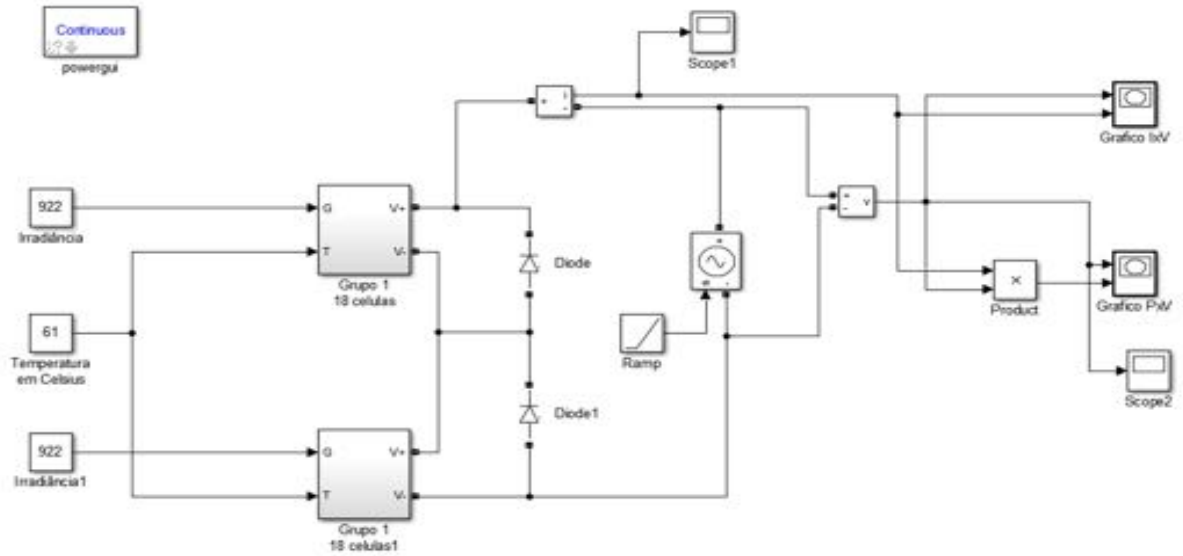
Fonte: Da Autora.

Pode-se observar que não há presença de degrau na característica I-V mostrada na Figura 3.25, e nem existe presença de picos múltiplos na característica P-V mostrada na Figura 3.26, pois a corrente do módulo sombreado reduz a corrente de todo o conjunto fotovoltaico. De modo mais sucinto, se os diodos de *bypass* não estiverem presentes, o grupo sombreado limitará a corrente de saída do grupo não sombreado.

- **CASO 4:** Simulação do módulo com 36 células conectadas em série, com diodo *bypass*, sem sombreamento com temperatura de 61°C.

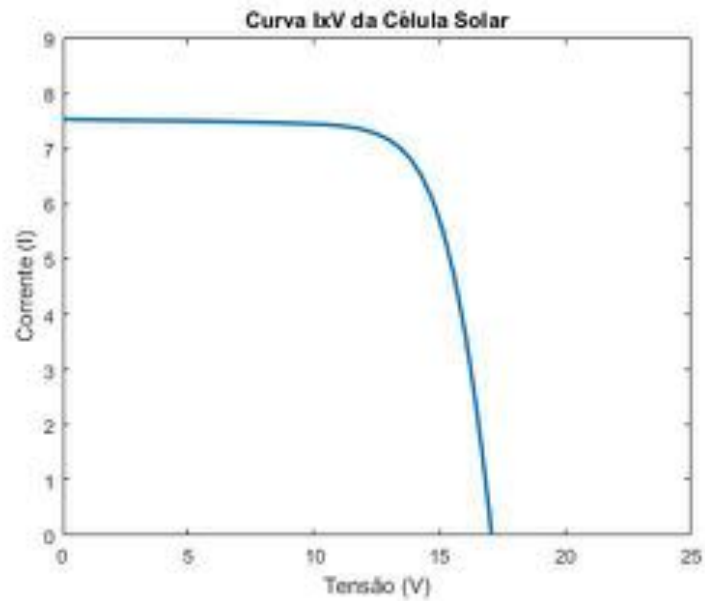
Para simulação do módulo fotovoltaico sem sombreamento, foi utilizada no grupo 1 de 18 células  $G=922\text{W/m}^2$  implicando que não existe sombreamento neste grupo, e no grupo 2 de 18 células foi utilizado  $G=922\text{W/m}^2$  implicando que no grupo 2 também não há sombreamento. A temperatura de simulação foi de 61°C, apenas para observar o efeito da elevação da temperatura. Conforme apresenta a Figura 3.27.

Figura 3.27 - Módulo Fotovoltaico sem sombreamento.



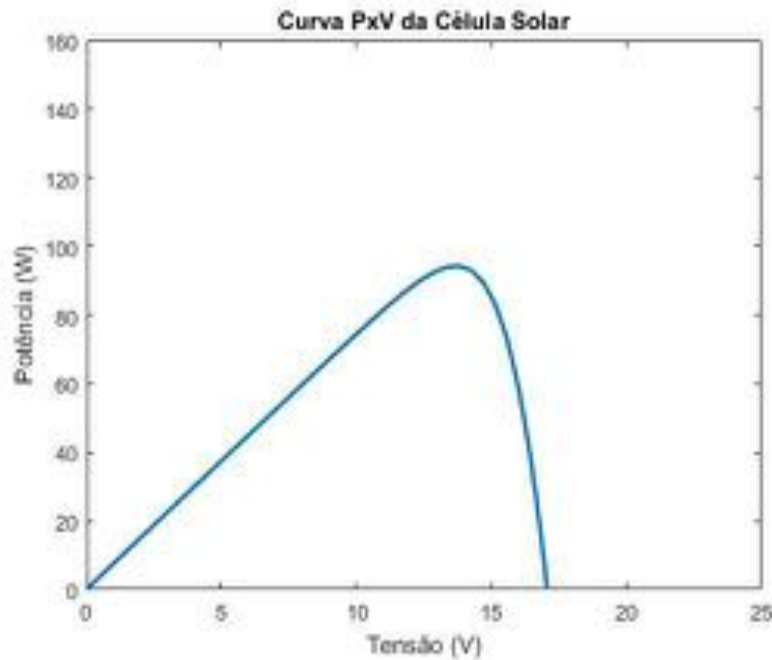
Fonte: Da Autora.

Figura 3.28 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Figura 3.29 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.



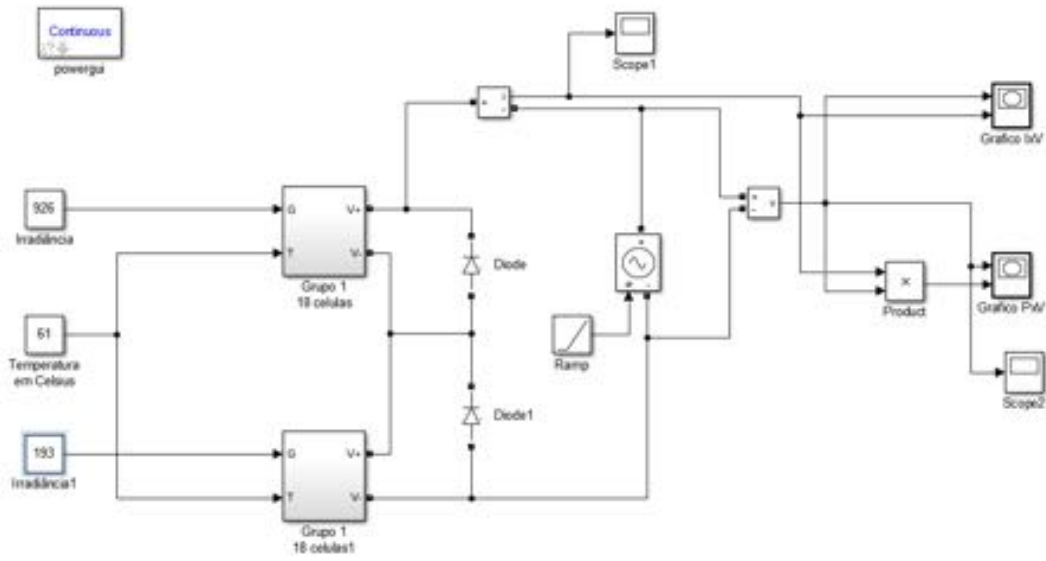
Fonte: Da Autora.

Neste caso, se pode observar a influência da temperatura na tensão de circuito aberto. Ao aumentar a temperatura houve uma queda de tensão, a tensão de circuito aberto ficou em torno de 17 volts neste caso, como mostra a Figura 3.28. Módulos fotovoltaicos perdem até 7% de sua potência de saída, quando operando em temperaturas próximas a 40°C. (MICHELS et al apud GXASHEKA et al., 2005). Na Figura 3.29, observa-se o efeito global do aumento de temperatura, que é a perda de potência devido a uma maior queda de tensão.

- **CASO 5:** *Simulação do módulo com 36 células conectadas em série, com diodo bypass, submetido a sombreamento parcial com temperatura de 61°C.*

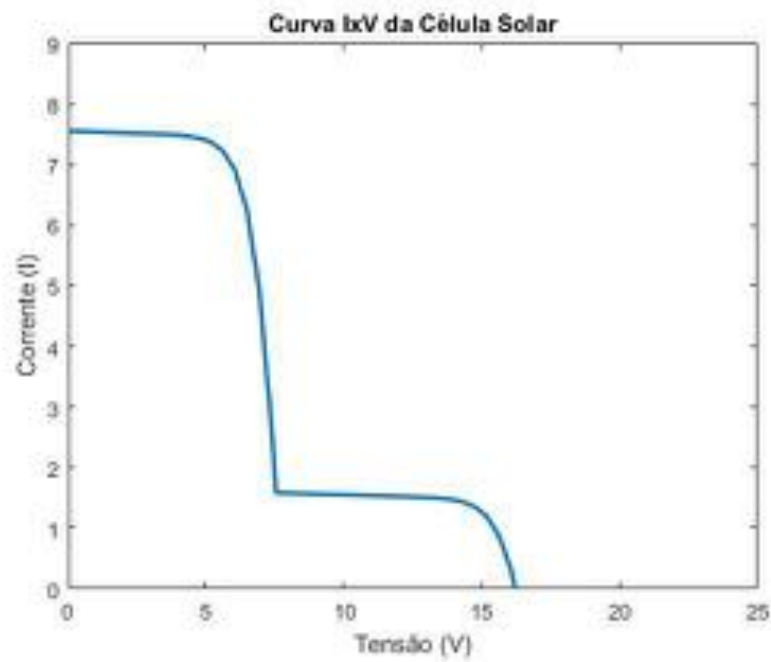
Tem-se novamente o caso em que os dois grupos não estão igualmente iluminados, como apresenta a Figura 3.30, afetando a tensão de circuito aberto, que reduz para cerca de 17V aproximadamente.

Figura 3.30 - Módulo Fotovoltaico com sombreamento parcial.



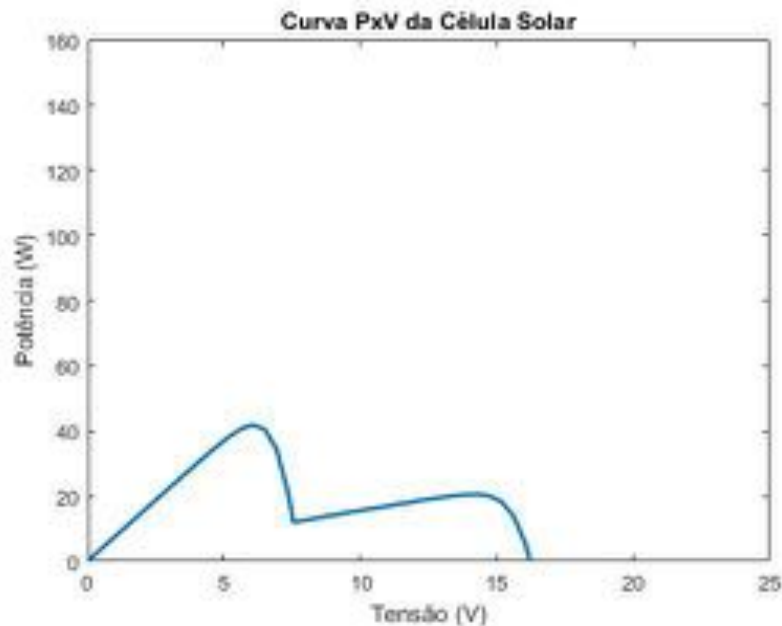
Fonte: Da Autora.

Figura 3.31 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Figura 3.32 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Na Figura 3.31, pode-se observar que devido a presença dos diodos bypass é possível que as células não sombreadas conduzam a sua corrente máxima por um tempo, até que se igualam a corrente da célula sombreada, surgindo então degrau na característica I-V.

Na Figura 3.32, devido ao sombreamento, observa-se que a potência fornecida por cada grupo difere da potência máxima, e é menor que 140 W, ocorrendo múltiplos picos na característica P-V.

Baseado nos resultados obtidos pode-se concluir que, caso as células não estejam submetidas ao sombreamento, com ou sem diodos de *bypass*, tem-se o valor nominal de potência e corrente do total de 36 células. Observa-se, entretanto, que existem dois grupos de células divididos igualmente, logo, nos casos em que houve sombreamento parcial em um grupo de 18 células, e que o diodo de *bypass* estava presente, a corrente apresentada na característica I-V, inicia no valor total correspondente as 36 células e logo diminui pela metade, criando um novo patamar. No caso particular em que o diodo de *bypass* não está presente, a corrente já inicia em um patamar menor, cujo valor corresponde à metade do valor total da corrente correspondente as 36 células. Nos casos em que as células foram submetidas ao sombreamento, constatou-se que a potência de saída é inferior à potência máxima. Conclui-se também acerca da influência da temperatura nos módulos fotovoltaicos, ao elevar a temperatura, tem-se uma queda na tensão total dos módulos e conseqüentemente na potência de saída.

O estudo a ser abordado no próximo capítulo envolverá a conexão de painéis fotovoltaicos com sombreamento à rede elétrica a partir de diferentes configurações de ligação.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica entregam instantaneamente toda a energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos durante o dia. A energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos é produzida em corrente contínua, CC, entretanto a energia transmitida pela concessionária é em corrente alternada, CA. Logo, é necessário converter a corrente contínua produzida pelo sistema fotovoltaico em corrente alternada através do inversor, CC/CA.

Pode-se utilizar o conversor Boost, CC/CC, para elevar o nível de tensão, de saída dos módulos fotovoltaicos e logo em seguida o inversor CC/CA para realizar a conexão com a rede elétrica.

O inversor deve ser capaz de rastrear o ponto de máxima potência do sistema fotovoltaico, característica apresentada na curva P-V, pois desse modo a máxima quantidade de energia elétrica será produzida pelo painel solar. O conversor é capaz de realizar este rastreamento através do recurso denominado MPPT, *maximum power point tracking*. Outra função obrigatória para os inversores que são utilizados para conectar os painéis a rede elétrica é o sistema anti-ilhamento. Ilhamentos ocorrem quando os sistemas fotovoltaicos permanecem conectados à rede elétrica, quando a mesma foi desligada. Este recurso é de extrema importância principalmente para a segurança de usuários do sistema elétrico.

Este capítulo apresenta a implementação do modelo dos painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica monofásica, modelo equivalente ao apresentado nos capítulos anteriores e a sua conexão com a rede. Para a conexão dos painéis a rede elétrica fez-se uso de um conversor CC/CC tipo Boost para a adequação de tensão e corrente entre o conjunto de painéis e o inversor monofásico. Serão analisados diferentes casos de sombreamento parcial sobre os painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica, e conseqüentemente, o comportamento da rede elétrica submetida a estes diferentes cenários. O conjunto de módulos fotovoltaicos conectados à rede elétrica alimenta uma pequena carga monofásica conectada aos terminais do inversor monofásico.



## 4.1. Considerações Preliminares

O inversor utilizado para conexão dos sistemas fotovoltaicos com a rede elétrica necessita de um sistema de controle eficaz, que atue no rastreamento do ponto de máxima potência da curva P-V do painel fotovoltaico, que tenha um sistema anti-ilhamento eficaz, que seja capaz de sincronizar a corrente de saída do inversor com a tensão da rede elétrica, etc.

Portanto, ao simular o modelo de painel fotovoltaico construído célula por célula, apresentado nos capítulos anteriores, conectado à rede elétrica, a simulação exigiu demasiado recurso computacional, pois como explicado, a ligação de painéis a rede elétrica necessita da presença de controladores que torna o tempo computacional de execução muito elevado.

Desse modo, fez-se necessário a utilização do modelo de painel fotovoltaico mais simplificado, entretanto equivalente ao painel fotovoltaico construído célula por célula, devido ao estudo envolvendo a conexão com a rede elétrica.

### 4.1.1. Modelo Simplificado do Painel Fotovoltaico

O modelo simplificado do painel fotovoltaico é equivalente ao modelo construído célula por célula apresentado no capítulo três, entretanto, diferentemente do modelo construído célula por célula, as equações relativas ao modelo simplificado do painel incluem o número de células,  $N_{cel}$ , número de células em série,  $N_s$ , e em paralelo,  $N_p$ , que o mesmo contém, para se fazer equivalente. As equações (4.1) a (4.3) foram utilizadas para construir o modelo simplificado utilizado.

A equação para o cálculo da corrente do diodo para o modelo célula por célula foi apresentada na equação 3.2, entretanto, para o modelo simplificado, é necessário levar em consideração a quantidade de células em série e em paralelo do painel, conforme apresenta a equação 4.1.

$$I_d = N_p \cdot I_o \left( e^{\frac{q \cdot V_d}{N_s \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

A equação para o cálculo da corrente fotogerada para uma célula fotovoltaica foi apresentada na equação 3.24, entretanto para o modelo simplificado, é necessário levar em consideração a quantidade de células em paralelo, conforme apresenta a equação 4.2.

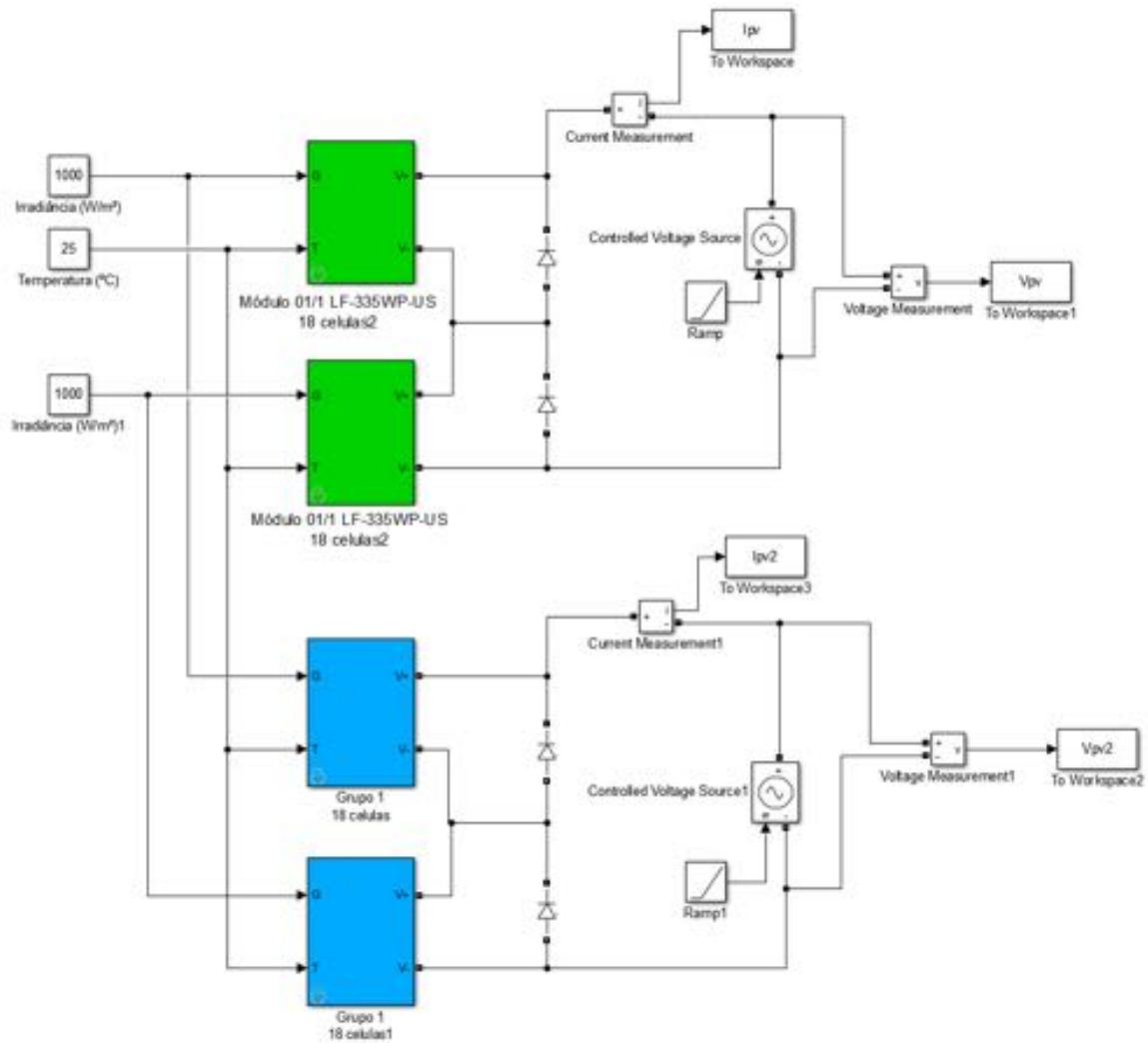
$$I_{fg} = N_p \cdot (I_{sc}) \times \frac{G}{G_{r\text{máx}}} \quad (4.2)$$

A equação para o cálculo da corrente de saturação reversa do diodo,  $I_o$ , para o modelo de uma célula foi apresentado na equação 3.26, entretanto para o modelo simplificado é necessário levar em consideração o número total de células do painel, conforme apresenta a equação 4.3.

$$I_o = I_o^r \cdot \left(\frac{T}{T^r}\right)^3 \exp\left(N_{cel} \left(\frac{E_g}{\alpha}\right) \left(\frac{1}{vt^r} - \frac{1}{vt}\right)\right) \quad (4.3)$$

A Figura 4.1 apresenta a montagem dos blocos no SIMULINK<sup>®</sup>, para propósitos de comparação das curvas características I-V e P-V dos painéis baseados no modelo simplificado e dos painéis construídos célula por célula. Cada painel possui 36 células, divididos em dois grupos de 18 células, os blocos em verde representam o modelo equivalente simplificado e os blocos em azuis representam o modelo célula por célula.

Figura 4.1 - Modelo Equivalente Simplificado e Modelo Célula por Célula.



Fonte: Da Autora.

Nesta simulação foram utilizadas as características elétricas do módulo LF-335-WP-US, em condições de teste padrão, o que significa a irradiação solar  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ . Os parâmetros do Módulo LF-335WP-US são apresentados na Tabela 4.1.

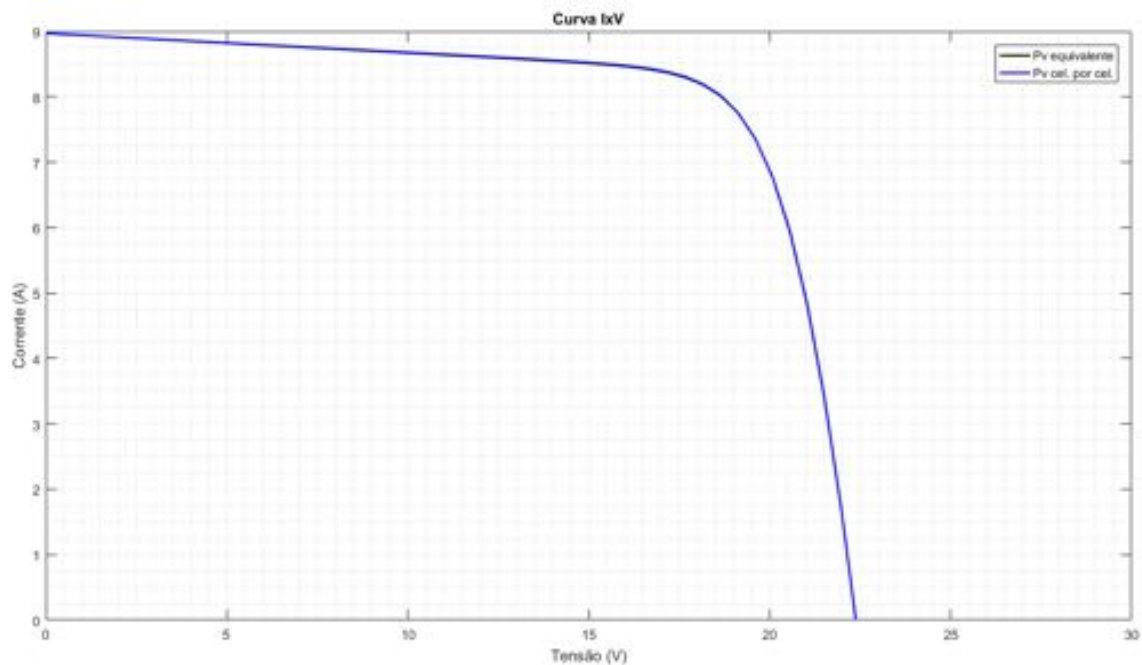
Tabela 4.1 – Dados do Módulo Fotovoltaico LF-335WP-US.

Módulo LF-335WP-US	
Corrente em Máxima Potência ( $I_{mp}$ )	8.07 A
Tensão em Máxima Potência ( $V_{mp}$ )	9.3375 V
Corrente em Curto Circuito ( $I_{sc}$ )	9.0 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	11.2275 V
Resistência paralela ao diodo ( $R_p$ )	16.6725 $\Omega$
Resistência série ( $R_s$ )	0.0561 $\Omega$

Fonte: banco de dados do MATLAB/ SIMULINK<sup>®</sup> (versão R2016a)

Ao simular os dois modelos apresentados na Figura 4.1, é obtida a característica I-V dos modelos equivalente e célula por célula, como apresentado na Figura 4.2. Pode-se então concluir que o modelo equivalente simplificado apresenta comportamento semelhante ao modelo célula por célula.

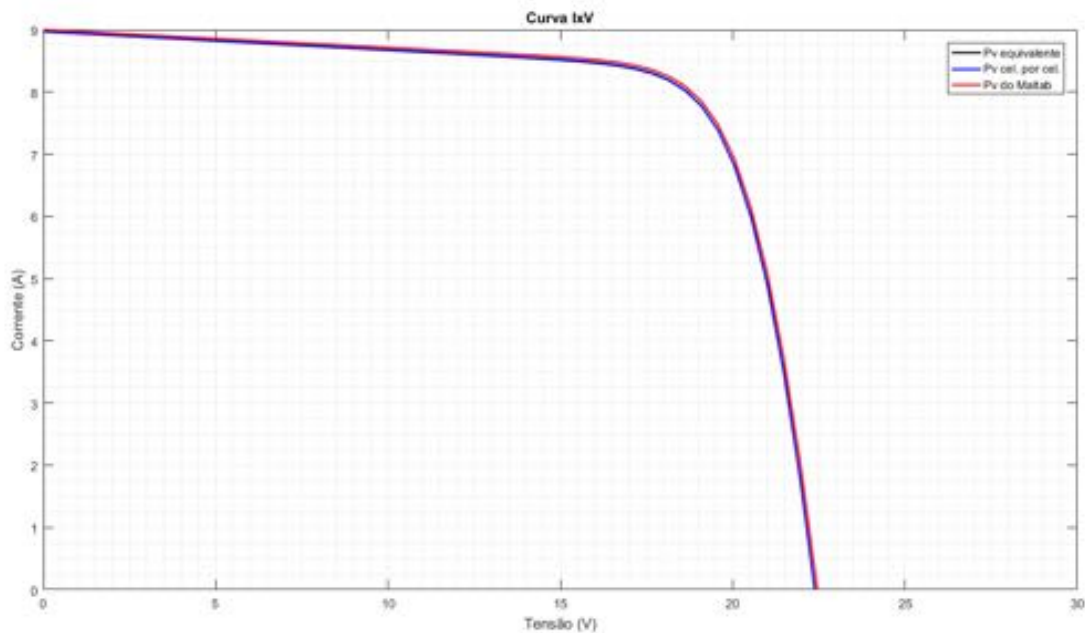
Figura 4.2 - Característica I-V dos modelos Equivalente e Célula por Célula.



Fonte: Da Autora.

Para validar os modelos célula por célula e equivalente simplificado, ambos foram comparados ao modelo do painel fotovoltaico presente no próprio MATLAB<sup>®</sup>, como apresenta a Figura 4.3. Pode-se concluir que os modelos célula por célula e simplificado desenvolvidos pela autora deste trabalho segue o modelo comercial desenvolvido pelo MATLAB<sup>®</sup>.

Figura 4.3 - Característica I-V dos modelos Equivalente, Célula por Célula e do MATLAB<sup>®</sup>.



Fonte: Da Autora.

## 4.2. Configurações de ligação dos Painéis Fotovoltaicos à Rede Elétrica

Com a finalidade de estudar a dinâmica da conexão dos módulos fotovoltaicos com a rede elétrica, foi montado no ambiente SIMULINK<sup>®</sup> um sistema para alimentar uma pequena carga de 1600 W, que seria equivalente, por exemplo, a um ar-condicionado. A fim de alimentar essa carga, foram utilizados oito painéis fotovoltaicos, cada painel composto por 40 células fotovoltaicas. Portanto, os oito painéis totalizam aproximadamente uma tensão de saída de 200 V.

Os painéis fotovoltaicos serão ligados à rede elétrica de duas maneiras. No primeiro modo todos os oito painéis serão ligados em série, a um único conversor Boost CC-CC elevador de tensão. No segundo modo serão utilizados dois conversores Boost, ou seja, quatro painéis serão ligados em série a um conversor Boost CC-CC elevador de tensão, e a outra

metade, os outros quatro painéis serão ligados em série a outro conversor CC-CC elevador de tensão.

A seguir serão definidos os casos de estudos aos quais os painéis fotovoltaicos foram submetidos.

**CASO 1.a:** Têm-se oito painéis fotovoltaicos conectados em série, em condições de não sombreamento, não conectados a rede elétrica.

**CASO 1.b:** Têm-se oito painéis fotovoltaicos conectados em série, em condições de sombreamento parcial, não conectados a rede elétrica.

**CASO 1.c:** Têm-se oito painéis fotovoltaicos ligados em série, conectados a um único conversor Boost CC-CC elevador de tensão e conectados a rede elétrica.

**CASO 2.a:** Têm-se oito painéis fotovoltaicos, divididos do seguinte modo, quatro painéis fotovoltaicos conectados em série, em condições de não sombreamento mais quatro painéis fotovoltaicos conectados em série, em condições de não sombreamento, não conectados a rede elétrica.

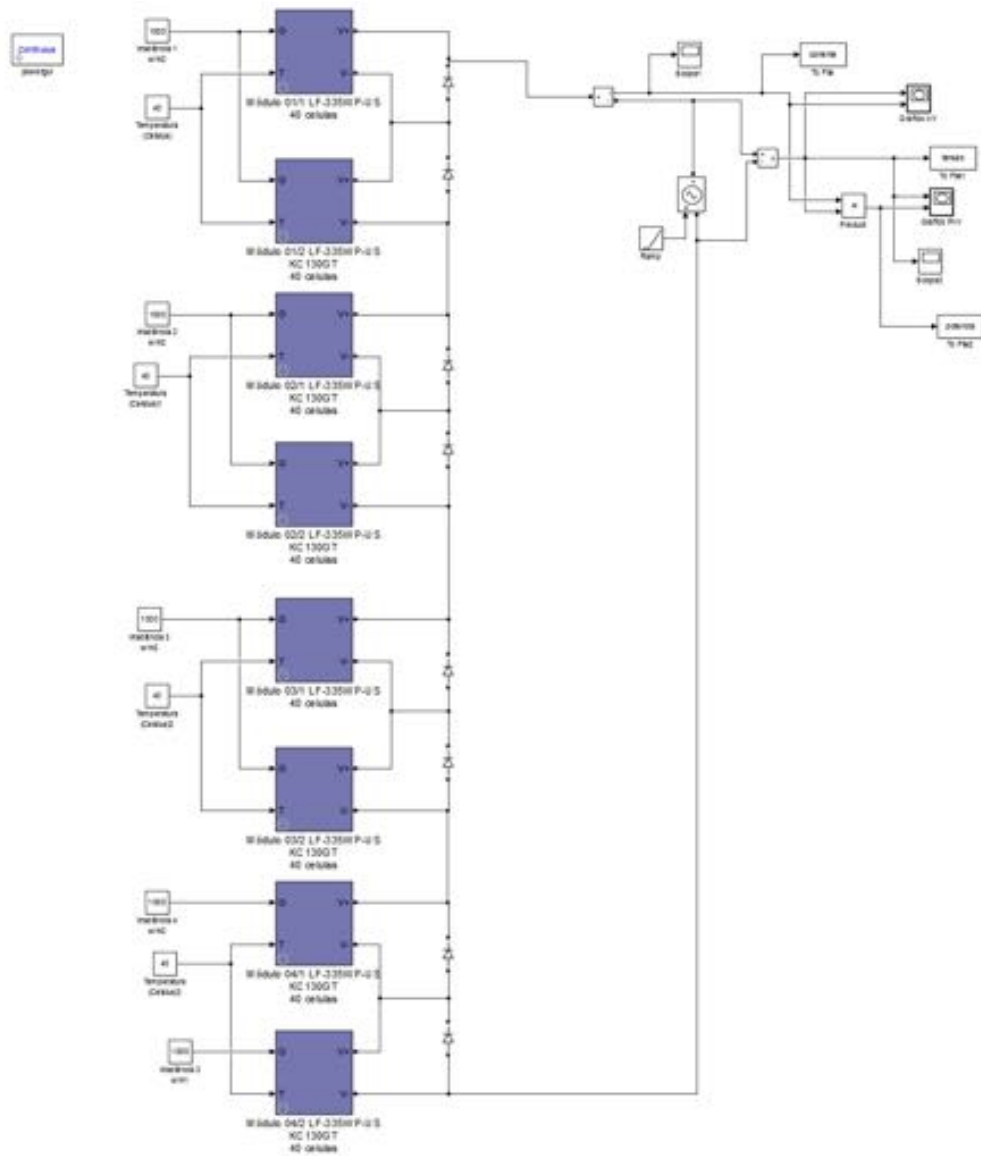
**CASO 2.b:** Têm-se oito painéis fotovoltaicos, divididos do seguinte modo, quatro painéis fotovoltaicos conectados em série, em condições de não sombreamento mais quatro painéis fotovoltaicos conectados em série, em condições de sombreamento parcial, não conectados a rede elétrica.

**CASO 2.c:** Têm-se oito painéis fotovoltaicos, divididos do seguinte modo, dois conjuntos de quatro painéis fotovoltaicos, cada conjunto conectado a um conversor Boost CC-CC elevador de tensão e conectados a rede elétrica.

- **CASO 1.a:** *Oito painéis fotovoltaicos conectados em série, em condições de não sombreamento.*

Na Figura 4.4 foram simulados oito módulos fotovoltaicos conectados em série. Cada módulo é composto por 40 células fotovoltaicas, A figura 4.4 mostra o caso em que todos os módulos estão submetidos à mesma irradiação solar,  $G = 1000\text{W/m}^2$ . Ou seja, não existe sombreamento nos painéis.

Figura 4.4 - Módulos fotovoltaicos sem sombreamento.

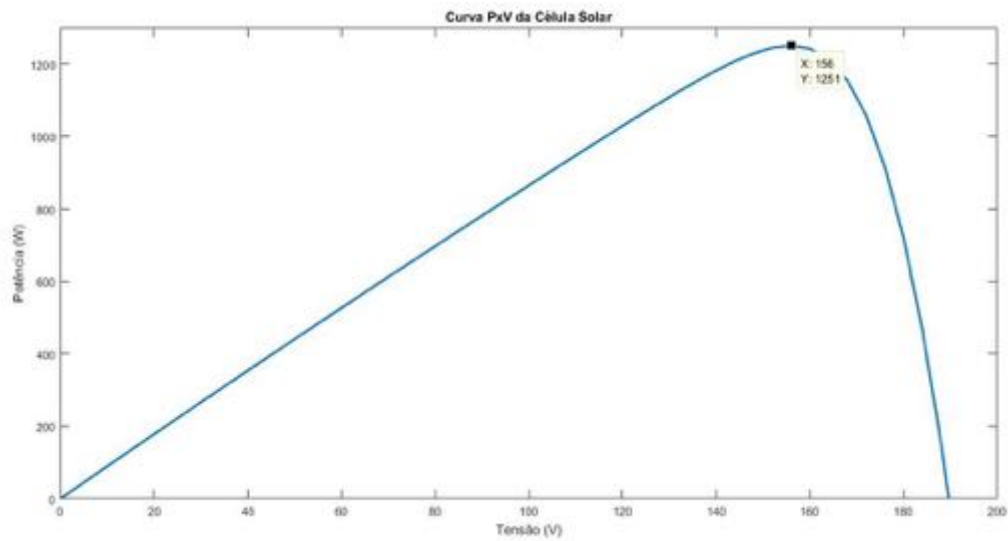


Fonte: Da Autora.

### ***Resultados de Simulação (CASO 1.a)***

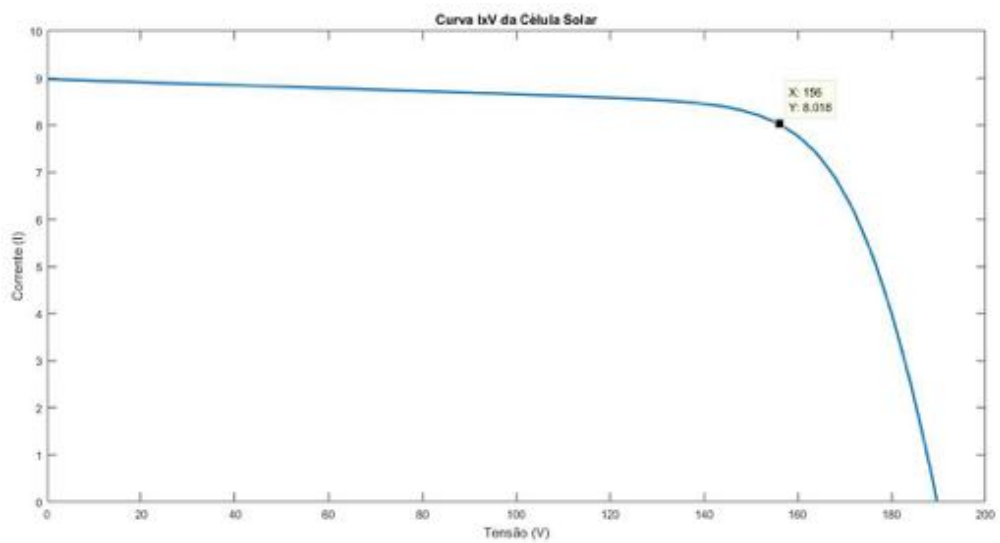
Os resultados de simulação do caso 1.a, são apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6. Na figura 4.5, é mostrado que o valor máximo de potência para a condição de não sombreamento é de 1251W. E na figura 4.6, apresenta-se o valor da corrente correspondente à máxima potência ( $I_{mp}$ ) de 8,018 A, e de tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) de 156 V.

Figura 4.5 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.



Fonte: Da Autora

Figura 4.6 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, sem sombreamento.



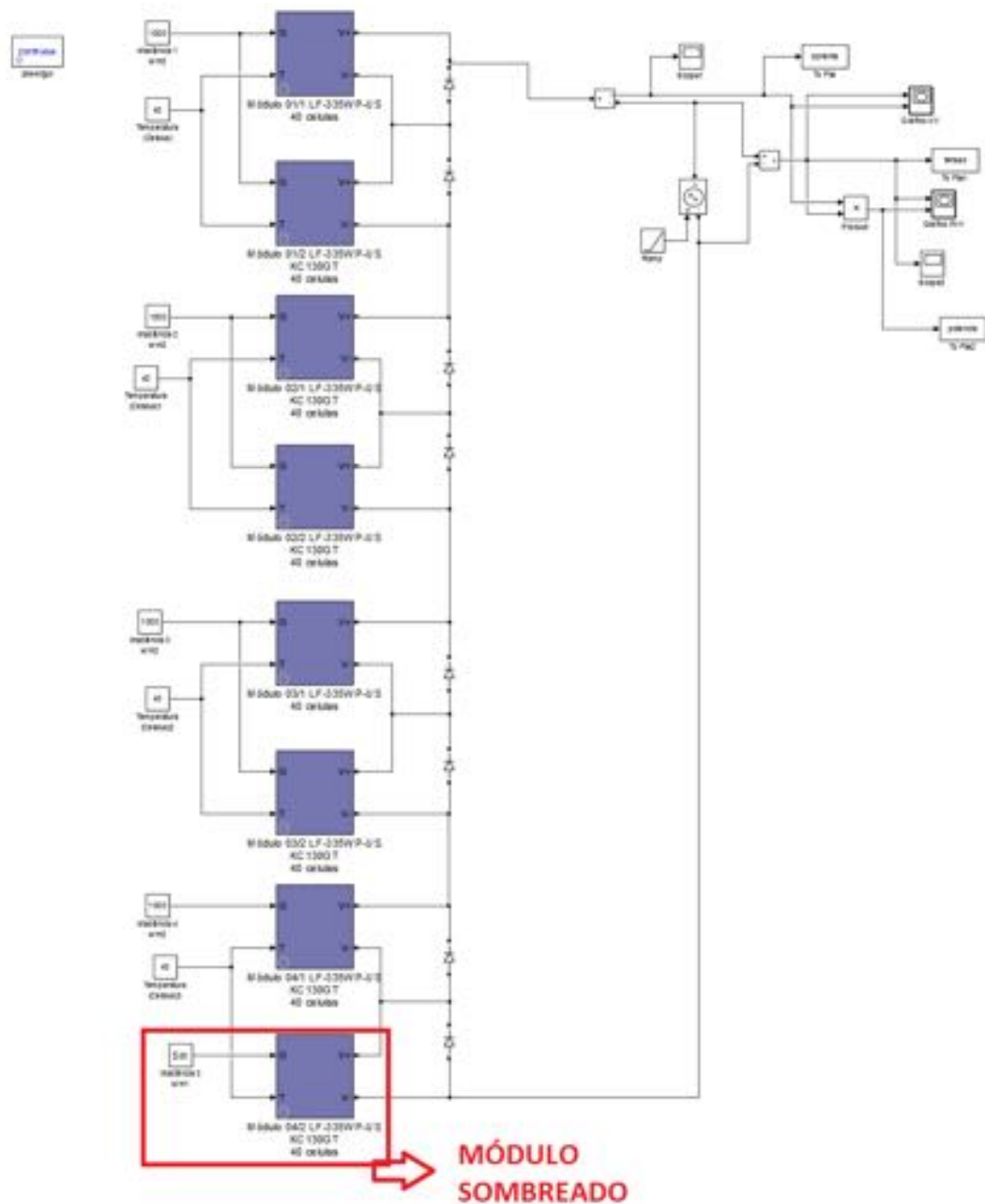
Fonte: Da Autora.

- **CASO 1.b:** *Oito painéis fotovoltaicos conectados em série, em condições de sombreamento.*

Novamente foram simulados oito módulos fotovoltaicos, entretanto, o último módulo composto por 40 células está submetido à situação de sombreamento. Os demais módulos estão submetidos à irradiação solar,  $G$ , de  $1000\text{W/m}^2$ . E o último módulo está submetido à irradiação solar,  $G$ , de  $500\text{W/m}^2$ . Conforme apresenta a Figura 4.7.



Figura 4.7 - Módulos Fotovoltaicos Submetido a Sombreamento.



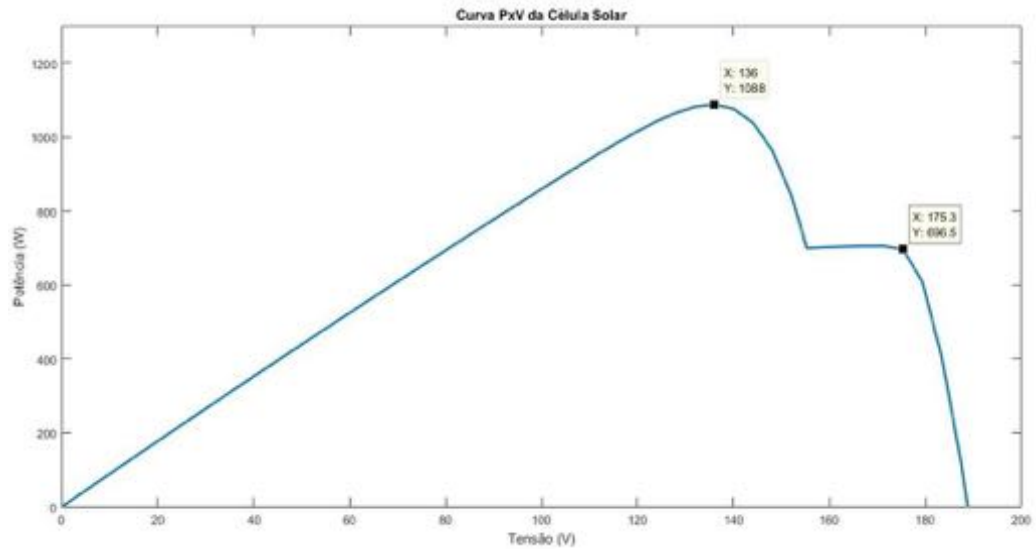
Fonte: Da Autora.

### **Resultados de Simulação (CASO 1.b)**

Os resultados de simulação do caso 1.b, com sombreamento, são apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9. Na característica P-V do módulo submetido a sombreamento, tem-se dois picos de potência, conforme apresenta a figura 4.8, o valor máximo de potência está localizado no maior pico e é de 1088W, o valor de potência no pico menor é de 696,5W. E na figura 4.9, tem-se dois patamares, no primeiro patamar, apresenta-se o valor de  $I_{mp}$  de 8A, e

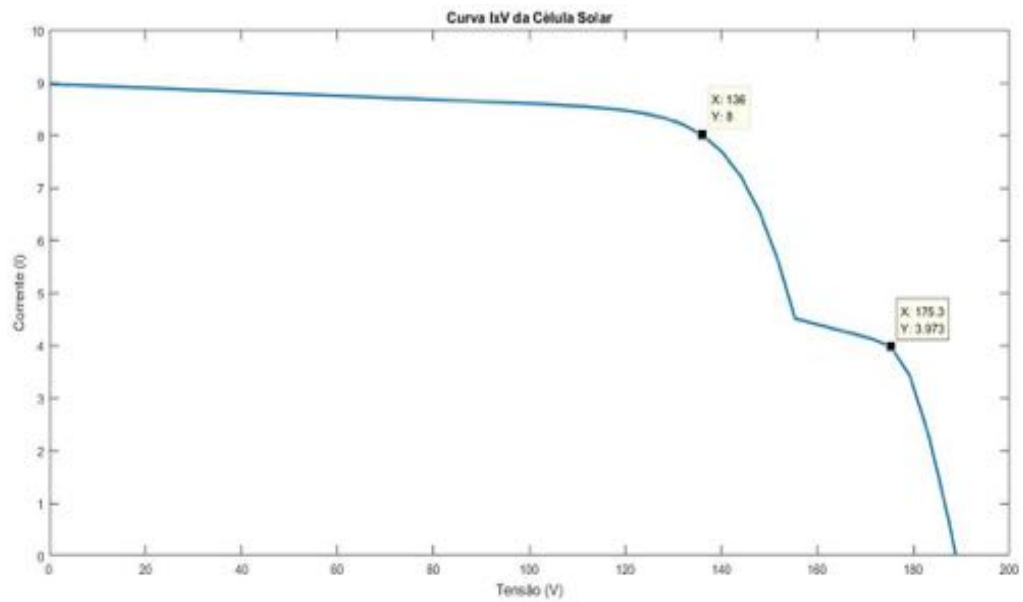
de  $V_{mp}$  de 136V. No patamar seguinte apresenta-se o valor de corrente de 3,973A e tensão de 175,3V.

Figura 4.8 - Curva P-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento.



Fonte: Da Autora.

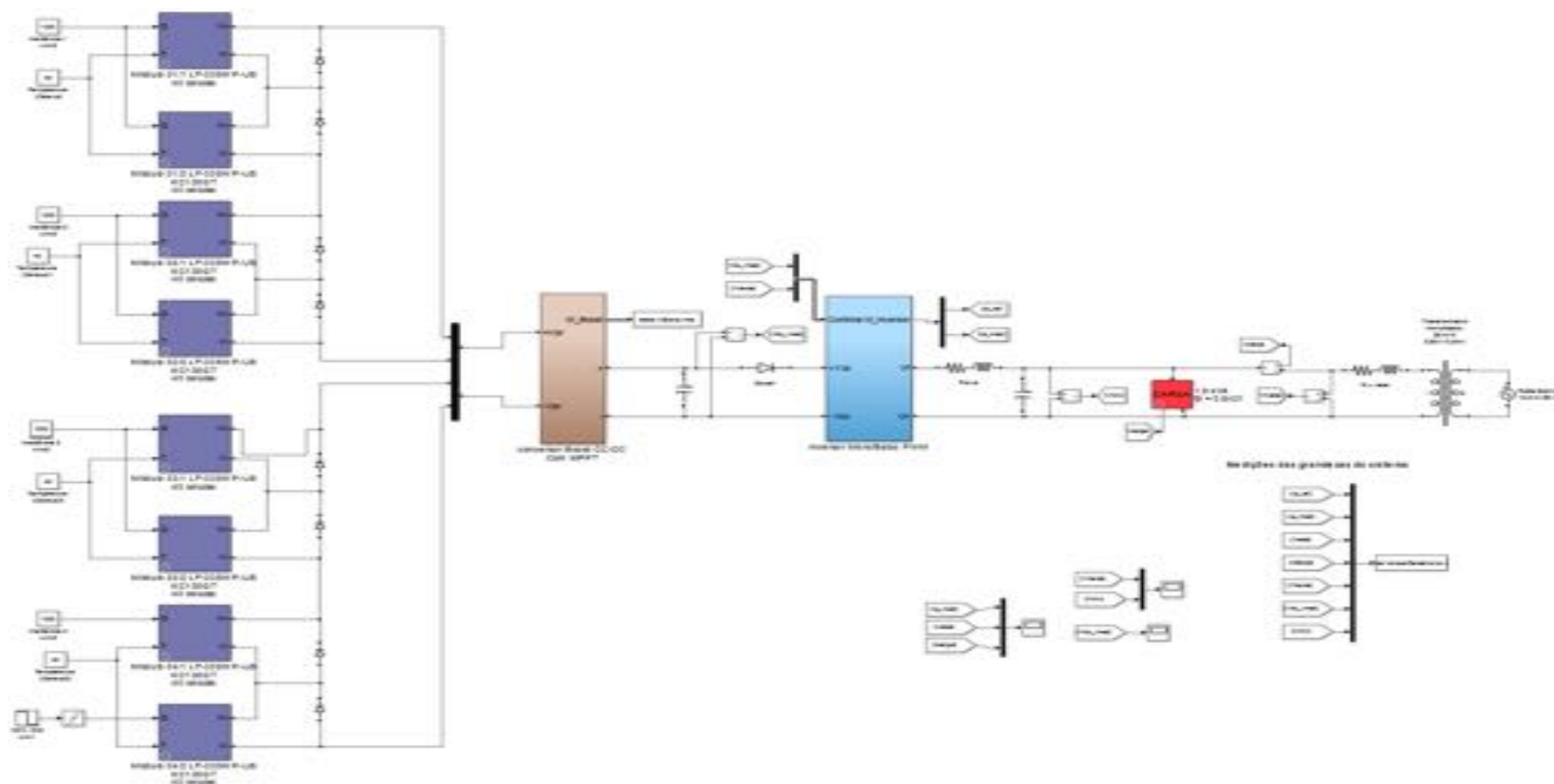
Figura 4.9 - Curva I-V do módulo fotovoltaico, com sombreamento.



Fonte: Da Autora.

- **CASO 1.c:** Oito painéis fotovoltaicos ligados em série, conectados a um único conversor Boost CC-CC elevador de tensão e conectados a rede elétrica.

Figura 4.10 - Módulos Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica.



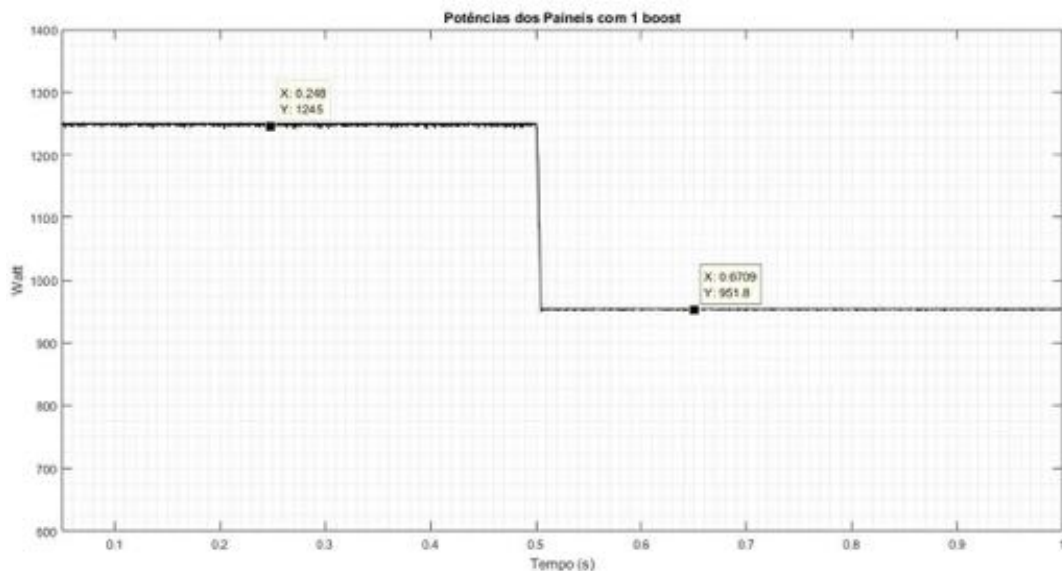
Fonte: Da Autora.

Na Figura 4.10 é ilustrada a situação em que oito módulos fotovoltaicos, cada módulo composto por 40 células fotovoltaicas, é conectado à rede elétrica através de um único conversor Boost CC-CC elevador de tensão.

### ***Resultados de Simulação (CASO 1.c)***

O resultado da simulação do caso 1.c, conectado a rede elétrica, com os módulos sem sombreamento durante os 0,5 segundos iniciais de simulação, e com os módulos submetidos ao sombreamento parcial durante os 0,5 segundos finais de simulação é apresentado na Figura 4.11. A figura 4.11 apresenta a potência máxima dos módulos sem sombreamento até o tempo de 0,5 segundos, e apresenta a potência máxima dos módulos submetidos ao sombreamento parcial a partir de 0.5 segundos. O valor máximo de potência para a condição de não sombreamento indicado na figura 4.11, é de 1245W e o valor máximo de potência para a condição de sombreamento parcial, é de 951,8W, os valores apresentados são compatíveis aos valores apresentados nos casos 1.a e 1.b.

Figura 4.11 - Potência dos Painéis Conectados à Rede Elétrica.



Fonte: Da Autora.

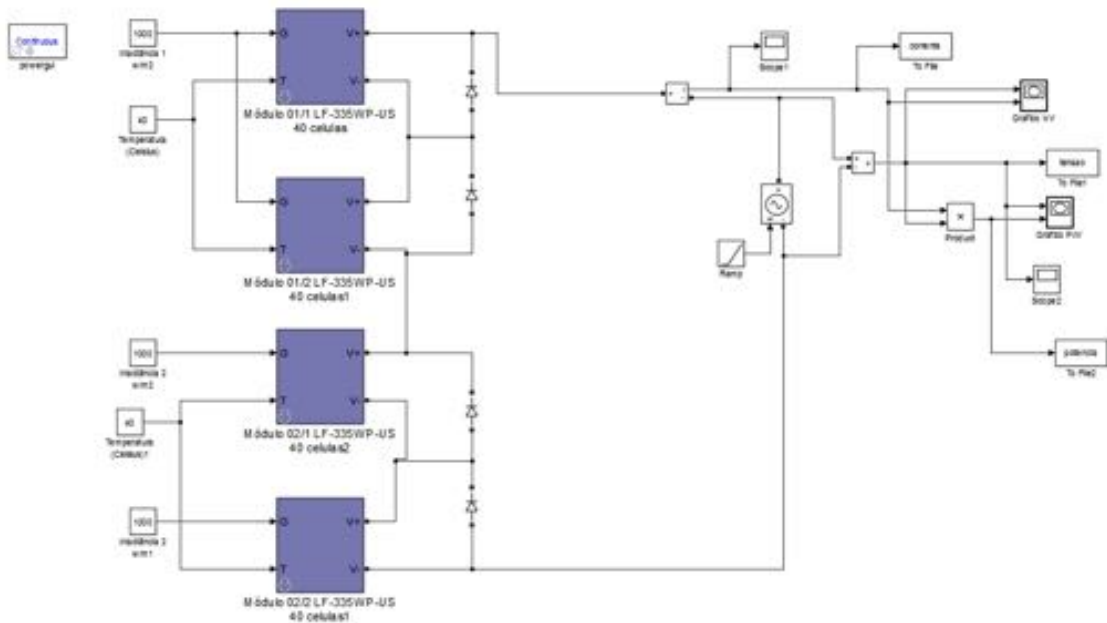
Isto indica que o controle de MPPT utilizado pelo inversor na conexão com a rede elétrica consegue identificar o ponto de máxima potência para o caso em que não existe sombreamento, e para o caso que existe sombreamento, ele fica entre o pico de maior potência

e de menor potência, entretanto, bem mais próximo do pico de maior potência, se comparada a figura 4.8.

- **CASO 2.a: Oito painéis fotovoltaicos, divididos em dois grupos de quatro painéis conectados em série, ambos em condição de não sombreamento.**

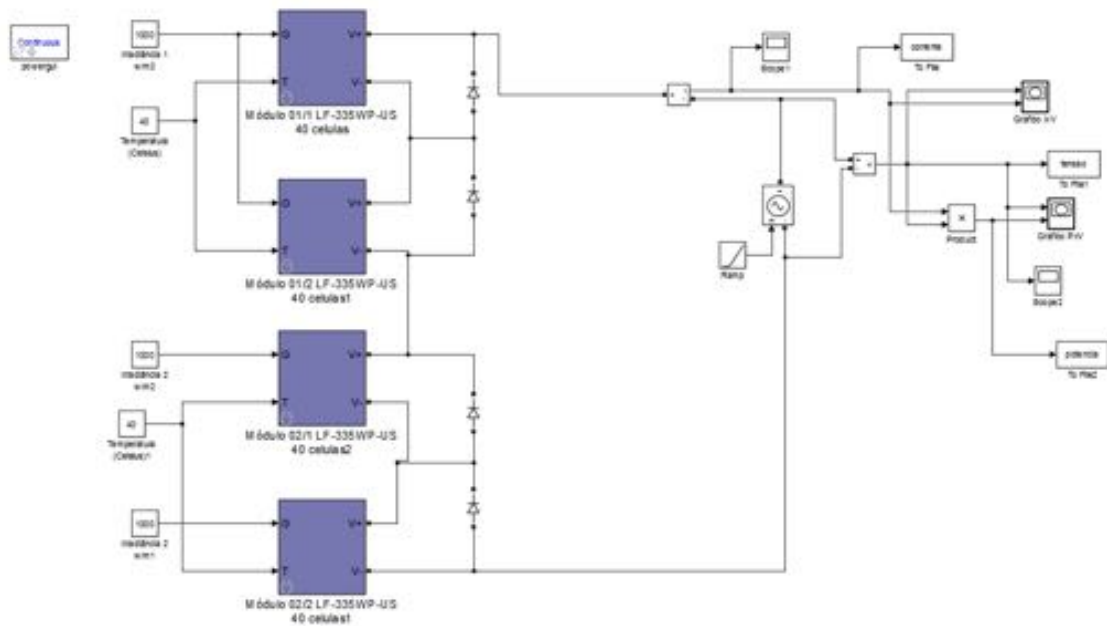
As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam em cada figura quatro painéis fotovoltaicos que foram simulados, cada painel é composto por 40 células fotovoltaicas, totalizando o uso de oito painéis no sistema. As figuras 4.12 e 4.13, mostram o caso em que todos os módulos estão submetidos à mesma irradiação solar,  $G$ , de  $1000\text{W/m}^2$ , ou seja, não existe sombreamento nos painéis. Este modelo será utilizado para conexão na rede, em que se utilizam dois conversores Boost CC-CC elevador de tensão. Ou seja, ao conectar na rede elétrica, o resultado de potência obtido deverá ser igual a soma da potência de saída dos dois grupos compostos por quatro módulos, sendo cada grupo conectado separadamente a um conversor Boost CC-CC.

Figura 4.12 – Primeiro grupo de quatro Módulos Fotovoltaicos Sem Sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Figura 4.13 – Segundo grupo de quatro Módulos Fotovoltaicos Sem Sombreamento.

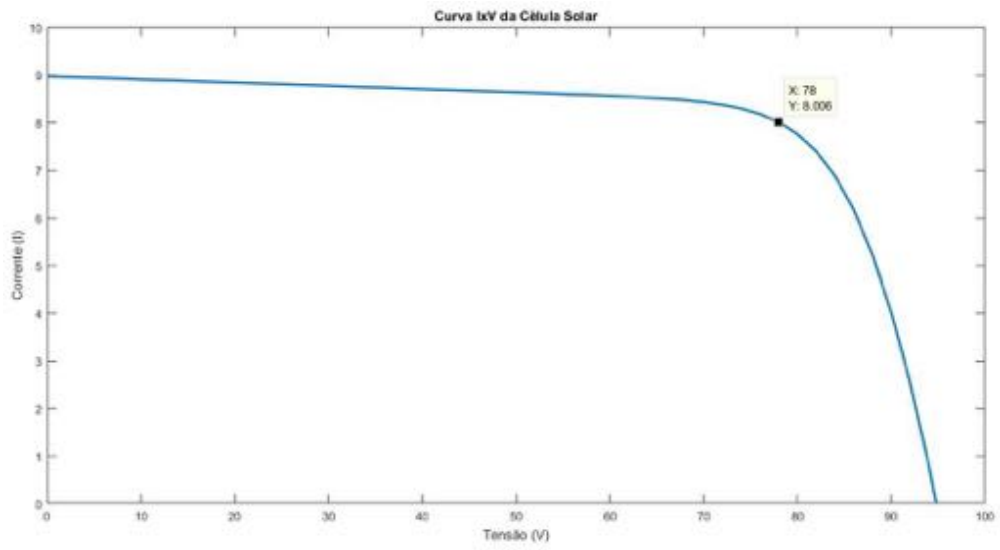


Fonte: Da Autora.

### **Resultados de Simulação (CASO 2.a)**

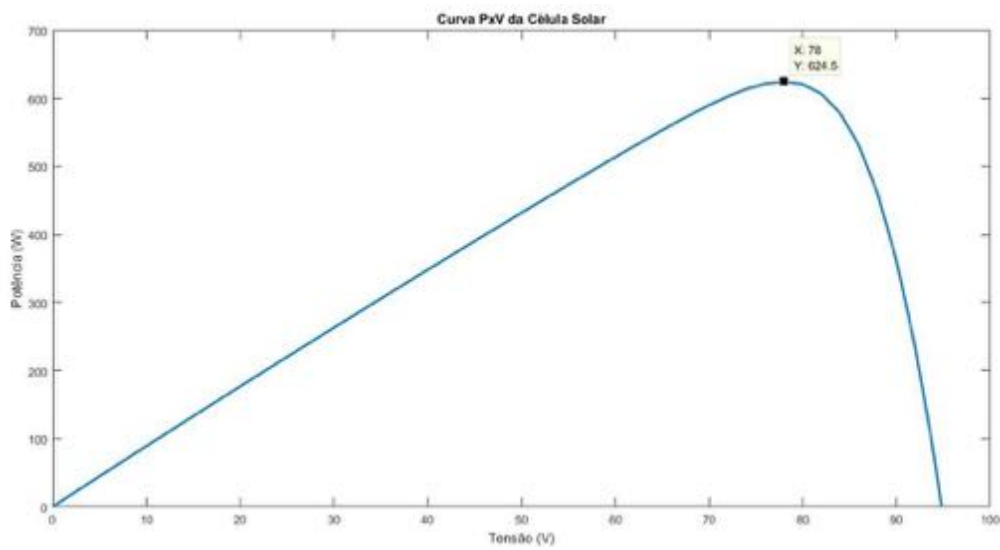
Os resultados de simulação dos sistemas apresentados nas figuras 4.12 e 4.13 do caso 2.a, para quatro módulos conectados em série, sem sombreamento, são mostrados a seguir. As Figuras 4.14 e 4.15 correspondem ao resultado do primeiro grupo de painéis mostrado na figura 4.12. As Figuras 4.16 e 4.17 correspondem ao resultado do segundo grupo de painéis mostrado na figura 4.13. As figuras 4.14 e 4.16 apresentam o valor da  $I_{mp}$ , 8 A, e da  $V_{mp}$ , 78V, para cada conjunto. As figuras 4.15 e 4.17 mostram o valor máximo de potência para cada conjunto, que é de 624,5W para cada grupo. Logo o primeiro e o segundo grupo de módulos apresentam o mesmo desempenho.

Figura 4.14 - Curva I-V do primeiro grupo de quatro módulos fotovoltaicos, sem sombreamento.



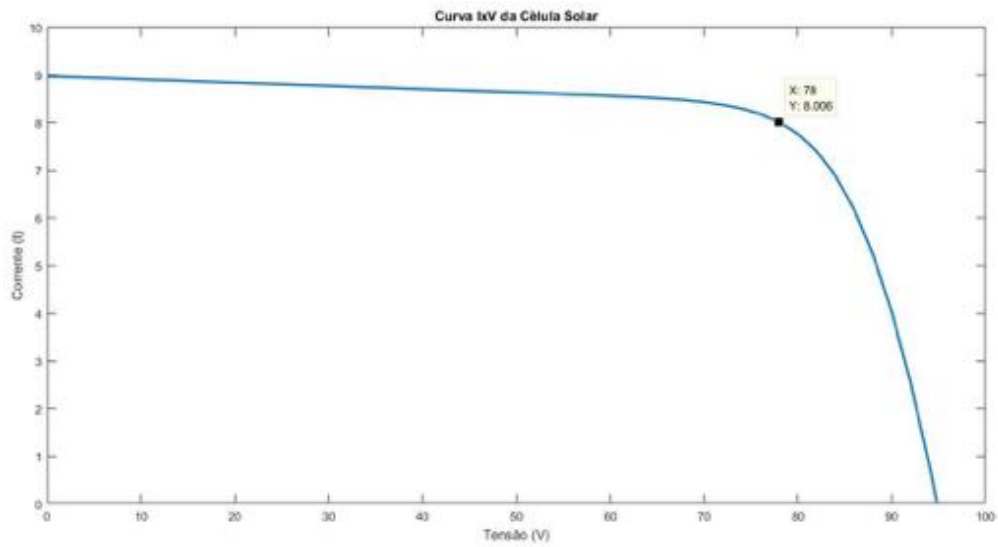
Fonte: Da Autora.

Figura 4.15 - Curva P-V do primeiro grupo de quatro módulos fotovoltaicos, sem sombreamento.



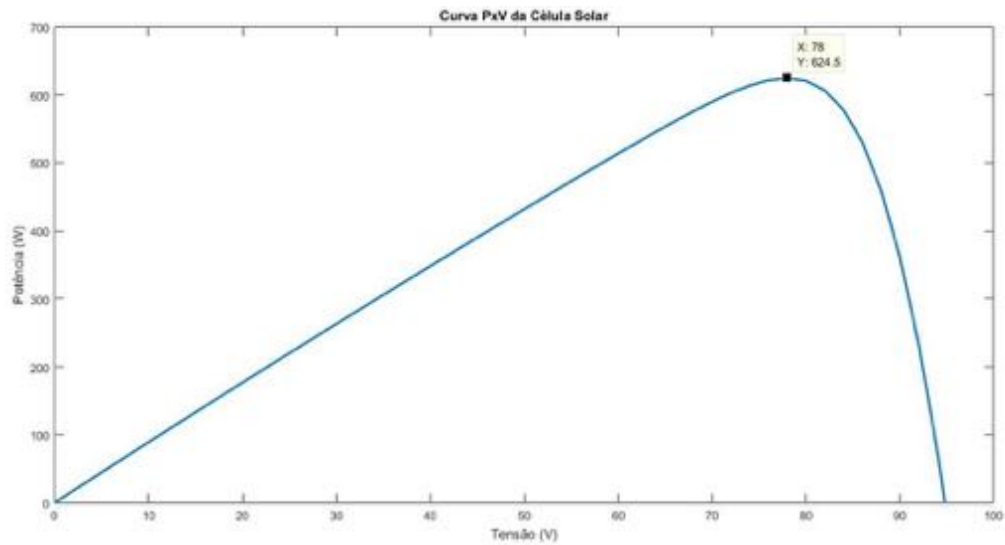
Fonte: Da Autora.

Figura 4.16 - Curva I-V do segundo grupo de quatro módulos fotovoltaicos, sem sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Figura 4.17 - Curva P-V do segundo grupo de quatro módulos fotovoltaicos, sem sombreamento.



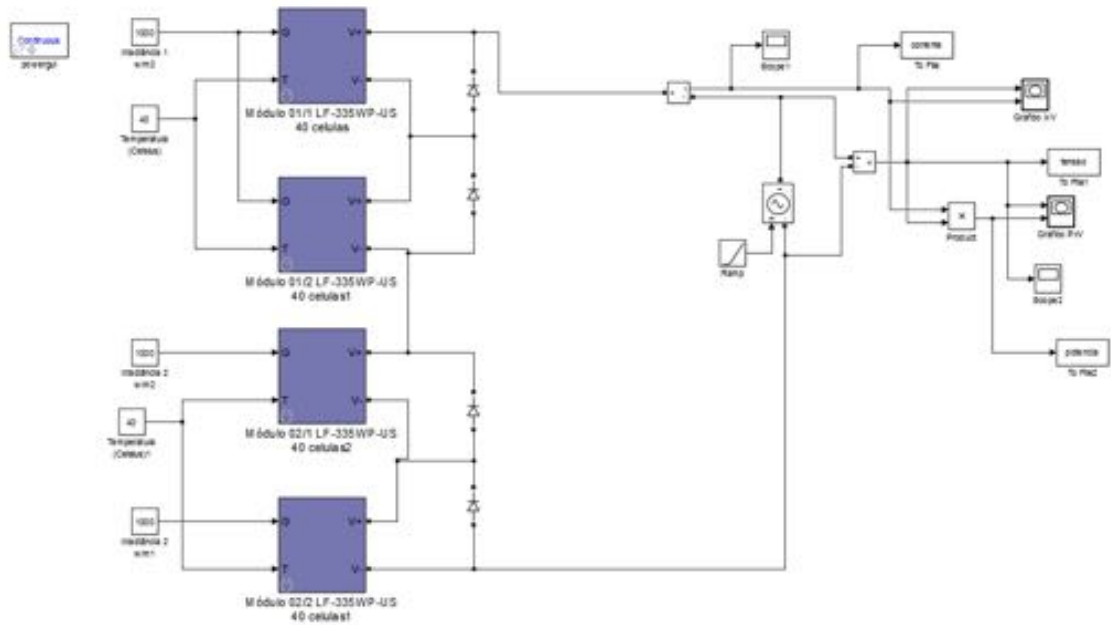
Fonte: Da Autora.

Neste caso a potência máxima total será a soma da potência de saída dos dois grupos compostos por quatro painéis cada. Tem-se então para o caso em que temos oito painéis não sombreados e conectados de quatro em quatro, através de dois conversores Boost CC-CC elevador de tensão, uma potência máxima de 1249W. E tensão de máxima potência de 156 V.



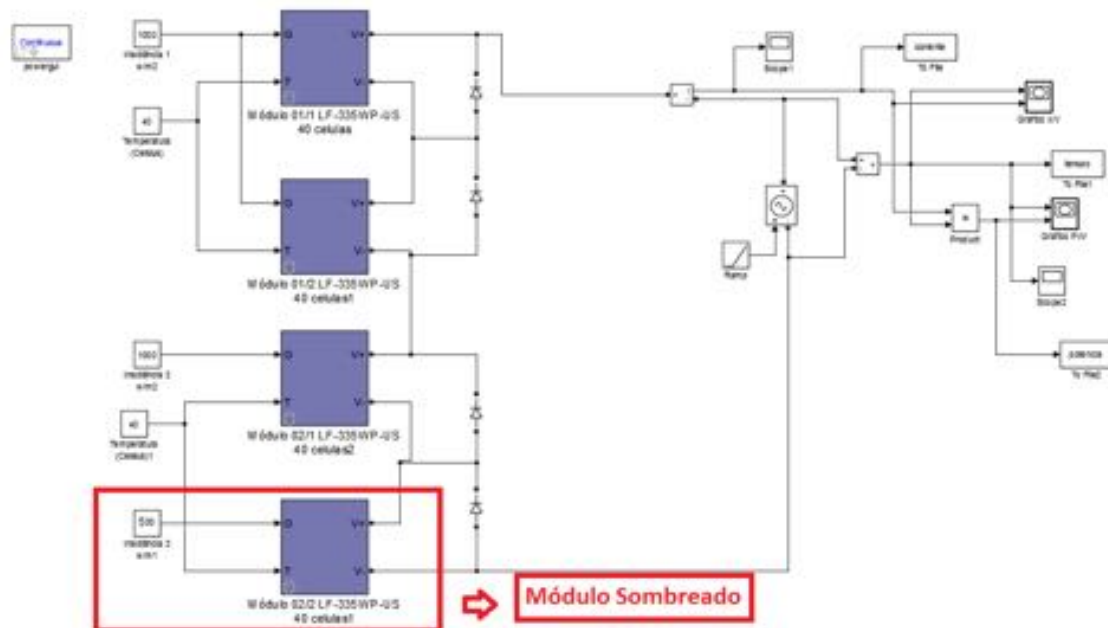
**Caso 2.b: Oito painéis fotovoltaicos, divididos em dois grupos de quatro painéis conectados em série, quatro painéis em condição de não sombreamento, e quatro painéis em condição de sombreamento parcial.**

Figura 4.18 – Primeiro grupo de quatro Módulos Fotovoltaicos Sem Sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Figura 4.19 – Segundo grupo de quatro Módulos Fotovoltaicos Submetidos a Sombreamento.



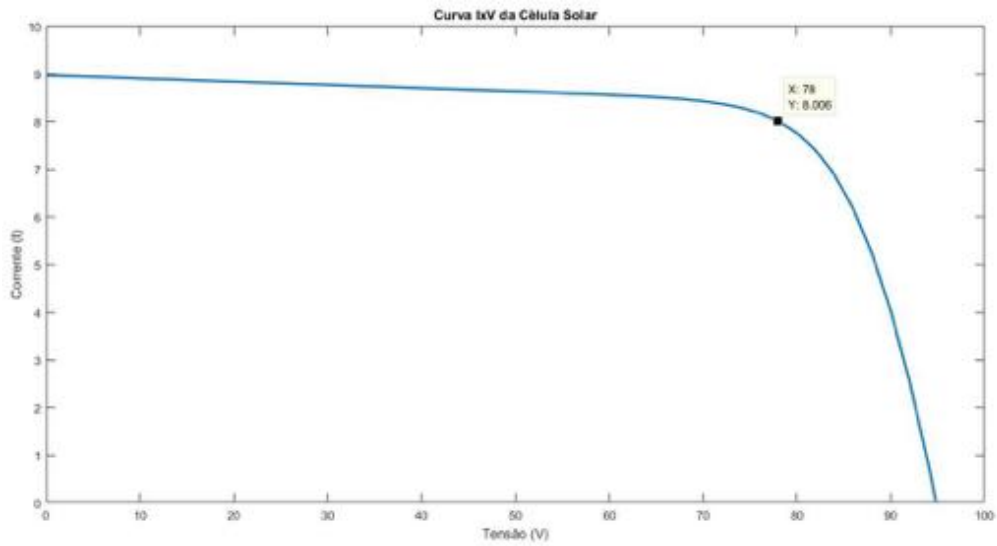
Fonte: Da Autora.

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam em cada figura quatro painéis fotovoltaicos que foram simulados, cada painel é composto por 40 células fotovoltaicas, totalizando o uso de oito painéis no sistema. A figura 4.18 e 4.19, mostram respectivamente, o caso em que todos os quatro módulos estão submetidos à mesma irradiação solar,  $G$ , de  $1000\text{W/m}^2$  e o caso em que o último módulo do segundo grupo de quatro painéis está submetido a condição de sombreamento parcial, ou seja, submetido a irradiação solar,  $G$  de  $500\text{W/m}^2$ . Este modelo será utilizado para conexão na rede, em que se utilizam dois conversores Boost CC-CC elevador de tensão. Ou seja, ao conectar na rede elétrica, o resultado de potência obtido deverá ser igual à soma da potência de saída dos dois grupos compostos por quatro módulos, sendo cada grupo conectado separadamente a um conversor Boost CC-CC elevador de tensão.

### **Resultados de Simulação (Caso 2.b)**

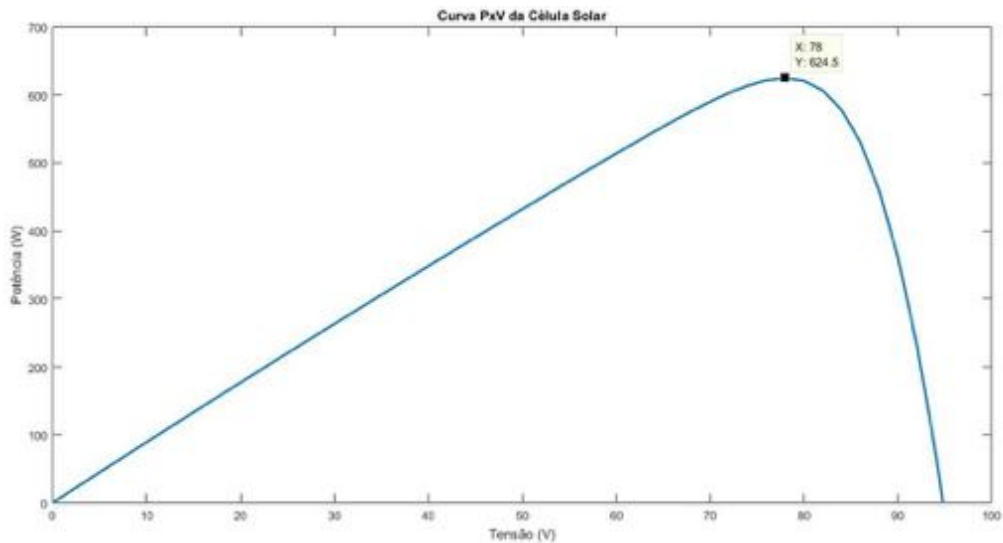
Os resultados de simulação do sistema apresentado na figura 4.18 do caso 2.b, para quatro módulos conectados em série, sem sombreamento, são apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21. Na figura 4.20, apresenta-se o valor de  $I_{mp}$  de  $8\text{ A}$ , e de  $V_{mp}$  de  $78\text{V}$ . E na figura 4.21, é mostrado que o valor máximo de potência é de  $624,5\text{W}$ .

Figura 4.20 - Curva I-V do primeiro grupo de módulos fotovoltaico, sem sombreamento.



Fonte: Da Autora.

Figura 4.21 - Curva P-V do primeiro grupo de módulos fotovoltaico, sem sombreamento.



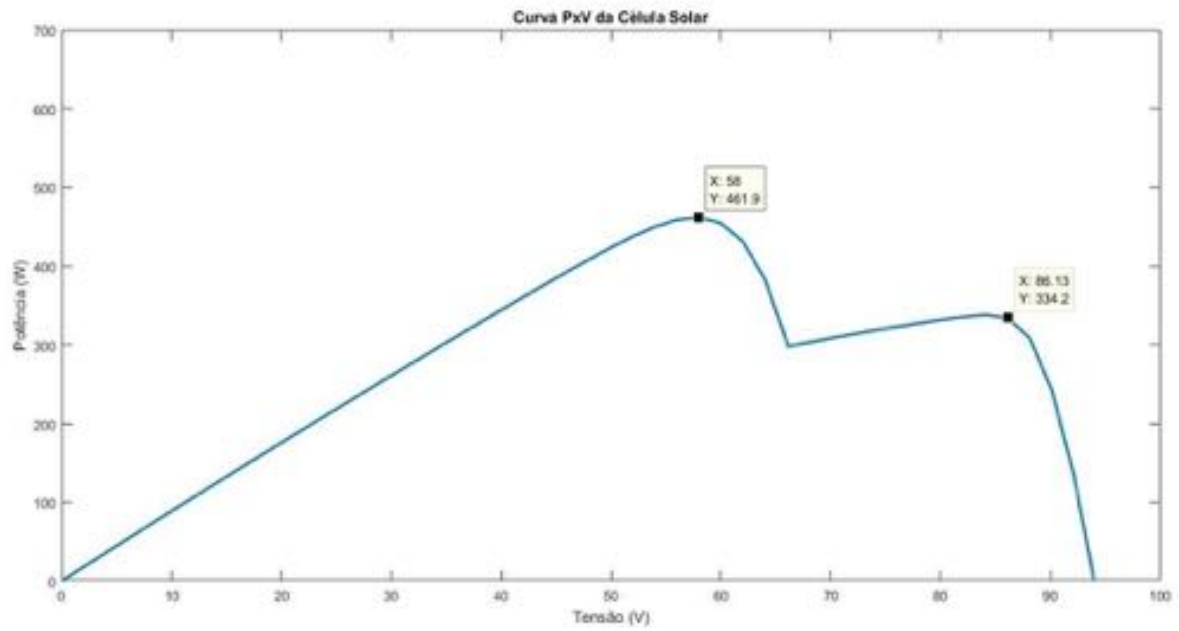
Fonte: Da Autora.

Os resultados de simulação do sistema apresentado na figura 4.19 do caso 2.b, para um segundo grupo de quatro módulos conectados em série, submetidos a sombreamento parcial, são apresentados nas Figuras 4.22 e 4.23. A figura 4.22, apresenta a característica P-V do grupo de módulos submetidos ao sombreamento parcial, têm-se dois picos de potência, conforme exibido. O valor máximo de potência está localizado no maior pico e é de 461,9W e o valor de potência no pico menor é de 334,2W. A figura 4.23, apresenta a característica I-V do grupo de módulos submetido ao sombreamento parcial, tem-se, portanto, dois patamares:

No patamar mais elevado, apresenta-se o valor de corrente de máxima potência de 8,19A, e de tensão de máxima potência de 56V; No patamar mais baixo apresenta-se o valor de corrente de 3,88A e tensão de 86,13V.

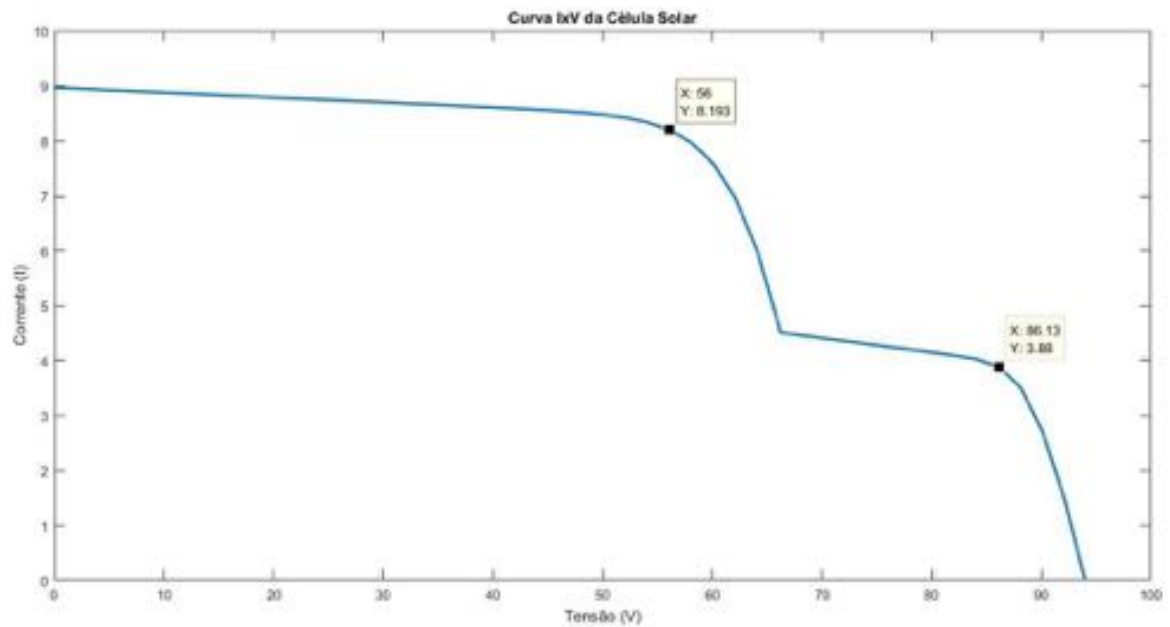
Tem-se então, para o caso estudado uma potência máxima total de 1086,4W no pico mais elevado, resultante da soma da máxima potência dos dois grupos de painéis. Tem-se uma potência total de 958,7 W no pico menor, resultante da soma das potências dos dois grupos de painéis. E uma tensão total de 134V no patamar maior e uma tensão total de 164V no patamar menor, resultante da soma dos resultados do primeiro e segundo grupo de painéis.

Figura 4.22 - Curva P-V do segundo grupo de módulo fotovoltaico, com sombreamento.



Fonte: Da Autora.

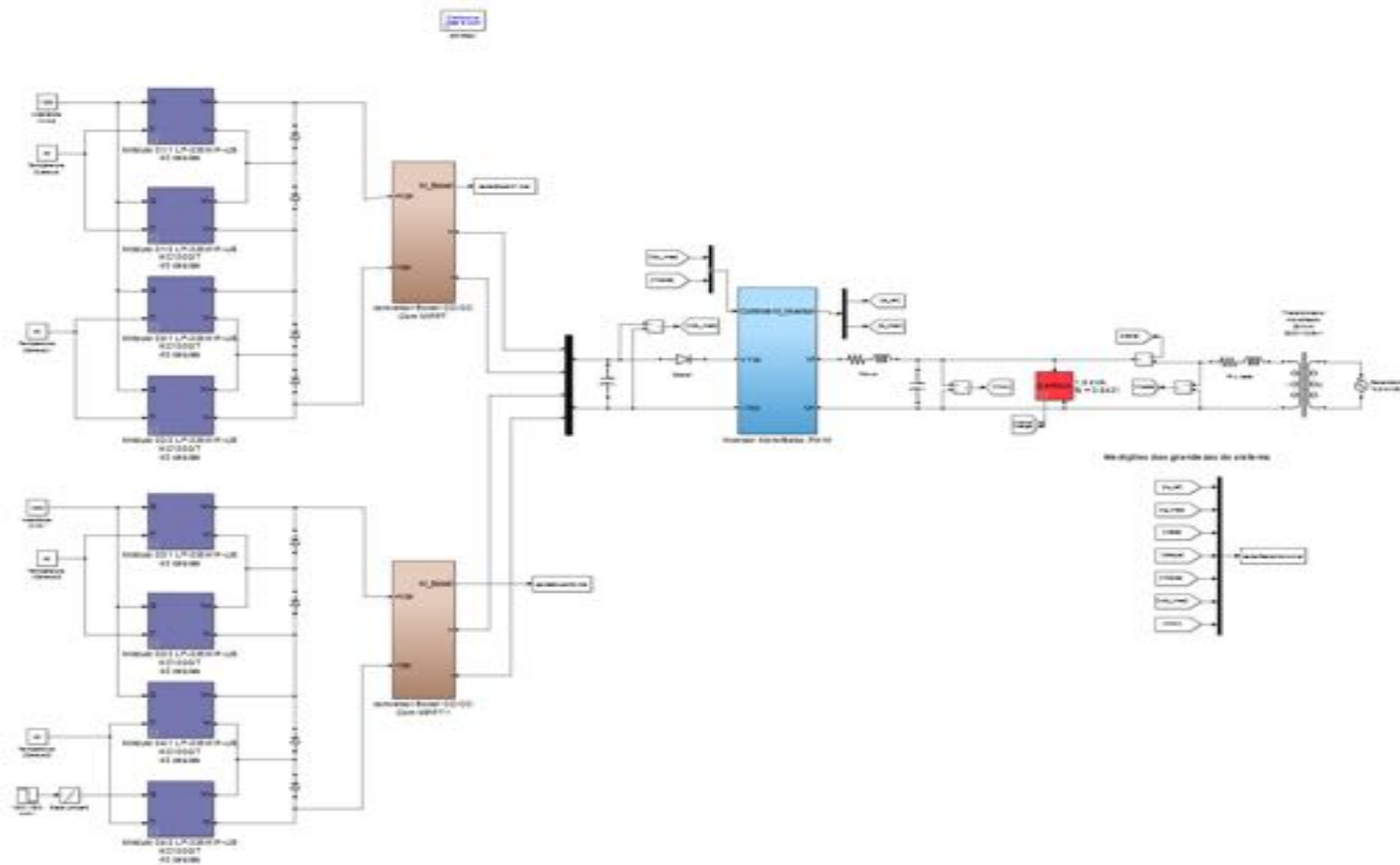
Figura 4.23 - Curva I-V do segundo grupo de módulo fotovoltaico, com sombreamento.



Fonte: Da Autora.

**Caso 2.c: Oito Painéis Fotovoltaicos Conectados a rede elétrica através de dois conversores Boost CC-CC elevador de tensão.**

Figura 4.24 - Módulos Conectados a Rede Elétrica Através De Dois Conversores Boost.



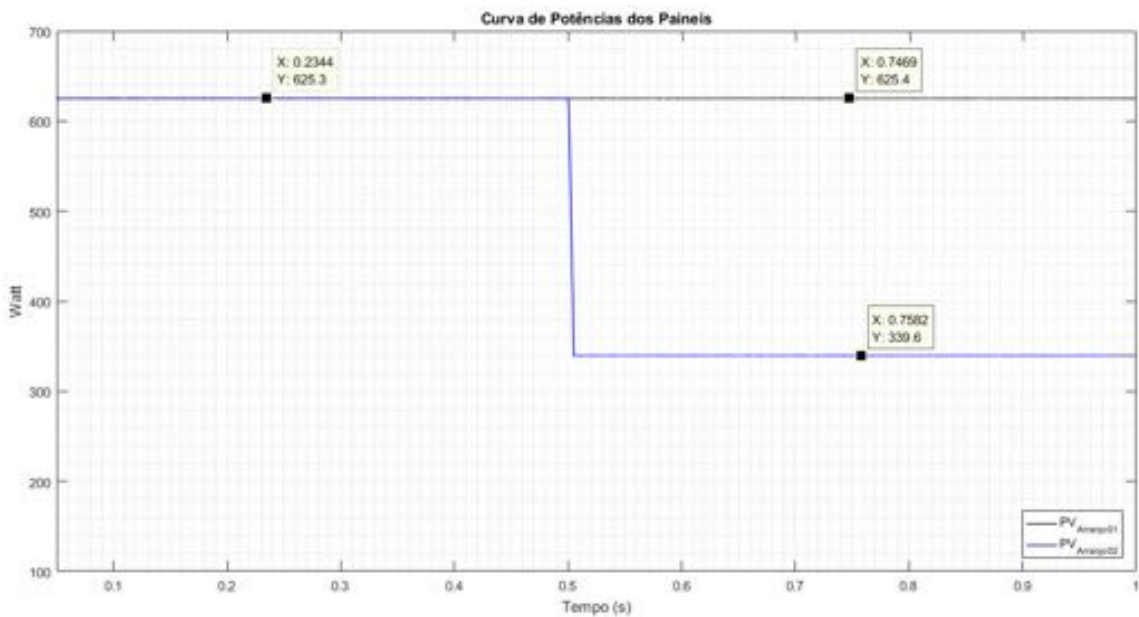
Fonte: Da Autora.

A Figura 4.24 ilustra a situação dos oito módulos fotovoltaicos conectados a rede elétrica através de dois conversores Boost CC-CC elevador de tensão.

### **Resultados de Simulação (Caso 2.c)**

O resultado da simulação do caso 2.c, conectado à rede elétrica, com um grupo de módulos em condições no qual não ocorre sombreamento, e com um grupo de módulos submetidos ao sombreamento parcial, é apresentado na Figura 4.25. Na figura 4.25 é apresentada a potência máxima dos módulos sem sombreamento até o tempo de 0,5 segundos, bem como a potência máxima dos módulos submetidos ao sombreamento parcial a partir de 0,5 segundos.

Figura 4.25 - Potência dos Painéis Conectados à Rede Elétrica.



Fonte: Da Autora.

Verifica-se na figura 4.25 que a curva em preto representa a potência dos quatro painéis (primeiro grupo) que não estão submetidos ao sombreamento. Já a curva em azul representa a curva dos outros quatro painéis (segundo grupo) que estão submetidos ao sombreamento.

Pode-se observar, através da curva em azul, que o grupo de painéis que está submetido ao sombreamento, apresenta potência de 625,3W durante o tempo em que o mesmo não está sombreado, e apresenta potência de 339,6W durante o tempo em que está submetido ao sombreamento parcial.

Pode-se observar, através da curva preta, que o grupo de painéis que não está submetido ao sombreamento, apresenta durante todo o tempo de simulação a mesma potência de 625,4W.

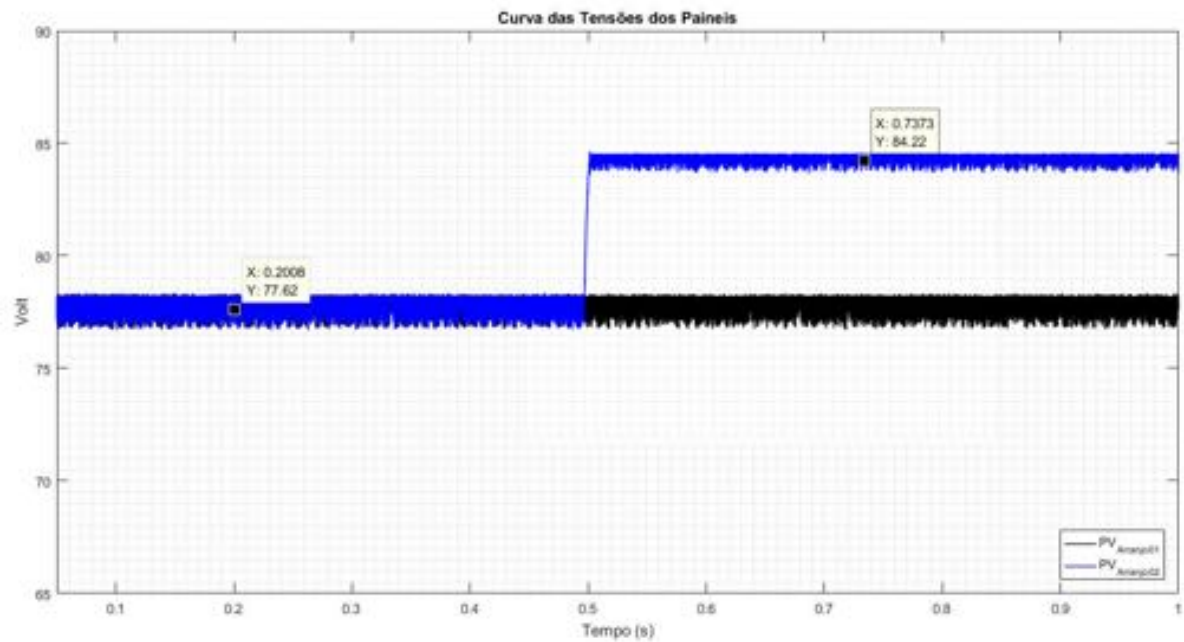
Logo, o valor total de potência que será fornecido para a carga será a soma das potências dos grupos. Tem-se então que o valor de potência a ser transferido para a carga durante os 0,5 segundos iniciais de simulação, que correspondem a condição de não sombreamento indicado na figura 4.25, é de 1251W, referente a soma da potência dos dois grupos de painéis. Por outro lado, o valor de potência a ser transferido para a carga a partir dos 0,5 segundos de simulação até 1 segundo, que corresponde a condição de sombreamento parcial, é de 965W, referente a soma da potência de ambos os grupos.

Atesta-se, portanto, que o MPPT utilizado na conexão com a rede elétrica consegue identificar o ponto de máxima potência para o caso em que não existe sombreamento, e para o caso que existe sombreamento, ele fica entre o pico de maior potência e de menor potência, entretanto, bem mais próximo do pico de maior potência.

A Figura 4.26 apresenta a tensão dos dois grupos de painéis conectados à rede elétrica. A curva em preto representa a tensão do grupo de painéis que não foi submetido ao sombreamento, enquanto que a curva em azul representa a tensão do grupo de painéis que foi submetido ao sombreamento.



Figura 4.26 - Tensão dos Painéis Conectados à Rede Elétrica.

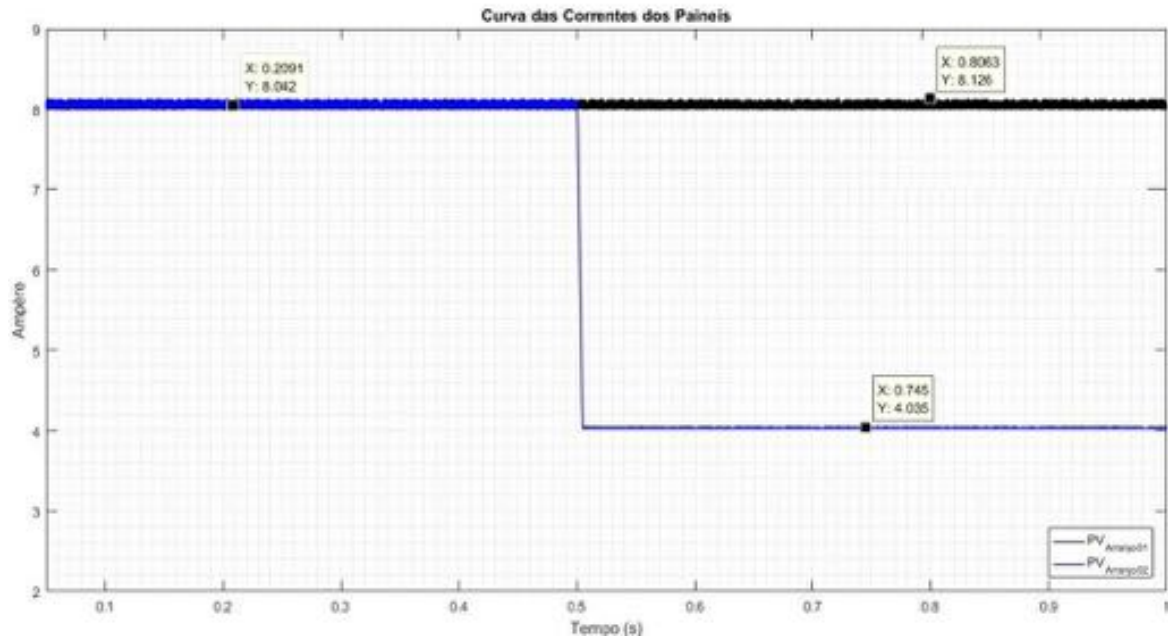


Fonte: Da Autora.

Pode-se observar que a curva de tensão do grupo de painéis submetidos ao sombreamento tem uma elevação no módulo da tensão quando estão sombreados. Já os painéis que não estão submetidos ao sombreamento permanecem com a mesma tensão.

A Figura 4.27 apresenta a corrente nos dois grupos de painéis conectados à rede elétrica. A curva em preto representa a corrente do grupo de painéis que não foram submetidos ao sombreamento. A curva em azul representa a corrente do grupo de painéis que foi submetido ao sombreamento.

Figura 4.27 - Corrente dos Painéis Conectados à Rede Elétrica.



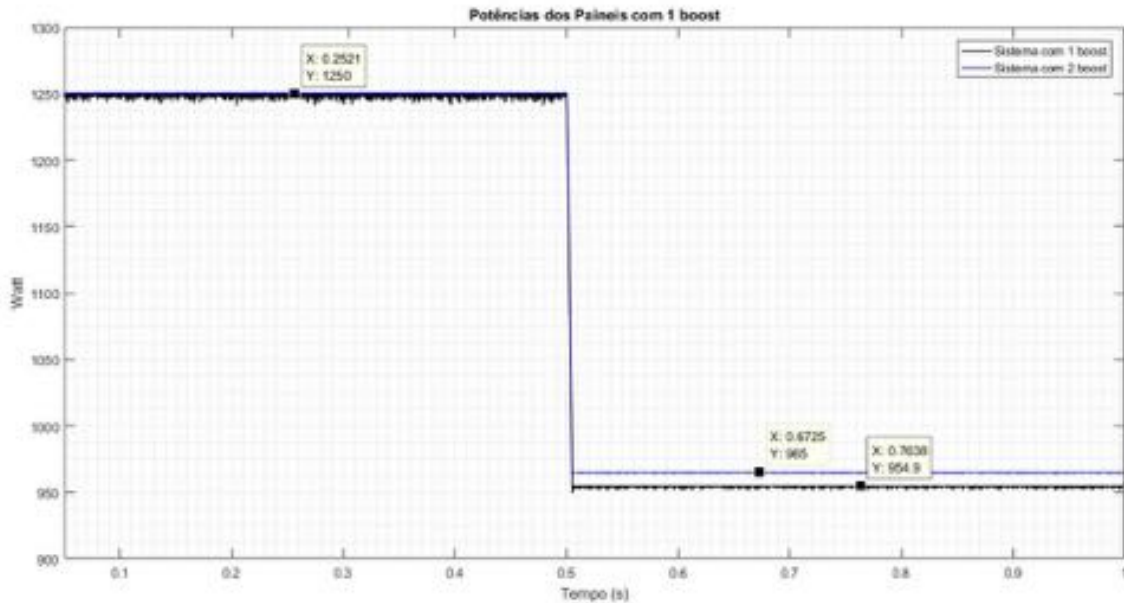
Fonte: Da Autora.

Pode-se observar que a curva de corrente do grupo de painéis submetidos ao sombreamento tem uma queda no módulo da corrente quando estão sombreados, já os painéis que não estão submetidos ao sombreamento permanecem com a mesma corrente.

#### 4.2.1. Avaliação dos Painéis ligados com Um ou Dois Boosts à Rede Elétrica.

Ao comparar os dois casos, oito painéis conectados em série na rede elétrica com um único conversor Boost e oito painéis conectados na rede através do uso de dois conversores Boost, pode-se concluir que existe um ganho na potência referente à condição de sombreamento parcial para o caso em que se tem dois grupos de quatro painéis conectados separadamente através de dois conversores Boost CC-CC, conforme apresenta a Figura 4.28. Ressalta-se uma potência de 1250 W para ambos os casos, quando não existe sombreamento. Entretanto, para o caso em que existe sombreamento nos painéis, tem-se uma potência de 954,9 W para o caso em que se utiliza apenas um conversor CC-CC para conectar os oito painéis a rede elétrica, e uma potência de 965 W para o caso em que se utilizam dois conversores CC-CC para conectar os oito painéis a rede elétrica.

Figura 4.28 - Potência dos painéis com um Boost *versus* com dois Boosts.



Fonte: Da Autora.

Ao utilizar um único conversor Boost CC-CC elevador de tensão conectado a oito painéis fotovoltaicos ligados em série, como apresenta o caso 1.c, haverá apenas uma curva P-V correspondente aos oito painéis. A partir dos 0,5 segundos de simulação, o sistema entrará na condição de sombreamento parcial. Porém, devido à condição de sombreamento parcial, a única curva P-V captada pelo MPPT não é a curva nominal dos painéis. Logo, o MPPT extrai um único valor de potência máxima, que não é a potência máxima dos painéis devido à condição adversa do sombreamento.

Ao utilizar dois conversores Boost CC-CC elevador de tensão conectado a dois grupos de painéis separadamente, com um grupo de módulos em condições no qual não ocorre sombreamento, e com um grupo de módulos submetidos ao sombreamento parcial, conforme apresenta o caso 2.c, haverá duas curvas P-V correspondentes aos dois grupos de painéis. A partir dos 0,5 segundos de simulação o sistema entrará na condição em que o primeiro grupo de painéis não estará sombreado e o segundo grupo de painéis estará sombreado. Desse modo, duas curvas P-V serão captadas pelo MPPT. O MPPT vai extrair da curva P-V do primeiro grupo, a máxima potência real dos painéis fotovoltaicos em condições nominais. Entretanto, o MPPT vai extrair da curva P-V do segundo grupo, uma potência que não será a máxima nominal dos painéis, mas sim a máxima potência para a condição de operação, que será menor do que a potência em condições normais de operação. Então, o total de potência para o caso 2.c consiste da soma de potências dos dois grupos.

Comparando o uso de apenas um conversor, com o uso de dois conversores, conclui-se que a utilização da técnica do uso de dois conversores apresenta um ganho de potência devido a essa diferença, de no caso 1.c o conversor analisar os oito painéis como apenas um e extrair uma potência que não é a máxima nominal. E no caso 2.c o MPPT extrair de uma curva a máxima nominal e da outra a máxima de operação, resultando na diferença mostrada na figura 4.28.

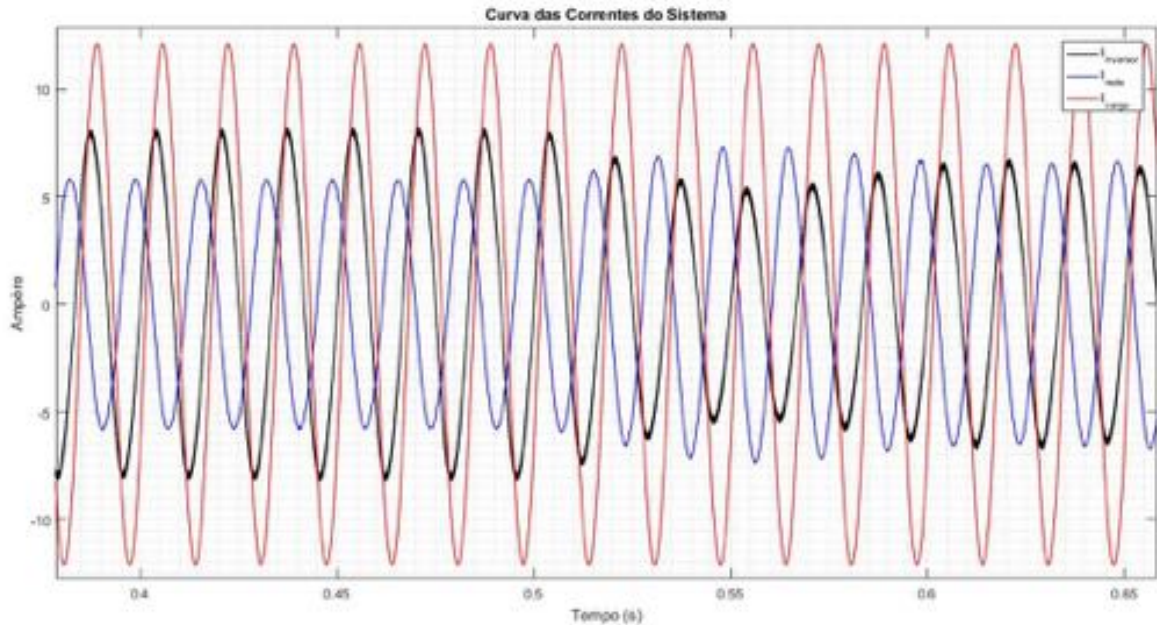
A diferença de potência entre os dois casos, pode parecer pequena inicialmente, entretanto, vale salientar que para este caso de estudo, foram utilizados poucos painéis fotovoltaicos para alimentar apenas uma carga, como, por exemplo, um ar-condicionado, mas para sistemas fotovoltaicos maiores o ganho de potência será maior.

Neste trabalho foi utilizado o mesmo conversor Boost CC-CC para ambos os casos em que se conectam os oito painéis em série na rede elétrica com um único conversor, e para o caso em que se fez uso de dois conversores para conectar, separadamente, os dois grupos de quatro painéis a rede elétrica. Porém, na prática, isso pode conduzir a um aumento de custo de implementação do sistema, desse modo, pode-se utilizar dois conversores Boost de menor potência, já que eles estão ligados a um menor número de painéis fotovoltaicos. Desse modo, caso seja feita uma análise de custo, conversores menores poderiam proporcionar custos menores ou até iguais ao uso de um único conversor grande, entretanto a análise de custos está fora do escopo deste trabalho.

### **4.3. Comportamento da rede elétrica**

Quando se tem uma fonte de energia fotovoltaica, a demanda local pode ser suprida, e, portanto, a fonte fotovoltaica desempenha um importante papel para o conjunto do sistema interligado. Como pode ser observado na Figura 4.29, para o sistema proposto neste trabalho com dois conversores Boost CC-CC, têm-se três curvas de corrente, a curva em vermelho representa a corrente da carga, a curva em azul representa a corrente da rede e a curva em preto representa a corrente do inversor.

Figura 4.29 - Impacto do Sombreamento Parcial na Rede Elétrica



Fonte: Da Autora.

Na figura 4.29, pode-se observar que a curva da carga se mantém igual durante todo o período de simulação. Pode-se observar que a curva de corrente do inversor tem amplitude maior que a curva de corrente da rede elétrica até o tempo de 0,5 segundos da simulação, significando que a concessionária de energia elétrica diminui a entrega de corrente elétrica, e consequentemente, de potência elétrica para o consumidor, pois as cargas estão sendo alimentadas através da energia fotovoltaica produzida. Entretanto, a partir dos 0,5 segundos de simulação ocorre o sombreamento parcial sobre os painéis fotovoltaicos, então, durante todo o período em que os painéis estão sombreados a rede elétrica precisa aumentar a quantidade de potência entregue para o consumidor, aumentando o nível de corrente elétrica na rede. Percebe-se, então, a importância do estudo do sombreamento dos módulos fotovoltaicos, pois, é necessário estudar maneiras de evitar que os níveis de produção de energia elétrica produzida através dos painéis fotovoltaicos caiam significativamente.

## 5. CONCLUSÃO

O uso da energia fotovoltaica se faz absolutamente necessária por ser uma fonte renovável. Os módulos podem ser instalados em espaços já existentes, como por exemplo, os telhados das casas, desse modo, o consumidor terá sua própria fonte de energia elétrica diminuindo o consumo da energia elétrica fornecida pela concessionária local. Devido ao alto investimento, é importante que o governo incentive a população, principalmente no que se diz respeito ao menor impacto para o meio ambiente.

O investimento do governo nas pesquisas e inovações tecnológicas na área de energia fotovoltaica é extremamente importante para todos. O desenvolvimento de tecnologias que gerem mais potência com o menor ou mesmo custo de uma tecnologia que gera menos potência, é realizado através de estudos e pesquisas tecnológicas.

O caso estudado neste trabalho em que o uso de dois conversores Boosts CC-CC no sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica produz mais potência que apenas o uso de um único conversor, é de extrema importância para a sociedade, e para todos os que pretendem ter sua própria geração fotovoltaica, pois dependendo do tamanho do sistema, pode-se obter um ganho considerado na geração de potência para os equipamentos.

O local de instalação dos módulos também é de grande importância. É necessário fazer o estudo da área quanto à incidência solar e ver qual a melhor posição. Entretanto, existem casos em que o sombreamento parcial é inevitável, devido à sombra de nuvens, galhos de árvores, por exemplo. Portanto, o uso de diodos *bypass*, como foi visto ao longo do trabalho, é de extrema importância para evitar que todo o sistema seja prejudicado devido ao sombreamento parcial de uma única célula fotovoltaica. Caso o diodo de *bypass* não esteja presente nas células diante de um sombreamento parcial, a corrente de uma célula sombreada limitará a corrente de saída de todo o conjunto fotovoltaico não sombreado.

Quanto ao sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, pôde-se observar que, caso o mesmo esteja submetido ao sombreamento, a distribuidora precisará aumentar o nível de corrente elétrica na rede para atender à demanda do cliente.

Foi constatado que o modelo implementado no SIMULINK<sup>®</sup> construído célula por célula através das equações apresentadas está coerente, pois apresenta as curvas características I-V e P-V correspondentes ao modelo equivalente comercial já existente no SIMULINK<sup>®</sup> (a partir da sua versão R2015a deste software), e também ao modelo simplificado que fora desenvolvido e utilizado para conexão com a rede elétrica.

Este trabalho abre perspectivas para estudos e avaliações de diferentes configurações de conversores CC-CC conectados aos painéis. De modo que, esses conversores estudados poderiam promover um maior aumento no ganho de potência, levando em conta a avaliação de custos na implementação destas novas configurações.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSAYID *et al.* **Partial shading of pv system simulation with experimental results.** *Smart Grid & Renewable Energy*, vol.4, pp. 429-435, 2013.

ATKINS & JONES. **Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente.** 5º Edição. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BRAGA, RENATA. **Energia solar fotovoltaica: Fundamentos e aplicações.** TCC. Rio de Janeiro: UFRJ, Novembro de 2008.

CARNEIRO, JOAQUIM. **Módulos fotovoltaicos características e associações.** Dissertação. Universidade do Minho, 2010.

COUTINHO, CARLOS. **O efeito do sombreamento e diodos de bypass em módulos fotovoltaicos.** Dissertação. São Mateus. UFES. 2016.

DRIEMEIER, LUÍS. **Geração Distribuída.** TCC. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

ISHAQUE *et al.* **Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model.** *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol.19, pp.1613-1626, 2011.

LOPES, RICARDO. **Efeito do Sombreamento nos Painéis Fotovoltaicos.** Dissertação. Lisboa: ISEL, Dezembro de 2013.

MASTERS, **Renewable and efficient electric power systems**, Stanford University. John Wiley & Sons. 2004.

MICHELS *et al.* **Influência da Temperatura sobre a Potência de saída de um Painel de Silício Policristalino na Região Oeste Paranaense.** *Congresso internacional sobre geração distribuída e energia no meio rural.* Fortaleza, vol.7, n. 34, 2008.

RAZAVI, BEHZAD. **Fundamental of Microelectronics.** 2º Edição. Wiley, 2009.

SAMER SAID *et al.* **A Matlab/Simulink based photovoltaic array model employing SimPowerSystems toolbox.** *Journal of Energy and Power Engineering*, vol.6, pp. 1965-1975, Dec. 2012.

SUMANTHI *et al.* **Solar PV and Wind Energy Conversion Systems.** 1ª Edição. Springer 2015.

USBERCO, JOÃO. **Química — volume único.** 7º Edição. São Paulo: Saraiva 2006