

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

CARLOS ROBERTO COUTINHO

**O EFEITO DO SOMBREAMENTO E DIODOS DE *BYPASS* EM  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

SÃO MATEUS

2016

CARLOS ROBERTO COUTINHO

**EFEITO DO SOMBREAMENTO E DIODOS DE BYPASS EM  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Energia.  
Orientador: Prof. Dr. José Rafael Cápua Proveti.  
Coorientador: Prof. Dr. Daniel José C. Coura.

SÃO MATEUS  
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES – BC, ES, Brasil)

---

C871e Coutinho, Carlos Roberto, 1980 -  
O efeito do sombreamento e diodos de bypass em módulos /  
Carlos Robert Coutinho. – 2016.  
102 f. : il.

Orientador: José Rafael Cápua Proveti.  
Coorientador: Daniel José Custódio Coura.  
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal  
do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Sombreamento. I.  
Proveti, José Rafael Cápua. II. Coura, Daniel José Custódio. III.  
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário  
Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

---

# O efeito do sombreamento e diodos de bypass em módulos fotovoltaicos

**Carlos Roberto Coutinho**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia, para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada: 29/06/2016.



Prof. Dr. José Rafael Cápuá Provetti  
CEUNES/UFES  
Orientador



Prof. Dr. Daniel José Custódio Coura  
CEUNES/UFES  
Coorientador



Prof. Dr. Eduardo Perini Muniz  
CEUNES/UFES  
Membro Interno



Prof. Dr. Pablo Rodrigues Muniz  
IFES  
Membro Externo

*Dedico esse trabalho aos meus pais, irmãos, à minha esposa Josely e aos meus filhos Gustavo e Ana Luiza.*

# **Agradecimentos**

Meus sinceros agradecimentos:

Ao Gustavo e a Ana Luiza, meus filhos, que me encorajam sempre, e nunca deixaram de mostrar seu carinho por mim, mesmo nos dias mais difíceis.

A minha esposa Josely, que mesmo com todas as dificuldades, me apoia e me incentiva a continuar.

Aos meus pais, Carlos Alberto e Zélia, que me deram a vida e nunca mediram esforços para construir a base sólida que me fez alcançar este resultado.

Aos meus irmãos Carlos Eduardo e Carlos Alberto, por sempre acreditarem em mim.

Aos professores orientadores, Dr. José Rafael Cápua Proveti e Dr. Daniel José C. Coura.

Aos amigos do IFES pela sua contribuição, com as ideias e apoio incondicional.

A todos que de forma direta ou indireta me ajudaram a desenvolver e concluir este trabalho.

*“Cem vezes todos os dias lembro a mim mesmo que minha vida interior e exterior depende dos trabalhos de outros homens, vivos ou mortos, e que devo esforçar-me a fim de devolver na mesma medida que recebi.”*

(Albert Einstein)

## Resumo

O presente trabalho aborda os efeitos provocados em sistemas de microgeração devido ao sombreamento de módulos fotovoltaicos. Embora os sistemas fotovoltaicos sejam uma alternativa na geração de eletricidade, devem-se levar em consideração as interferências provocadas por estruturas próximas à instalação. Essas estruturas podem provocar regiões de sombra, que afetam o rendimento do sistema fotovoltaico. A forma como as células fotovoltaicas são interligadas propicia o mau funcionamento de parte considerável dos módulos fotovoltaicos, reduzindo assim a potência gerada pelo sistema, mesmo sob o sombreamento de poucas células. Através de um circuito eletrônico que varia a carga aplicada ao módulo fotovoltaico, e a coleta de dados como tensão e corrente elétrica, são traçadas as curvas características de módulos fotovoltaicos, sob diferentes níveis de sombreamento. Essas curvas são utilizadas na comparação entre os diferentes níveis de potência fornecida, e na verificação dos efeitos provocados pelo sombreamento, e, como os diodos de *bypass* podem amenizar esses efeitos. Ao final, através de um módulo fotovoltaico que possui duas possíveis configurações nas ligações dos diodos de *bypass*, compara-se seu funcionamento sob sombreamento, em ambas as configurações.

**Palavras-chave:** Módulo fotovoltaico, sombreamento, célula fotovoltaica.



## **Abstract**

This paper discusses the effects caused in the microgeneration systems due to shading of photovoltaic modules. Although the photovoltaic systems are an alternative for electricity generation, must noted the interference caused by the installation nearby structures. These structures can cause shadow regions, affecting the yield of the photovoltaic system. The mode how the solar cells are interconnected can generate malfunction of some photovoltaic modules, thus reducing the power generated by the system, even with few cells shaded. Through an electronic circuit that varies the load applied in the photovoltaic module and collects data, as voltage and electric current, the characteristic curves of photovoltaic modules with different levels of shading are drawn. These curves are used in the comparison among the different levels, in the verification of the effects caused by shading, and how bypass diodes can mitigate these effects. At the end, through a photovoltaic module having two possible configurations for the connection of bypass diodes, this study analyzes the system under a shading condition, using both configurations.

**Key words:** Photovoltaic module, shading, photovoltaic cell.

## Lista de Ilustrações

Figura 1 - Matriz de geração energética brasileira .....	17
Figura 2- Unidade de Microgeração Fotovoltaica .....	21
Figura 3 - Exemplo de uma unidade de Microgeração Fotovoltaica .....	22
Figura 4 - Telhado de uma residência com sombreamento provocado por edifício vizinho ...	23
Figura 5 - Telhado de um supermercado com sombreamento provocado por edifício vizinho	23
Figura 6 - Antenas e estruturas instaladas próximas aos painéis, implicando em sombreamento parcial .....	24
Figura 7 - Dispositivo montado por Lenard .....	27
Figura 8 - Espectro eletromagnético da luz .....	28
Figura 9 - Materiais do tipo $n$ (a), e tipo $p$ (b) .....	30
Figura 10 - Junção $p-n$ .....	31
Figura 11 - Constituição de uma célula fotovoltaica .....	31
Figura 12 - Circuito elétrico de uma célula fotovoltaica ideal. ....	32
Figura 13 - Corrente em função da tensão, para diferentes intensidades de luz .....	34
Figura 14 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica .....	35
Figura 15 - Estrutura de um módulo fotovoltaico .....	36
Figura 16 - Estrutura de um módulo fotovoltaico com 36 células ligadas em série .....	37
Figura 17 - Curvas $I-V$ e $P-V$ de um módulo fotovoltaico .....	39
Figura 18 - Efeito da temperatura nos módulos fotovoltaicos .....	40
Figura 19 - Efeito da radiação nos módulos fotovoltaicos .....	40
Figura 20 - Conjunto de células fotovoltaicas sob iluminação .....	44
Figura 21 - Conjunto de células fotovoltaicas, com uma célula sombreada .....	44
Figura 22 - Esquema de funcionamento do diodo de <i>bypass</i> .....	46
Figura 23 - Ligação de diodos de <i>bypass</i> em módulos fotovoltaicos .....	47
Figura 24 - Curvas $I-V$ e $P-V$ .....	49
Figura 25 - Diagrama de blocos do circuito proposto .....	51
Figura 26 - Algoritmo da rotina utilizada no Matlab® .....	52
Figura 27 - Sistema de aquisição de dados .....	53
Figura 28 - Esquema de ligação das células do módulo Kyocera .....	54
Figura 29 - Testes em módulos fotovoltaicos sem sombreamento .....	55
Figura 30 - Esquema de ligação das células do módulo Kyocera KD135SX-UPU, com uma célula sombreada .....	55

Figura 31 - Testes em módulo fotovoltaico com uma célula totalmente sombreada .....	56
Figura 32 - Esquema de ligação das células do módulo Kyocera KD135SX-UPU, com duas células sombreadas.....	57
Figura 33 - Testes em módulo fotovoltaico com duas células sombreadas, afetando os dois arranjos série (sombreamento difuso) .....	57
Figura 34 - Testes em módulo fotovoltaico com duas células sombreadas, afetando os dois arranjos série (sombreamento opaco) .....	58
Figura 35 - Testes em módulo fotovoltaico com sombreamento parcial .....	59
Figura 36 - Medição da irradiância durante os testes .....	60
Figura 37 - Montagem do Painel Fotovoltaico .....	61
Figura 38 - Placa de relés e diodos .....	62
Figura 39 - Interligação dos diodos de <i>bypass</i> com as células .....	63
Figura 40 - Diagrama do módulo fotovoltaico montado com um diodo por célula .....	64
Figura 41 - Testes realizados com o painel montado, sem sombreamento (a), uma célula sombreada (b), duas células sombreadas (c), e três células sombreadas (d) .....	65
Figura 42 - Diagrama do módulo fotovoltaico montado com um diodo para cada três células .....	65
Figura 43 - Testes realizados com o painel montado, uma célula sombreada (a), duas células sombreadas (b), três células sombreadas (c), e quatro células sombreadas (d).....	66
Figura 44 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 1 sem sombreamento.....	68
Figura 45 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 1 com sombreamento em uma célula.....	69
Figura 46 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 1 com sombreamento em duas células .....	70
Figura 47 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 1 com sombreamento parcial de 50 % em uma célula	71
Figura 48 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 2 sem sombreamento.....	72
Figura 49 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 2 com sombreamento em uma célula.....	73
Figura 50 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 2 com sombreamento em duas células .....	74
Figura 51 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 2 com sombreamento parcial de 50 % em uma célula	75
Figura 52 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 1 com sombreamento opaco em duas células.....	77
Figura 53 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo 2 com sombreamento opaco em duas células. ....	77
Figura 54 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo montado, sem diodos de <i>bypass</i> , com sombreamento em uma célula .....	78
Figura 55 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo montado sem sombreamento .....	79
Figura 56 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo montado com sombreamento em uma célula .....	80
Figura 57 - Curvas <i>I-V</i> e <i>P-V</i> , módulo montado com sombreamento em duas células .....	81

Figura 58 - Curvas $I-V$ e $P-V$ , módulo montado com sombreamento em três células .....	82
Figura 59 - Curvas $I-V$ e $P-V$ , módulo montado com três células por diodo, sem sombreamento.....	84
Figura 60 - Curvas $I-V$ e $P-V$ , módulo montado com três células por diodo, e sombreamento em uma célula.....	85
Figura 61 - Curvas $I-V$ e $P-V$ , módulo montado com três células por diodo, e sombreamento em duas células .....	86
Figura 62 - Curvas $I-V$ e $P-V$ , módulo montado com três células por diodo, e sombreamento em três células .....	87
Figura 63 - Curvas $I-V$ e $P-V$ , módulo montado com três células por diodo, e sombreamento em quatro células .....	88

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resumo dos resultados do módulo 1.....	76
Tabela 2 - Resumo dos resultados do módulo 2.....	76
Tabela 3 - Resumo dos resultados do módulo montado com um diodo por célula. ....	83
Tabela 4 - Resumo dos resultados do módulo montado com um diodo para cada três células. .....	88
Tabela 5 - Comparação na redução da máxima potência para as duas configurações testadas. .....	90

# Nomenclatura

## Símbolos

---

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$e$	Carga elementar do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$ )	C
$E$	Energia	J
$E_c$	Energia cinética	J
$f$	Frequência	Hz
$f_c$	Frequência de corte	Hz
$h$	Constante de Planck ( $6,6262 \times 10^{-34}$ )	Js
$I_o$	Intensidade de radiação absorvida	J/m <sup>2</sup>
$I$	Corrente Elétrica	A
$I_s$	Corrente de saturação do diodo	A
$I_e$	Corrente de escuro	A
$I_L$	Corrente fotogerada (produzida por fótons)	A
$I_p$	Corrente paralelo de uma célula fotovoltaica	A
$I_s$	Corrente série de uma célula fotovoltaica	A
$I_s$	Corrente de escuro	A
$k$	Constante de Boltzmann ( $1,380\ 6505\ 10^{-23}$ )	J/K
$m$	Fator de idealidade do diodo ( $1 \leq m \leq 2$ )	-
$\eta$	Eficiência quântica	-
$P$	Potência Elétrica	W
$R_p$	Resistência paralelo de uma célula fotovoltaica	$\Omega$
$R_s$	Resistência série de uma célula fotovoltaica	$\Omega$
$t$	Tempo	s
$T$	Temperatura	°C
$V$	Tensão Elétrica	V
$V_c$	Potencial de corte	V
$\Delta I$	Variação da corrente para potência máxima	%
$\Delta P$	Variação da potência máxima	%
$\Delta V$	Variação da tensão para potência máxima	%

---

## Outros símbolos

### Siglas

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
BJT	<i>Transistor de Junção Bipolar (Bipolar Junction Transistor)</i>
Bo	<i>Boro (elemento químico)</i>
IGBT	<i>Transistor Bipolar de Porta Isolada (Insulated Gate Bipolar Transistor)</i>
I-V	<i>Curva Corrente versus Tensão</i>
MPP	<i>Ponto de Máxima Potência (Maximum Power Point)</i>
MPPT	<i>Rastreador do Ponto de Máxima Potência (Maximum Power Point Tracking)</i>
P-V	<i>Curva Potência versus Tensão</i>
PWM	<i>Modulação por Largura de Pulsos (Pulse-Width Modulation)</i>
Sb	<i>Antimônio (elemento químico)</i>
Si	<i>Silício (elemento químico)</i>

# Sumário

Capítulo 1: Introdução .....	17
1.1 Matriz de Energia Elétrica Brasileira.....	17
1.2 Microgeração Fotovoltaica Residencial.....	20
1.3 Problema .....	22
1.4 Objetivo.....	24
1.5 Contribuições e Organização do Trabalho .....	25
Capítulo 2: Sistemas Fotovoltaicos.....	26
2.1 Efeito Fotoelétrico .....	26
2.2 Células Fotovoltaicas.....	29
2.3 Módulos Fotovoltaicos .....	35
2.4 Estado da Arte .....	41
Capítulo 3: Sombreamento em Módulos Fotovoltaicos.....	43
3.1 Efeitos do Sombreamento .....	43
3.2 Diodos de <i>Bypass</i> .....	45
Capítulo 4: Metodologia .....	48
4.1 Sistema de coleta de dados.....	48
4.2 Estudo do impacto do sombreamento em módulos fotovoltaicos .....	53
4.3 Estudo do impacto dos diodos de <i>bypass</i> em módulos fotovoltaicos.....	60
4.3.1 Módulo na configuração de um diodo de <i>bypass</i> para cada célula.....	63
4.3.2 Módulo na configuração de um diodo de <i>bypass</i> para cada conjunto de três células .....	65
Capítulo 5: Resultados .....	67
5.1 Impacto do Sombreamento sobre Módulos Comerciais .....	67
5.2 Impactos do Sombreamento sobre o Módulo Montado.....	78
5.2.1 Módulo com um diodo para cada célula .....	78



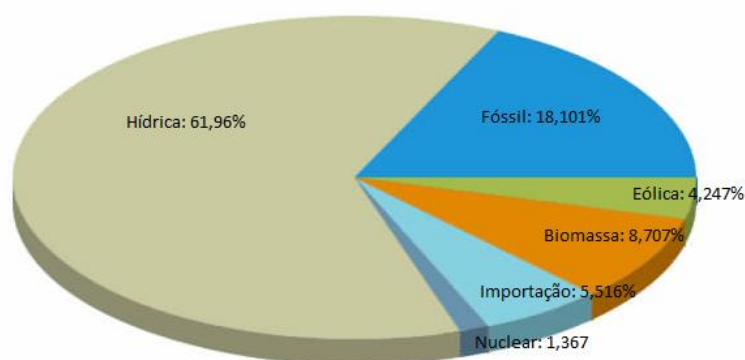
5.2.2 Módulo com um diodo para cada conjunto de três células .....	83
Capítulo 6: Considerações Finais e Trabalhos Futuros.....	89
6.1 Considerações Finais .....	89
6.1.1 Trabalhos Publicados .....	91
6.2 Trabalhos futuros.....	91
Referências Bibliográficas .....	93
APÊNDICE A – Programa Arduíno para Interface com o Matlab .....	96
APÊNDICE B – Rotina Matlab para Controle do Sistema de Dados.....	102

## Capítulo 1: Introdução

### 1.1 Matriz de Energia Elétrica Brasileira

O crescente e desenfreado consumo de energia elétrica no mundo vem suscitando preocupações de como será a geração de energia elétrica no futuro. Aliado a preocupações ambientais, as formas de geração tradicionais vêm sendo substituídas por meios alternativos, com maior eficiência e menor impacto ao meio ambiente. No Brasil, a atual matriz de geração de energia elétrica baseia-se principalmente na hidrogeração (cerca de 62 %) e na termogeração através de combustíveis fósseis (pouco mais de 18 %). A produção de energia elétrica através da energia solar, que é o foco deste trabalho, aparece com um percentual praticamente insignificante (cerca de 0,0077 %) representando pouco mais de 11MW. A Figura 1 mostra como está dividida esta matriz de geração de energia elétrica (ANEEL, 2015a).

Figura 1 - Matriz de geração energética brasileira



Fonte: adaptado de (ANEEL, 2015a).

Embora o Brasil seja um país onde os recursos hídricos são abundantes, aproveitar este recurso natural na geração de energia causa enormes impactos aos ecossistemas das áreas alagadas para formação de reservatórios, e os períodos de estiagem podem provocar uma redução considerável na capacidade de geração, impactando no fornecimento de energia

elétrica. Entre os anos de 2001 e 2002, a falta de chuvas, combinada com a falta de investimentos no setor energético, acarretou em um sistema de racionamento devido à baixa quantidade de energia elétrica gerada pelas usinas hidroelétricas (ANEEL, 2007).

No ano de 2015 foi implantado no setor elétrico brasileiro o sistema de Bandeiras Tarifárias, que, em função das condições de geração de eletricidade, altera o custo da energia elétrica. O custo da geração está relacionado ao tipo de usina em operação. Quanto maior o número de termelétricas acionadas, maior será o custo de geração. A cada mês, as condições de operação do sistema (principalmente a demanda e o nível de reservatórios) são reavaliadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, que decide sobre o acionamento ou não das termelétricas (ANEEL, 2015b).

As usinas termelétricas em funcionamento no Brasil se utilizam, principalmente, de combustíveis fósseis: carvão mineral, gás e petróleo (ANEEL, 2015a). Essa forma de geração é mais onerosa, devido ao fato desses compostos minerais serem encontrados na natureza em sua forma bruta, necessitando de passar por processos de beneficiamento. Outro fator negativo é o grande impacto à natureza devido à emissão de dióxido de carbono na atmosfera, e ainda, que são considerados recursos finitos. Apesar de não se ter um número exato sobre as atuais reservas minerais, apenas estimativas, estes recursos ficam cada vez mais escassos (MARUJO; SIMÕES; ESTANQUEIRO, 2010).

“A limitação existente de recursos torna urgente a adoção de estratégias adequadas nas matérias-primas e energia, a fim de evitar um cenário de emergência econômico e social, que, na ausência de estratégias adequadas, chegará mais cedo ou mais tarde.”  
(MANGAS, 2009).

Outro problema na geração de energia elétrica são as grandes distâncias entre os centros de geração e os de consumo, provocando perdas ao longo das linhas alimentadoras. Para diminuir estas perdas, os materiais utilizados na transmissão e a distribuição da energia elétrica geram altos custos tanto na sua implantação quanto em sua manutenção, e além do custo, o impacto ambiental também é inevitável (MARUJO; SIMÕES; ESTANQUEIRO, 2010).

Diante do impacto natural causado pelas usinas hidro e termelétricas, e a possibilidade de esgotamento dos recursos, a busca por fontes alternativas é cada vez maior. Produzir energia elétrica através da força dos ventos, por exemplo, já corresponde a aproximadamente 4 % da matriz de geração nacional, que equivalem a uma capacidade de produção instalada de aproximadamente 8,6 GW (ANEEL, 2015a). Outro tipo de energia que também pode ser aproveitada na produção de energia elétrica é a proveniente do sol.

A energia solar pode ser aproveitada para a produção de energia elétrica em uma residência através de dois sistemas distintos: o *off-grid* e o *on-grid*. Locais remotos como, por exemplo, tribos indígenas, propriedades rurais e assentamentos, onde é praticamente inviável o fornecimento convencional de energia elétrica, são atendidos através de painéis solares interligados a acumuladores de carga. Este tipo de geração é chamado de *off-grid*, devido estar desconectado, ou isolado do sistema de distribuição das concessionárias de energia elétrica (MOREIRA, 2012).

O sistema *on-grid* é aquele em que a unidade geradora está ligada ao sistema de geração, possibilitando assim que nos períodos em que não há energia solar a unidade utilize a energia proveniente da rede de distribuição, dispensando a utilização de acumuladores de carga (MOREIRA, 2012). Além de ser considerada limpa, outra grande vantagem de utilizar a energia fotovoltaica, é o fato da geração estar próxima aos centros de carga, dispensando ou reduzindo as linhas de transmissão e distribuição.

“A produção descentralizada de eletricidade por meio de fontes renováveis permite, além da preservação dos recursos naturais, segurança energética e fornecimento sem impactos ao meio ambiente.” (MARUJO; SIMÕES; ESTANQUEIRO, 2010)

Diante da realidade da matriz de geração de energia elétrica brasileira, a Microgeração Fotovoltaica Residencial se torna uma possibilidade para a diversificação da matriz de geração de energia elétrica.

## 1.2 Microgeração Fotovoltaica Residencial

Preocupada com melhores condições para o desenvolvimento sustentável do setor elétrico brasileiro, bem como o aproveitamento adequado dos recursos naturais e utilização eficiente das redes elétricas, a ANEEL aprovou em abril de 2012 a resolução normativa número 482, que estabelecia as condições de acesso à micro e minigeração de energia elétrica (ANEEL, 2012). Em novembro do ano de 2015 é aprovada a resolução 687, passando a vigorar a partir de março de 2016, onde, além de redefinir alguns parâmetros de geração, ratifica a micro e minigeração (ANEEL, 2016). Com estas resoluções, qualquer consumidor do sistema elétrico, além de comprar, pode gerar parte ou toda energia elétrica que consome, e ainda fornecer o excedente para a concessionária sendo compensado por isso. Este tipo de geração, também chamada de geração distribuída, apresenta como grande vantagem o fato de a carga estar mais próxima, ou dentro da unidade geradora, reduzindo as perdas e possibilitando melhor qualidade no serviço. Segundo Moreira (MOREIRA, 2012):

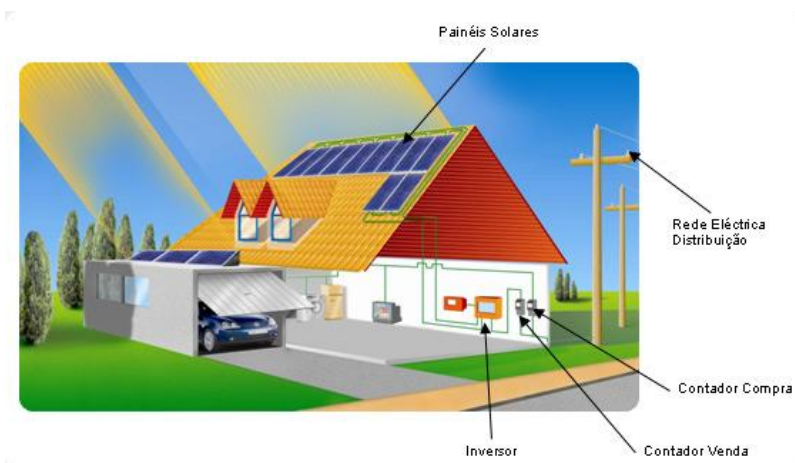
“O conceito de microgeração tem sido objeto de estudo por vários autores, tendo sido definida como sendo a produção de calor ou energia em pequena escala quando comparada com as centrais termoelétricas típicas, normalmente variando de alguns kW até algumas dezenas de MW”.

A diferença básica entre microgeração e minigeração, segundo a resolução normativa 687 da ANEEL, é a potência que cada central pode produzir, menor ou igual a 75 kW e de 75 kW a 5 MW respectivamente. Este tipo de geração já é amplamente utilizado em países europeus, como Alemanha e Espanha, porém, no Brasil ainda caminha a passos curtos.

A Figura 2 ilustra um exemplo de uma unidade de microgeração fotovoltaica residencial. Nessa unidade de microgeração, a energia elétrica pode ser gerada pela energia solar, por meio de módulos fotovoltaicos. Essa energia gerada é interligada a um inversor de frequência, convertendo-a de contínua para alternada, para que possa alimentar as cargas instaladas na residência. Caso a potência demandada nesta instalação seja menor que a consumida, este excedente pode ser cedido à concessionária, ficando o consumidor com os

créditos da energia fornecida. Nos períodos em que a geração não consegue suprir a potência demandada, a instalação se utiliza da energia da rede de distribuição e é compensada pelos períodos em que forneceu. Nesta instalação se faz necessário ainda um medidor capaz de contabilizar a quantidade de energia fornecida e a consumida, para que ocorra uma compensação àquela que mais forneceu energia, a concessionária ou residência (MOREIRA, 2012).

Figura 2- Unidade de Microgeração Fotovoltaica



Fonte: (BOAS ENERGIAS, 2015).

Vislumbrando uma forma de gerar energia de maneira limpa e sustentável e, ainda, diminuir os custos domiciliares devido aos constantes aumentos nas tarifas de energia elétrica, os consumidores estão cada vez mais interessados em transformar suas residências em uma unidade de micro, ou até mesmo minigeração através da conversão da energia solar em energia elétrica. A Figura 3 exemplifica a instalação de um sistema de microgeração fotovoltaica no pavimento de um edifício, onde a energia elétrica produzida pode ser utilizada, por exemplo, para a alimentação de circuitos elétricos da área comum.

Figura 3 - Exemplo de uma unidade de Microgeração Fotovoltaica



Fonte: produção do próprio autor.

### 1.3 Problema

Um grande problema encontrado na produção de energia através da radiação solar é, que devido às construções ao entorno da unidade de consumo, o período em que os painéis ficam expostos à radiação solar pode se tornar menor. Edifícios, torres de comunicação e outras estruturas acabam interferindo na captação de radiação, provocando áreas de sombra no equipamento fotovoltaico. As Figuras 4, 5 e 6 mostram algumas situações de sombreamento.

Figura 4 - Telhado de uma residência com sombreamento provocado por edifício vizinho



Fonte: produção do próprio autor.

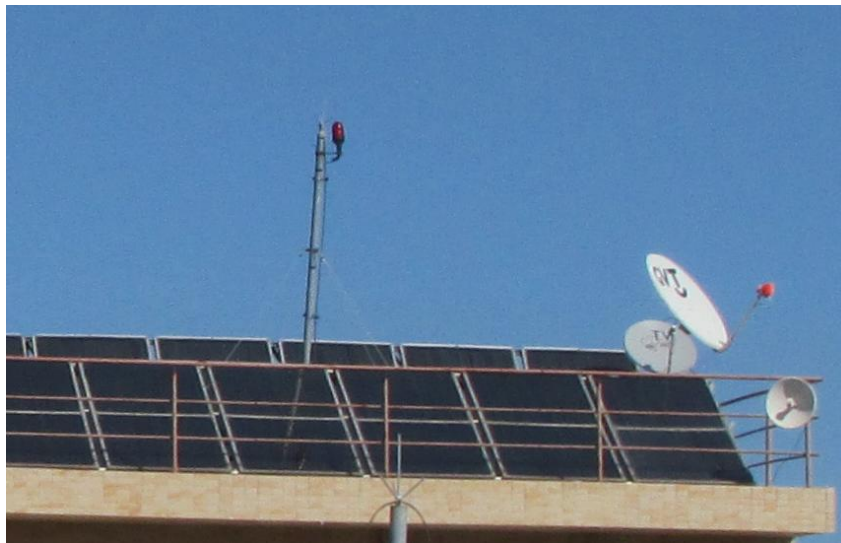
Figura 5 - Telhado de um supermercado com sombreamento provocado por edifício vizinho



Fonte: produção do próprio autor.



Figura 6 - Antenas e estruturas instaladas próximas aos painéis, implicando em sombreamento parcial



Fonte: produção do próprio autor.

No caso das Figuras 4 e 5, a sombra provocada pela estrutura vizinha pode interromper totalmente a captação de radiação solar em um painel ali instalado. Esse tipo de sombreamento, chamado de Sombreamento Total (PATEL, 2006), faz com que este painel deixe de fornecer energia à carga, e, dependendo do arranjo montado, pode interferir em todo o sistema de geração fotovoltaica. A Figura 6 ilustra um caso de Sombreamento Parcial (PATEL, 2006), onde a sombra sobre algumas células pode fazer com que o painel deixe de fornecer energia.

Uma maneira de minimizar as perdas nos painéis fotovoltaicos por sombreamento é a utilização de diodos de *bypass*. Estes dispositivos tem a função de isolar as células ou painéis afetados pelo sombreamento, impedindo que todo o sistema de geração de energia seja afetado (ZHENG et al., 2014).

## 1.4 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos do sombreamento em painéis fotovoltaicos e sua minimização através dos diodos de *bypass*. O estudo se baseia na

comparação entre diferentes arranjos fotovoltaicos e suas respectivas capacidades de geração de energia sob sombreamento parcial e/ou total.

Além dos efeitos e sua minimização, o trabalho verifica a viabilidade de novas configurações de painéis a serem utilizados em regiões onde há uma grande interferência por sombreamento.

## **1.5 Contribuições e Organização do Trabalho**

A principal contribuição do presente trabalho reside na demonstração dos principais efeitos do sombreamento em módulos fotovoltaicos, para que esses resultados possam ser utilizados no desenvolvimento de novas técnicas na amenização dos efeitos. Os sistemas utilizados no estudo foram construídos pelo autor, contribuindo, dessa forma, com o desenvolvimento de tecnologia nacional na área de energia solar.

O trabalho está organizado da seguinte forma: No capítulo 1 é feita uma contextualização envolvendo a situação da matriz energética brasileira, as possibilidades através da microgeração residencial e abordagem ao problema de sombreamento em centros urbanos. O capítulo 2 descreve o Estado da Arte, onde são revisadas as principais teorias envolvidas no trabalho. A base teórica sobre os efeitos do sombreamento em módulos fotovoltaicos e uma forma de amenizar estes efeitos, através dos diodos de *bypass*, são abordadas no capítulo 3. A metodologia utilizada na coleta e a análise dos dados é apresentada no capítulo 4. No capítulo 5 são apresentados os principais resultados alcançados. Por fim, o capítulo 6 trata das conclusões, considerações finais e trabalhos futuros.

## **Capítulo 2: Sistemas Fotovoltaicos**

Este capítulo apresenta uma breve revisão de alguns trabalhos relacionados a Sistemas Fotovoltaicos e os dispositivos envolvidos, tendo em vista que são as principais ferramentas para atingir o objetivo desta dissertação. Uma maior ênfase é dada aos seguintes assuntos:

- Efeito Fotoelétrico;
- Células Fotovoltaicas;
- Módulos Fotovoltaicos.

### **2.1 Efeito Fotoelétrico**

O desenvolvimento sustentável pode ser amplamente definido como viver, produzir e consumir atendendo às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades (MANGAS, 2009). Segundo (MOREIRA, 2012), o sol é um recurso com elevado potencial energético e o seu aproveitamento, é hoje, sem sombra para dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras.

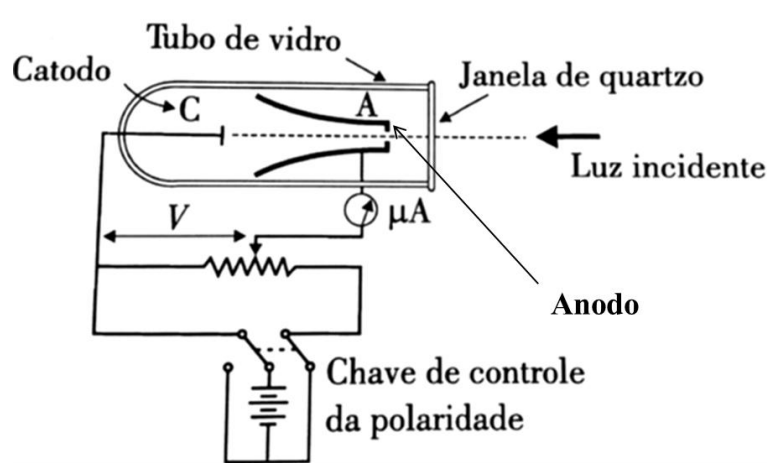
A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. O calor é responsável pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, em condições específicas; enquanto a luz, através dos fótons, é convertida em energia elétrica por meio do uso de células solares (ANEEL, 2005).

A conversão da energia solar em energia elétrica é possível através de uma junção semicondutora, devido ao fenômeno de Efeito Fotoelétrico e ocorre dentro de um dispositivo chamado célula fotovoltaica (GASPARIN, 2009). Segundo Hecktheuer (HECKTHEUER, 2001), o efeito fotovoltaico é um fenômeno que ocorre nas junções de materiais semicondutores, quando expostos à luz, originando uma corrente elétrica quando os dois lados da junção forem interligados por um condutor.

Observado inicialmente por Heinrich Hertz, no ano de 1887 em uma de suas experiências (YOUNG; FREEDMAN, 2009), verificou-se que descarga elétrica entre dois catodos ocorria de maneira mais fácil quando iluminados com luz ultravioleta (RESENDE, 2004). Mais tarde, o fenômeno foi melhor estudado por Phillip Lenard, no ano de 1902, e por Robert Andrews Millikan entre os anos de 1906 e 1916 (CARUSO; OGURI, 2006).

Para sua experiência, Lenard construiu um aparato formado por duas placas metálicas sob uma diferença de potencial, dentro de uma ampola de vidro sob vácuo (SANT'ANNA et al., 2010). A Figura 7 demonstra o dispositivo montado por Lenard em seus estudos.

Figura 7 - Dispositivo montado por Lenard



Fonte: (RESENDE, 2004).

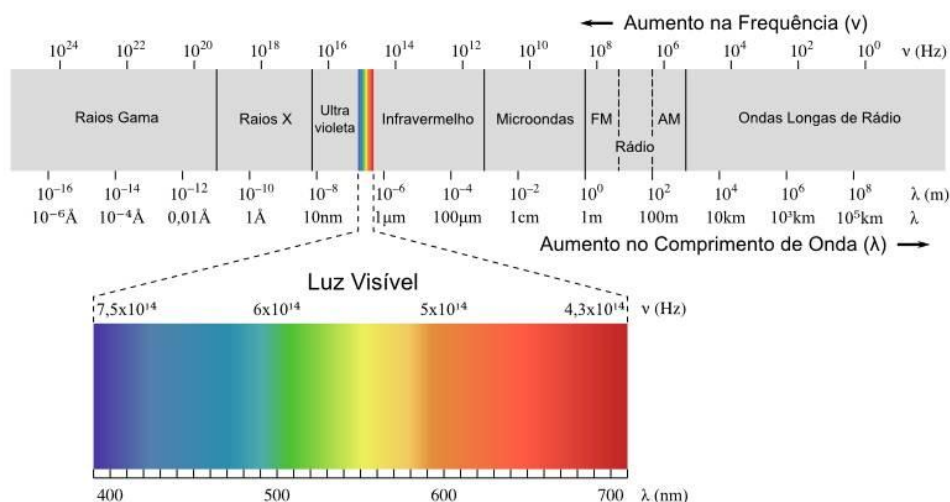
Segundo Caruso (CARUSO; OGURI, 2006) as principais conclusões levantadas por Lenard, em seu experimento foram:

- a ocorrência da emissão de elétrons não depende da intensidade da luz, e sim de sua frequência;
- havendo emissão, a corrente é proporcional à intensidade da luz, sob frequência e diferença de potencial constantes;
- o efeito depende do material;
- a energia cinética dos elétrons e o potencial de corte crescem com a frequência da luz;
- para uma determinada frequência, o potencial de corte independe da intensidade da luz.

O potencial de corte ( $V_c$ ) descrito por Caruso (CARUSO; OGURI, 2006) é a tensão mínima que deve ser aplicada às placas metálicas, no caso da Figura 7, representada pela diferença de potencial  $V$ .

Devido a sua natureza ondulatória a luz possui uma frequência, que está associada à sua cor (YOUNG; FREEDMAN, 2009). A Figura 8 descreve a frequência, em hertz, para as respectivas cores.

Figura 8 - Espectro eletromagnético da luz



Fonte: (VIEIRA, 2015).

Os resultados obtidos por Lenard não puderam ser explicados pela física clássica, uma vez que para o completo entendimento deste fenômeno deve-se levar em consideração não apenas a natureza ondulatória da luz, mas também a corpuscular. Segundo Young (YOUNG; FREEDMAN, 2009), a propagação da luz pode ser descrita melhor usando um modelo ondulatório, enquanto que para entender sua absorção, se deve considerar sua natureza corpuscular.

A energia da radiação eletromagnética é quantizada na forma de pacotes, chamados fótons (RESENDE, 2004). Esse modelo quântico, proposto por Albert Einstein, no ano de 1905 (TIPLER; MOSCA, 2009), é de extrema importância no entendimento do efeito fotoelétrico. Segundo Einstein, ao penetrar a superfície do material, o fóton interage com um elétron, transmitindo-lhe sua energia ( $E$ ), que pode ser quantizada pelo produto entre a constante de Planck ( $h$ ) e a frequência da luz incidente ( $f$ ) (CARUSO; OGURI, 2006), conforme mostra a Equação 1.

$$E = hf \tag{1}$$

Para que o elétron consiga abandonar a superfície do metal, ele necessita de uma quantidade de energia, chamada de função trabalho ( $\phi$ ) (TIPLER; LLEWELLYN, 2012). Quando a energia fornecida pelo fóton é maior que a função trabalho, o elétron consegue escapar da superfície metálica, e adquire energia cinética. Tal fato pode ser explicado pela conservação de energia na interação elétron-fóton, uma vez que o fóton pode ser considerado

uma partícula (RESENDE, 2004). A energia cinética adquirida pelo elétron ( $E_C$ ) é a diferença entre a energia fornecida pelo fóton ( $hf$ ) e a função trabalho ( $\phi$ ), como mostra a Equação 2.

$$E_C = hf - \phi \quad (2)$$

Considerando que o potencial elétrico é a energia potencial por unidade de carga (TIPLER; LLEWELLYN, 2012), através da Equação 2, chega-se a uma relação para o potencial de corte ( $V_C$ ), conforme mostra a Equação 3.

$$V_C = \frac{h}{e} (f - f_c) \quad (3)$$

Observando a Equação 3, se pode afirmar que um aumento no número de fótons incidente sobre o material aumentará a quantidade de elétrons emitidos, uma vez que a energia de cada fóton é cedida para um elétron. Assim, a corrente elétrica aumenta, porém a energia cinética de cada elétron não (CARUSO; OGURI, 2006).

Outra observação é em relação à frequência de corte ( $f_c$ ). A energia do fóton deve ser maior que a função trabalho para que o elétron possa adquirir energia cinética e se desprender da superfície metálica (RESENDE, 2004) como mostra a Equação 4.

$$hf > \phi \quad (4)$$

Pode-se escrever um valor mínimo da frequência de corte em relação à função trabalho e à constante de Planck, conforme a Equação 5 (RESENDE, 2004).

$$f_c > \frac{\phi}{h} \quad (5)$$

Desta forma Einstein consegue explicar as observações em relação ao efeito fotoelétrico, quanto ao tipo de luz, ao metal utilizado e à intensidade de luz.

O efeito fotoelétrico é base para o desenvolvimento de diversos componentes de dispositivos, tais como os fotodetectores, que transformam sinais luminosos em sinais elétricos, e são amplamente utilizados em equipamentos eletrônicos (RESENDE, 2004). Outra aplicação do efeito fotoelétrico é a conversão de energia luminosa em energia elétrica, através das células solares, que será tratada na próxima seção.

## 2.2 Células Fotovoltaicas

O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar. É por meio da célula fotovoltaica, formada de material semicondutor, que há a conversão da energia solar em energia elétrica. Os semicondutores que geram maior produto corrente-tensão para a luz visível são os mais sensíveis, sendo os utilizados para isso os de

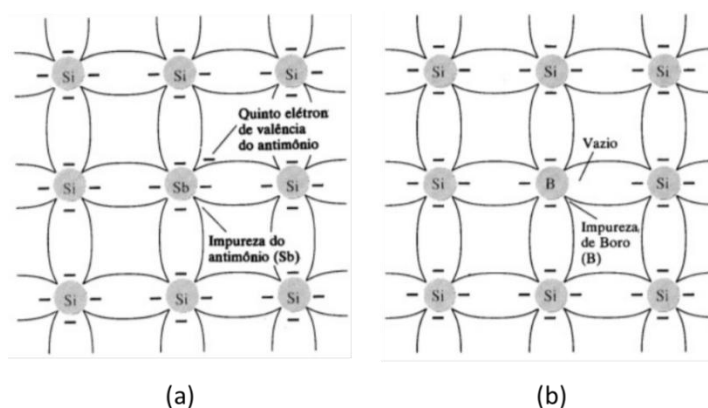
silício, selênio, dentre outros. O silício é o mais utilizado devido à sua maior abundância na crosta terrestre (GASPARIN, 2009).

Segundo Resende (RESENDE, 2004), a célula fotovoltaica é um fotodiodo com uma grande área de exposição à radiação, e sua operação se dá em condições de fornecer energia a uma carga. O fotodiodo é um dispositivo semiconductor de junção  $p-n$ , cuja operação é limitada à condição reversa (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004). Em um fotodiodo, um sinal elétrico é produzido pela geração de pares elétron-buraco, causada por absorção de fótons nas imediações da região de depleção de uma junção  $p-n$  (RESENDE, 2004).

Segundo Boylestad (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004) a junção  $p-n$  é a região formada pela junção de dois tipos de materiais semicondutores:

- tipo  $n$ , semicondutores dopados com átomos pentavalentes, onde há maior concentração de elétrons livres. A Figura 9 (a) representa um cristal de Silício (Si) dopado com um átomo de Antimônio (Sb), formando um material do tipo  $n$ ;
- tipo  $p$ , semicondutores dopados com átomos trivalentes, onde há maior concentração de lacunas (falta de elétrons no átomo). Figura 9 (b) representa um cristal de Silício (Si) dopado com um átomo de Boro (Bo), formando um material do tipo  $p$ .

Figura 9 - Materiais do tipo  $n$  (a), e tipo  $p$  (b)

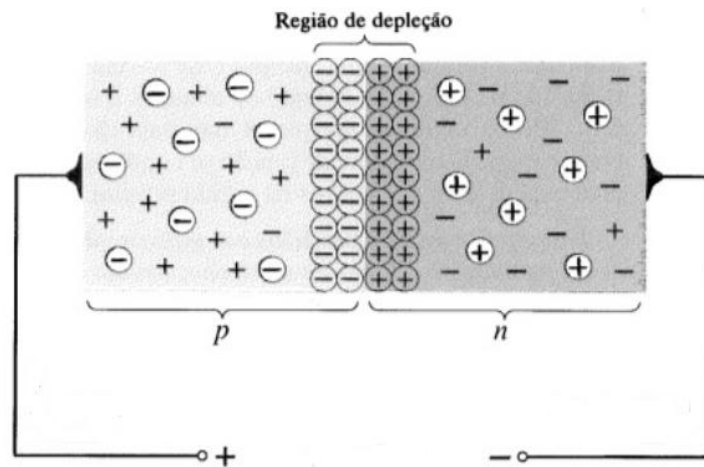


Fonte: adaptado de (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

Quando estes dois tipos de materiais são unidos, os elétrons e as lacunas da região de junção se combinam, resultando em uma ausência de portadores livres na região próxima da

junção (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004). A esta região é dada o nome de região de depleção, conforme ilustrado pela Figura 10.

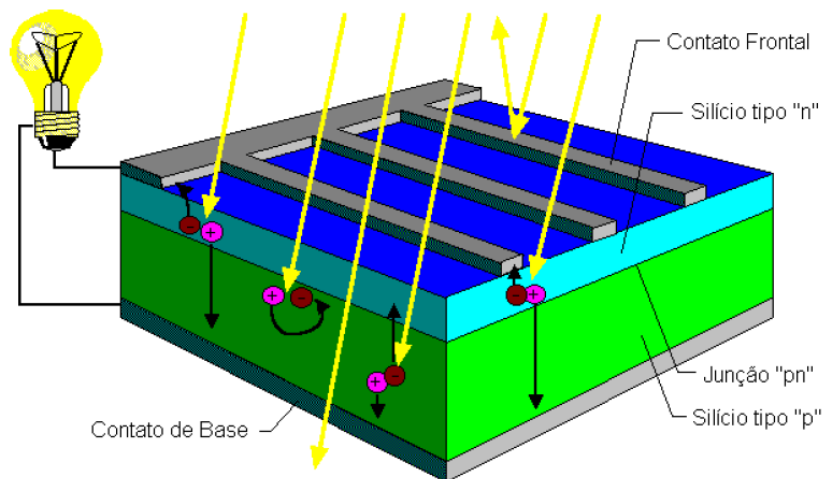
Figura 10 - Junção  $p-n$



Fonte: adaptado de (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

Estes conceitos são importantes para o entendimento do funcionamento de uma célula fotovoltaica, mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Constituição de uma célula fotovoltaica



Fonte: (CRESESB, 2008).

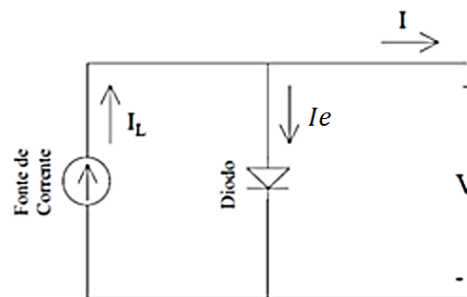
Observando a constituição da célula, verifica-se que a espessura do contato frontal metálico e a região tipo  $n$  são pequenas em comparação com a espessura do material tipo  $p$ .



Tal fato ocorre para que os fótons incidentes possam chegar até a junção *p-n*, onde fornecem energia para que os elétrons possam ser arrancados (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004). Os elétrons em movimento são coletados pelas placas metálicas, que no caso de um circuito fechado, irão circular na direção da região tipo *n* para a região tipo *p*, formando uma corrente elétrica. Caso não exista um caminho para a circulação de corrente elétrica, no caso de um circuito aberto, percebe-se uma tensão de aproximadamente 0,6 V entre os terminais da célula. Essa tensão se dá devido ao campo elétrico na região de depleção formada na junção *p-n* (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Segundo (HECKTHEUER, 2001), a corrente elétrica que uma célula entrega à carga (*I*), é a soma algébrica de duas componentes: a corrente fotogerada (*I<sub>L</sub>*), e a corrente de escuro (*I<sub>e</sub>*). Considerando o circuito elétrico ideal de uma célula fotovoltaica, conforme ilustrado pela Figura 12, conclui-se então que a corrente fornecida pela célula é a diferença entre a corrente fotogerada e a corrente de escuro.

Figura 12 - Circuito elétrico de uma célula fotovoltaica ideal.



Fonte: produção do próprio autor.

Desta forma, a equação da corrente fornecida por uma célula pode ser escrita como:

$$I = I_L - I_e \quad (6)$$

A corrente fotogerada (*I<sub>L</sub>*) é aquela produzida pela incidência de luz na junção *p-n*, através da geração de pares elétrons-buracos, e pode ser obtida através da Equação 7.

$$I_L = \frac{\eta e I_0 A}{hf} \quad (7)$$

Onde:

*η*: eficiência quântica da conversão [adimensional];

*e*: carga elementar do elétron [ $1,6 \times 10^{-19}$  C];

- $I_0$ : intensidade da radiação absorvida [ $J/m^2$ ];
- $A$ : área efetiva da junção [ $m^2$ ];
- $h$ : constante de Planck [ $6,6262 \times 10^{-34} Js$ ];
- $f$ : frequência da radiação [Hz].

Segundo Hecktheuer (HECKTHEUER, 2001) e Resende (RESENDE, 2004), uma boa aproximação para a equação da corrente de escuro ( $I_e$ ), onde não há a geração de pares por absorção de fótons, é:

$$I_e = I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

Logo, a equação da corrente elétrica produzida por uma célula fotovoltaica pode ser reescrita na seguinte forma:

$$I = I_L - I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

Onde,

$I_s$ : corrente de saturação reversa, que depende de parâmetros dos materiais que formam a junção  $p-n$  [A];

$e$ : carga elementar do elétron [ $1,6 \times 10^{-19} C$ ];

$V$ : tensão fornecida pela célula [V];

$m$ : fator de idealidade do diodo [adimensional];

$k$ : constante de Boltzmann [ $6,6262 \times 10^{-34} Js$ ];

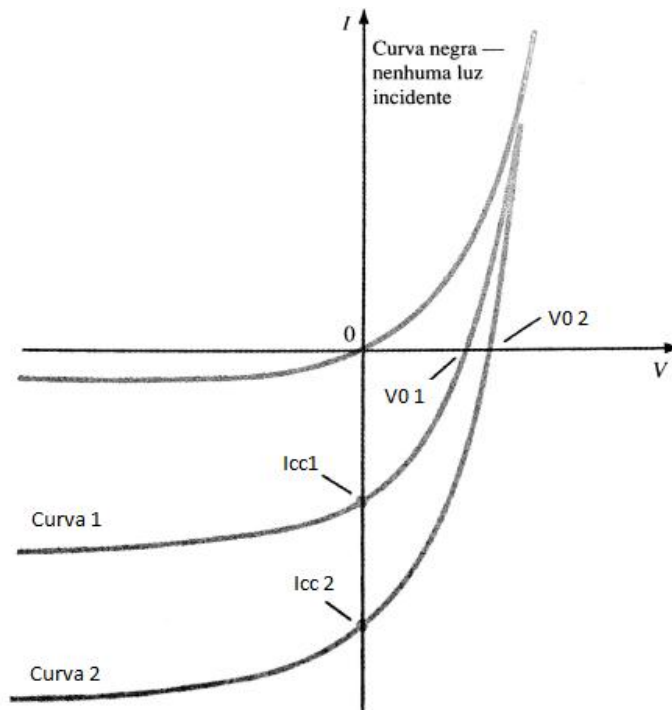
$T$ : temperatura na junção da célula [ $^{\circ}C$ ].

Analisando as Equações 7 e 9, se pode concluir que a corrente fornecida pela célula é diretamente proporcional ao nível de radiação solar, uma vez que  $I_L$  depende diretamente da intensidade de radiação absorvida e também da área incidente. Desta forma, obstruções à irradiação incidente, que provocam sombras sobre a célula fotovoltaica, diminuirão a corrente gerada.

A Figura 13 mostra como se comporta uma célula fotovoltaica para três diferentes níveis de iluminação. A curva onde não há luz incidente, curva negra, mostra que não há corrente elétrica produzida e nem tensão nos terminais da célula. A curva 1 exibe os valores de corrente e tensão, destacando a corrente de curto circuito  $I_{cc1}$ , e a tensão em aberto  $V_{01}$ . Ao comparar estes valores com os da curva 2, onde o nível de irradiação luminosa é o dobro do caso anterior, percebe-se que a corrente de curto circuito aumenta proporcionalmente,

alcançando um valor duas vezes maior, em comparação com a curva 1. A tensão de circuito aberto sofreu um pequeno incremento.

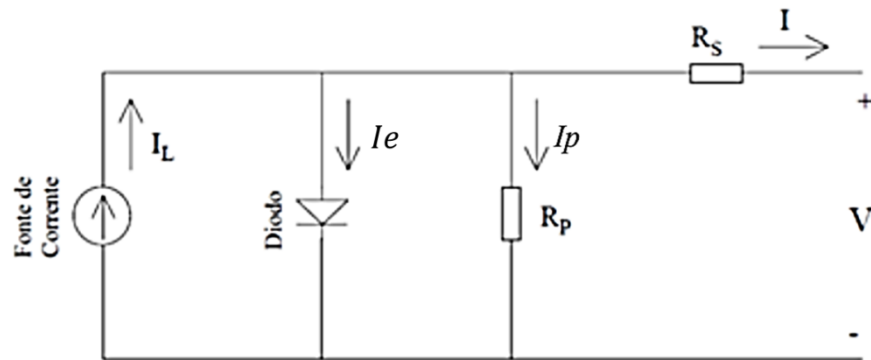
Figura 13 - Corrente em função da tensão, para diferentes intensidades de luz



Fonte: adaptado de (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

Outra aproximação importante, feita por diversos autores como Cabral (CABRAL et al., 2004), Gtes (GTES, 2014) e Hecktheuer (HECKTHEUER, 2001), é o circuito elétrico real, característico de uma célula fotovoltaica, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: produção do próprio autor.

Analisando o circuito, percebe-se que a corrente que a célula entregará à carga ( $I$ ), sofre perdas devido as resistências em paralelo ( $R_p$ ) caracterizando as fugas de corrente, e a resistência em série ( $R_s$ ) caracterizando as perdas por lei de Ohm. A Equação 9 descreve a corrente fornecida por uma célula fotovoltaica real, onde são considerados todos estes parâmetro (ZHENG et al., 2014).

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(V + IR_s)}{mkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (10)$$

Devido à pequena área de exposição à radiação solar, a potência fornecida por uma célula fotovoltaica não é suficiente para alimentar cargas que necessitam de maiores níveis de tensão e corrente elétrica. Segundo Villalva (VILLALVA; GAZOLI, 2012), uma célula sozinha produz pouca eletricidade, então várias células são agrupadas para produzir painéis, placas ou módulos fotovoltaicos. Segundo Resende (RESENDE, 2004), as células fotovoltaicas devem ser associadas em série e paralelo para produzirem tensão e corrente adequados para alimentar cargas formadas por lâmpadas, motores e outros dispositivos elétricos, em geral. São colocadas em grandes painéis interligados entre si, de modo a coletar energia solar em grandes áreas.

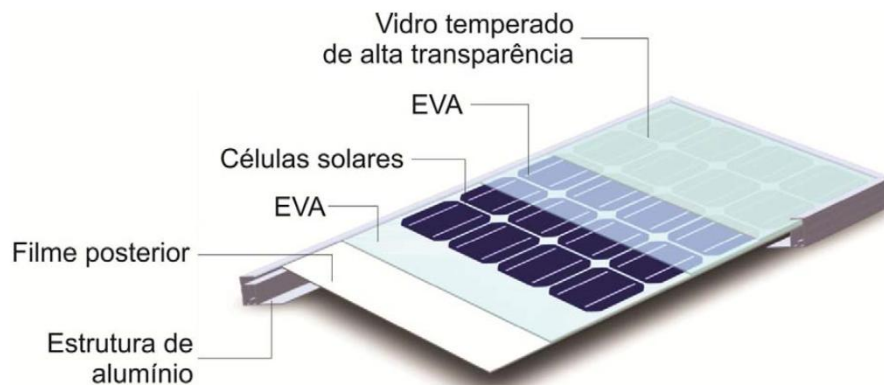
## 2.3 Módulos Fotovoltaicos

Segundo Patel (PATEL, 2006), para se alcançar maiores níveis de potência fornecida, várias células iguais são conectadas, aumentando a área de captação da radiação solar. Dispositivos fotovoltaicos podem ser associados em série e/ou em paralelo, de forma a se obter os níveis de corrente e tensão desejados (GTES, 2014). Ao interligar dispositivos em

paralelo se obtêm maiores níveis de corrente, enquanto a ligação em série resulta em maiores níveis de tensão. Um módulo fotovoltaico é composto por uma associação de células fotovoltaicas (HECKTHEUER, 2001), que são interligadas eletricamente e encapsuladas.

A interligação elétrica das células é feita através de soldas em tiras. Depois de soldadas, as células são encapsuladas, a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo fotovoltaico. O encapsulamento do módulo é composto por uma camada de vidro temperado com a função de proteção mecânica das células, duas camadas de acetato de etil vinila (EVA, do inglês Ethylene-vinyl acetate) que é responsável em aumentar a durabilidade do módulo, um filme isolante posterior, e uma estrutura externa de alumínio (GTES, 2014). A Figura 15 ilustra a construção de um módulo fotovoltaico.

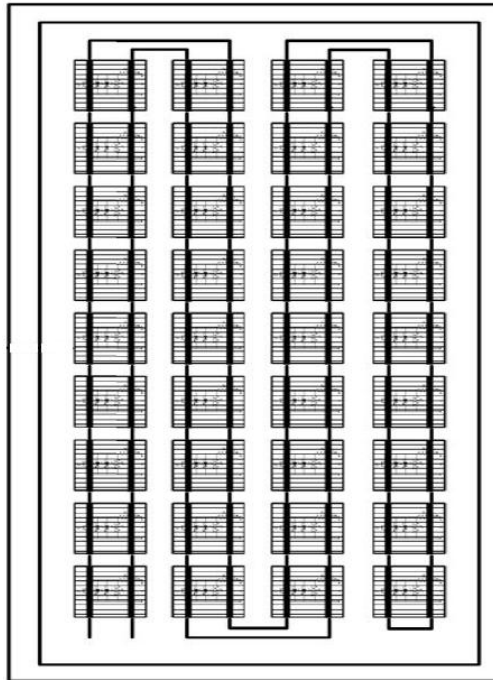
Figura 15 - Estrutura de um módulo fotovoltaico



Fonte: (GTES, 2014).

O módulo pode ser constituído por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo. Associação esta que depende dos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) mais adequados à aplicação a que o módulo se destina (GTES, 2014). Os módulos comerciais são compostos normalmente por 36 ou 72 células conectadas em série, de forma a elevar a sua tensão, e assim a potência fornecida (CARVALHO, 2013). A Figura 16 ilustra a estrutura de um módulo fotovoltaico, com as mesmas características de ligação entre as células do Kyocera KD135SX-UPU, composto por trinta e seis células, ligadas em série, fornecendo uma tensão com circuito aberto em torno de 21 V, corrente e potencia máximas de 7,6 A e 135 W, respectivamente (KYOCERA, 2012).

Figura 16 - Estrutura de um módulo fotovoltaico com 36 células ligadas em série



Fonte: adaptado de (DZIMANO, 2008).

Na ligação em série a mesma corrente flui por todas as células, e a tensão nos terminais de um módulo corresponde à soma das tensões individuais de cada célula (DZIMANO, 2008). Porém, caso células ligadas em série se encontrem sob diferentes condições de irradiação solar, elas irão gerar diferentes valores de corrente elétrica. Neste caso, a corrente que a associação fornecerá, será limitada ao valor daquela célula que está recebendo o menor nível de irradiação. A ligação série de células gerando correntes diferentes não é recomendada, pois pode causar superaquecimento (GTES, 2014).

Levando em consideração que um módulo é formado por uma associação de células fotovoltaicas ligadas em série, a tensão total fornecida ( $V_t$ ) será a somatória das tensões fornecidas por cada uma das células (HECKTHEUER, 2001). Para uma relação para a tensão do um módulo, o fator  $e/mkT$ , da Equação 10, que multiplica o nível de tensão fornecido por uma célula, deve ser multiplicado pelo número de células associadas em série no módulo, resultando no termo:

$$V_t = N_s \left( \frac{mkT}{e} \right) \quad (11)$$

Onde:

$N_s$  – número de células [adimensional];

$m$ : fator de idealidade do diodo [adimensional];

$k$ : constante de Boltzmann [ $6,6262 \times 10^{-34}$  Js];

$T$ : temperatura na junção da célula [ °C];

$e$ : carga elementar do elétron [ $1,6 \times 10^{-19}$  C].

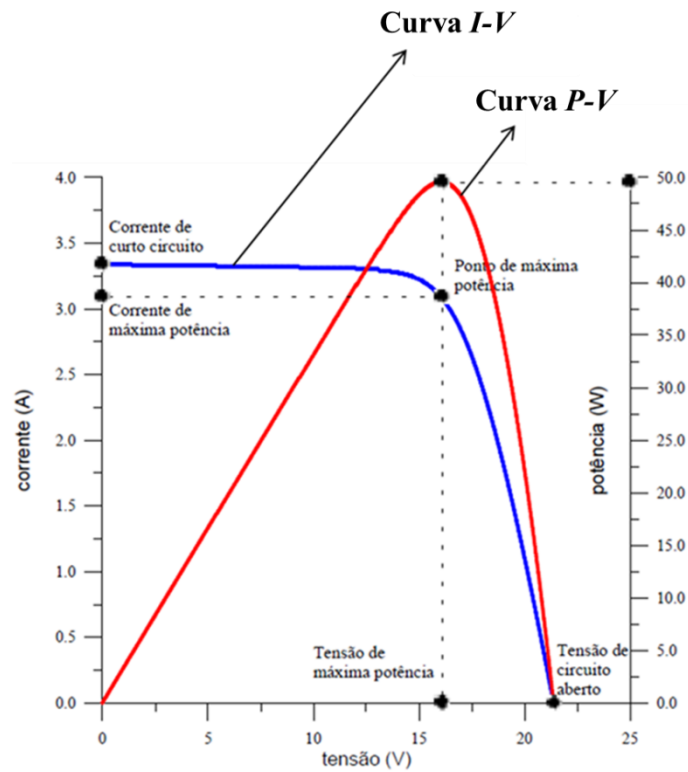
Desta forma, substituindo a Equação 11 na expressão da corrente de uma célula (Equação 10), a equação da corrente fornecida por um módulo fotovoltaico pode ser representada por:

$$I = I_L - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (12)$$

Além das equações, outra forma de caracterizar eletricamente um módulo fotovoltaico é através das curvas corrente versus tensão ( $I$ - $V$ ) e potência versus tensão ( $P$ - $V$ ). Segundo Gtes (GTES, 2014), um dos ensaios mais completos para determinar as características elétricas de um módulo fotovoltaico é o traçado de sua curva característica corrente versus tensão ( $I$ - $V$ ). Os valores de corrente e tensão que o módulo fotovoltaico fornece dependem do equipamento que está conectado aos seus terminais. Caso o equipamento demande uma alta corrente, a tensão tende a diminuir. A tensão tende a aumentar quando a corrente solicitada é baixa (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

De acordo com a resistência elétrica da carga conectada, o módulo pode estar polarizado em três pontos importantes: curto-circuito, circuito aberto e ponto de máxima potência, de acordo com as condições de radiação e temperatura (HECKTHEUER, 2001). A Figura 17 ilustra as curvas  $I$ - $V$  e  $P$ - $V$ , destacando as correntes e tensões para estes três pontos, de um módulo fotovoltaico.

Figura 17 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$  de um módulo fotovoltaico

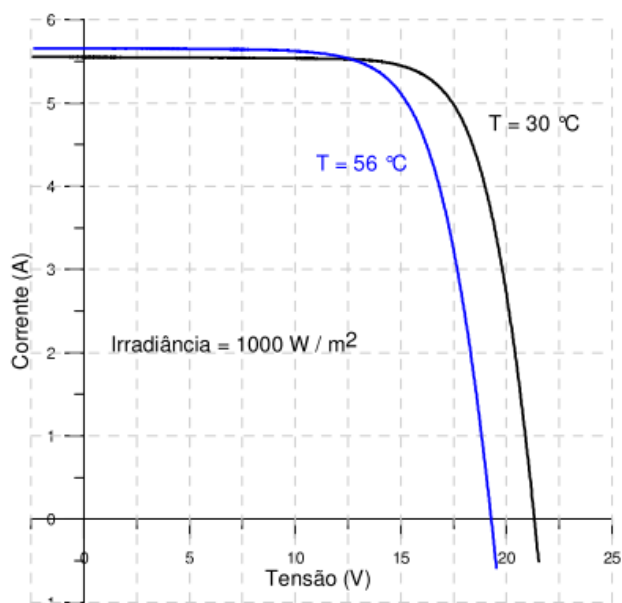


Fonte: adaptado de (HECKTHEUER, 2001).

As curvas  $I-V$  e  $P-V$  sofrem influência da temperatura do módulo, bem como do nível de radiação incidente no mesmo. A Figura 18 ilustra a influência da temperatura na curva  $I-V$  de um módulo fotovoltaico, onde, quanto maior a temperatura, menor será a tensão em circuito aberto.



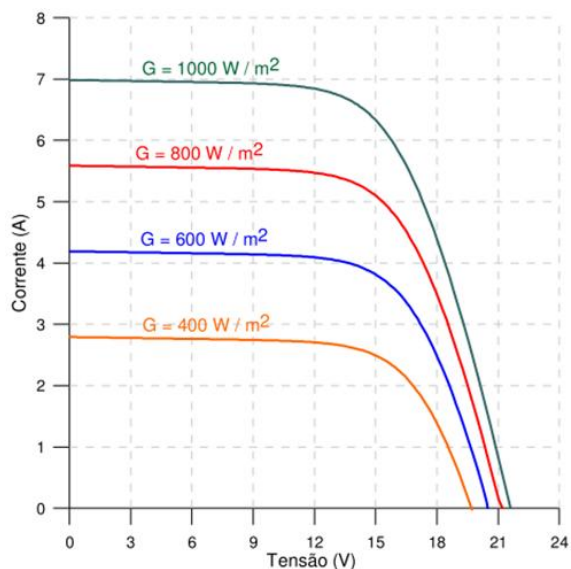
Figura 18 - Efeito da temperatura nos módulos fotovoltaicos



Fonte: (GASPARIN, 2009).

O nível de irradiação solar incidente influencia, de forma diretamente proporcional, a corrente fornecida pelo módulo. Tal fato pode ser explicado através da Equação 7, pois a corrente fotogerada ( $I_L$ ) é diretamente proporcional à radiação incidente, como discutido na seção 2.2. A Figura 19 ilustra as curvas  $I$ - $V$  de um módulo fotovoltaico, para diferentes níveis de radiação solar.

Figura 19 - Efeito da radiação nos módulos fotovoltaicos



Fonte: (GASPARIN, 2009).

Um ponto importante a ser destacado nas curvas  $I-V$  e  $P-V$  é o ponto de máxima potência (MPP – *Maximum Power Point*), pois neste ponto o gerador fotovoltaico entrega a maior potência possível aos equipamentos conectados (cargas). Os valores de corrente e tensão permitem calcular a resistência de carga para a qual o gerador fornecerá máxima potência. Segundo Lopes Junior (JUNIOR, 2013), devido à baixa eficiência energética dos painéis fotovoltaicos e o custo do sistema, torna-se necessário efetuar um melhor aproveitamento da energia retirada do painel, utilizando um algoritmo de rastreamento do melhor ponto da curva característica do painel.

Os inversores utilizados em sistemas *on-grid* se utilizam de um sistema chamado de Seguidor do Ponto de Máxima Potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), que através de algumas premissas, são capazes de estimar o ponto em que a potência gerada pelo módulo fotovoltaico é máxima, através da modificação das características de corrente e tensão do módulo fotovoltaico (VICENTE, 2015a). O MPPT funciona através de um algoritmo, que perturba a operação do módulo fotovoltaico, e mede os valores de potência fornecida e, enquanto os valores de potência medida não atingem o máximo, o sistema continua sua varredura (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Depois de localizado o MPP, caso ocorra alguma perturbação no sistema, variação de temperatura ou irradiância, o sistema volta a fazer sua varredura até o novo MPP.

Essas informações são de extrema importância para as análises propostas por este trabalho, que utilizará as chamadas curvas  $I-V$  e  $P-V$  para análise do efeito do sombreamento sobre módulos fotovoltaicos. A temperatura e a irradiância interferem na potência fornecida pelo módulo fotovoltaico, e, devido ao baixo rendimento inerente aos módulos fotovoltaicos, é desejável que o ponto de operação do módulo seja mantido na máxima potência, independente das condições climáticas, para que isso não acarrete uma diminuição na potência gerada pelo módulo (VICENTE, 2015a). Este trabalho faz uma análise dos efeitos do sombreamento sobre o MPP de módulos fotovoltaicos e como estes efeitos podem ser amenizados através da utilização de diodos de *bypass*.

## **2.4 Estado da Arte**

Como abordado nas seções anteriores, a potência fornecida por um sistema fotovoltaico é diretamente proporcional à radiação incidente. Esta seção apresenta alguns

estudos publicados sobre os efeitos do sombreamento no rendimento dos sistemas fotovoltaicos, que serviram como base para esta dissertação.

Em seu trabalho Seyedmahmoudian (SEYEDMAHMOUDIAN et al., 2013) desenvolve modelos de sistemas fotovoltaicos, sob os efeitos do sombreamento parcial. Esta modelagem é utilizada na investigação do sistema de MPPT a ser utilizado em diferentes sistemas fotovoltaicos.

Zheng (ZHENG et al., 2014) através de simulação computacional, compara as características da potência fornecida de três diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos, e verifica os efeitos do sombreamento sob estas configurações. Em seu trabalho computacional verificou que os três sistemas simulados (inversor central, inversor por arranjo série e microinversor) apresentam rendimento parecido sem sombreamento. Com o efeito de sombreamento, e, sem diodos de *bypass*, sistemas fotovoltaicos que se utilizam de microinversores possuem maior rendimento. Dentre outras observações feitas em seu trabalho, verifica que a eficiência dos sistemas fotovoltaicos pode ser melhorada diminuindo o número de células para cada diodo de *bypass*.

Maki (MAKI; VALKEALAHTI, 2013), investiga o efeito do sombreamento parcial na quantidade de MPPs, simulando um gerador fotovoltaico real através do Matlab e Simulink. Seu estudo verifica que as razões para ter um ou mais MPPs, sob sombreamento, são ligadas às propriedades físicas dos módulos fotovoltaicos: a relação entre a corrente MPP e a corrente de curto-circuito, perdas nos diodos de *bypass*, e a resistência paralela das células fotovoltaicas.

Em uma abordagem experimental, Dolara (DOLARA et al., 2013) analisa os efeitos de diferentes condições de sombreamento no desempenho de módulos poli e monocristalinos, através de suas curvas *I-V* e *P-V*. Seus experimentos são realizados a céu aberto, e os resultados são corrigidos para a irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> (condição padrão de teste). Algumas observações importantes de seu trabalho são: a diminuição da corrente fornecida com o aumento do percentual de sombreamento, os diodos podem reduzir as perdas de potência, e que o sombreamento de 50 % de uma célula provoca uma perda na potência fornecida acima de 30 %.

## **Capítulo 3: Sombreamento em Módulos Fotovoltaicos**

Conforme discutido na seção 2.3, a energia produzida em uma célula ou módulo fotovoltaico é diretamente proporcional à quantidade de irradiação solar incidente. A quantidade de irradiação absorvida, também chamada de irradiância, é a quantidade de energia solar recebida por unidade de área, e pode ser medida em Watts por metro quadrado ( $\text{W/m}^2$ ) (DZIMANO, 2008).

Neste capítulo serão discutidos os efeitos da falta, ou menor incidência de radiação solar sobre algumas células, e o que tais efeitos podem provocar na produção de energia de um módulo fotovoltaico. Também será discutida uma forma de amenizar o problema através da utilização de diodos de desvio, também chamados de diodos de *bypass*.

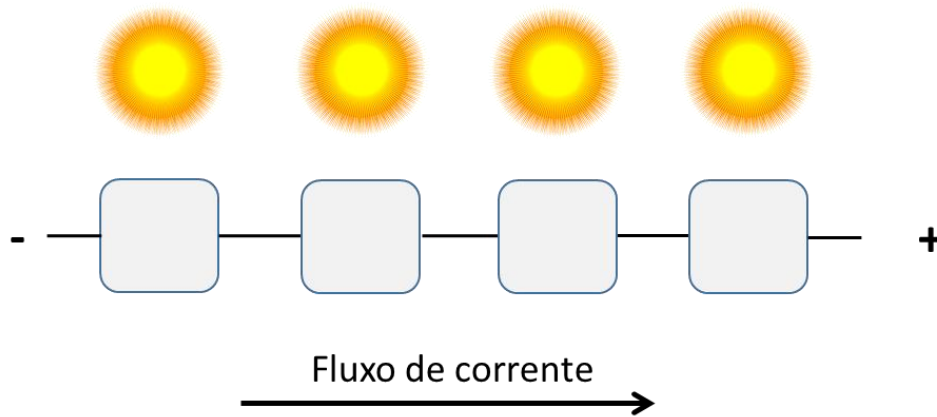
### **3.1 Efeitos do Sombreamento**

Um efeito importante que merece destaque quando se trata de sistemas fotovoltaicos é a ocorrência de sombreamentos suaves ou severos. Os sombreamentos suaves são aqueles onde os raios solares são dispersados e se tornam difusos, podendo ser causados por nuvens pouco densas, sujeira, poluição, etc, diminuindo a potência gerada. O sombreamento severo ocorre quando os raios solares são totalmente interrompidos, não alcançando a superfície do módulo (VICENTE, 2015b). Sistemas fotovoltaicos instalados em locais a céu aberto podem ter a área de radiação solar incidente diminuída por obstáculos como árvores, nuvens, construções e equipamentos de comunicação (SEYEDMAHMOUDIAN et al., 2013). Este fenômeno, chamado de sombreamento, faz com que as células dos módulos fotovoltaicos operem sobre condições diferentes, causando perdas ao sistema (DOLARA et al., 2013). Em um arranjo fotovoltaico, diante do sombreamento de um ou mais módulos, haverá redução na potência fornecida pelo conjunto. A magnitude dessa redução depende de fatores como tipo de arranjo, posição da sombra e intensidade do sombreamento (VICENTE, 2015b).

Como abordado anteriormente, os módulos fotovoltaicos são formados por células associadas em série. Quando uma ou mais destas células recebe menos radiação solar do que as outras da mesma associação, sua corrente vai limitar a corrente de todo o conjunto série

(GTES, 2014). A Figura 20 ilustra um caso ideal, onde todas as células de um conjunto série estão recebendo radiação solar, e, desta forma, produzindo um fluxo de corrente elétrica.

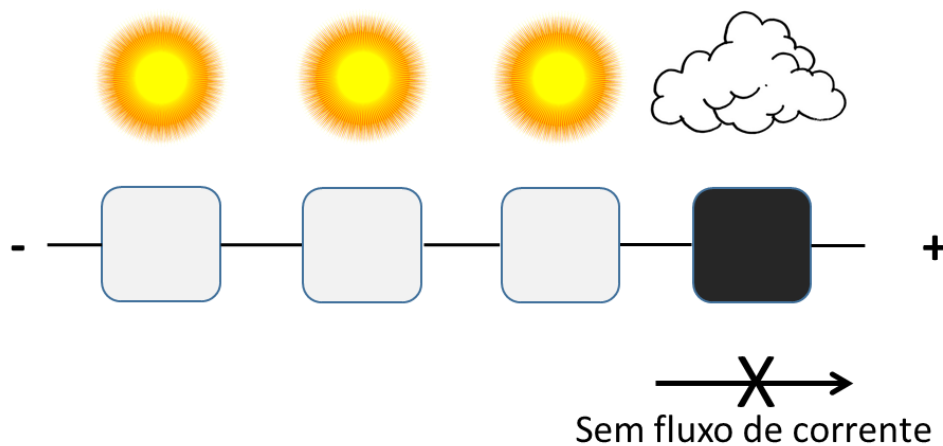
Figura 20 - Conjunto de células fotovoltaicas sob iluminação



Fonte: Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Com a falta de radiação solar, os fótons deixam de incidir sobre a junção  $p-n$  da célula, e assim não há energia suficiente para arrancar os elétrons, e, conseqüentemente, ela deixa de fornecer corrente elétrica. A Figura 21 ilustra o caso em que uma das células deixa de receber a radiação solar, fazendo com que todo o conjunto série pare de fornecer corrente elétrica à carga.

Figura 21 - Conjunto de células fotovoltaicas, com uma célula sombreada



Fonte: Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Além da perda de potência no gerador fotovoltaico, há o risco de danos ao módulo parcialmente sombreado (GTES, 2014). A potência elétrica produzida pelas células não sombreadas passa a ser absorvida pelas células sombreadas, causando um aquecimento nas mesmas que pode provocar danos irreversíveis (DOLARA et al., 2013). Este fenômeno é conhecido como “ponto quente” (do termo inglês *hotspot*), que produz intenso calor sobre a célula afetada, com possível ruptura do vidro e fusão de polímeros e metais (GTES, 2014).

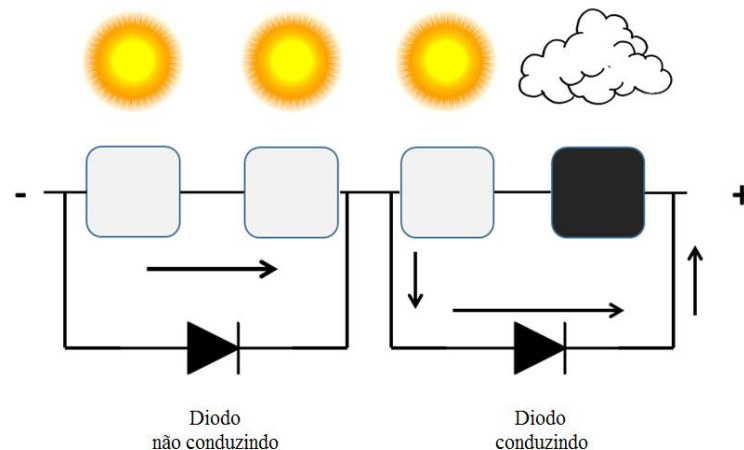
O sombreamento que atinge os módulos fotovoltaicos pode ser parcial, quando atinge apenas um percentual de área de uma determinada célula, ou total, quando atinge toda a área de uma célula. Com o sombreamento total, a célula deixa de fornecer corrente, enquanto sob um sombreamento parcial a mesma fornecerá um menor nível de corrente devido à menor área de exposição à radiação solar. Segundo (CARVALHO, 2013), o sombreamento parcial dos geradores fotovoltaicos é considerado um dos maiores obstáculos às técnicas de MPPT, pois a incidência de diferentes níveis de irradiância em cada módulo ou arranjo fazem com que, no mesmo gerador possam existir múltiplos pontos de potência máxima.

### **3.2 Diodos de *Bypass***

Uma forma de amenizar o efeito do sombreamento em módulos fotovoltaicos é interligar um diodo, antiparalelo, com as células (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Para evitar a ocorrência de “pontos quentes”, os módulos são normalmente protegidos com diodos de desvio (*bypass*), que são ligados a um conjunto de células interligadas em série. Os diodos oferecem um caminho alternativo para a corrente produzida pelas células não sombreadas e, assim, limitam a dissipação de potência no conjunto de células sombreadas. Além de reduzir a perda de energia, também reduz o risco de dano irreversível das células afetadas, o que poderia inutilizar o módulo (GTES, 2014).

A Figura 22 ilustra o funcionamento do diodo de *bypass*, que apenas conduz corrente elétrica no caso de alguma das células às quais está ligado, for sombreada.

Figura 22 - Esquema de funcionamento do diodo de bypass



Fonte: Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Por estar ligado de forma antiparalela, ou seja, com polaridade contrária à da célula, quando o grupo de células recebe a radiação solar a tensão no catodo do diodo será maior que no anodo, condição esta que faz com que o diodo permaneça com polarização reversa. Nesta condição, o diodo não permite a circulação de corrente elétrica por ele próprio.

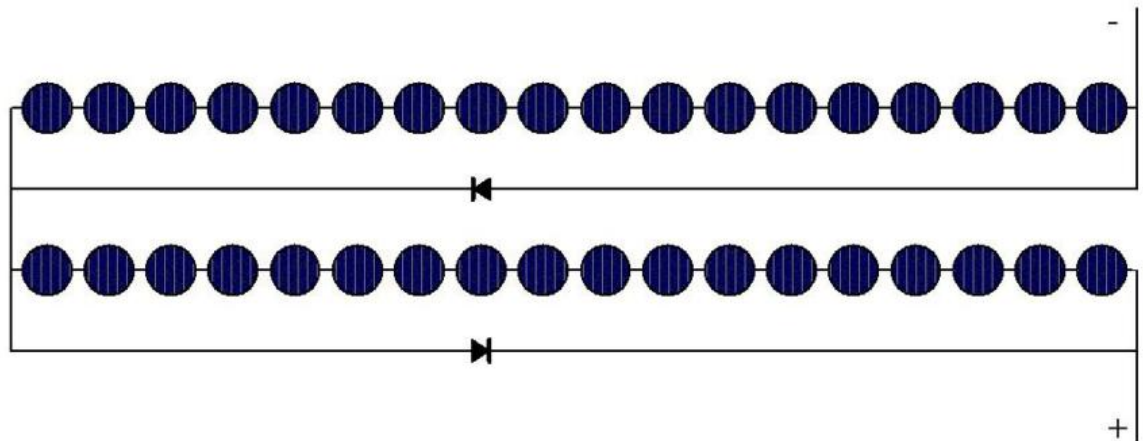
Caso uma das células não receba radiação solar, esta deixa de fornecer corrente e afeta todo o grupo de células. Como a tensão no anodo do diodo fica maior que a do catodo, o diodo passa a funcionar com polarização direta ou condição de condução (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004). Nessa condição de trabalho o diodo fornece um desvio para a corrente produzida pelas células não sombreadas, reduzindo então a perda de potência fornecida e riscos de danos ao módulo.

Os módulos fotovoltaicos comercializados são formados por conjuntos de células fotovoltaicas interligadas em série (CARVALHO, 2013). Logo, estão sujeitos ao problema do sombreamento. Para amenizar os efeitos, são interligados alguns diodos de *bypass* a grupos de células, geralmente entre 15 e 30 células para cada diodo (GTES, 2014). O diodo de *bypass* deve suportar em operação permanente, a mesma corrente das células, pois caso contrário pode ser danificado.

A Figura 23 ilustra a ligação dos diodos de *bypass* em um módulo fotovoltaico, onde cada um dos diodos protege um grupo de dezoito células. Caso ocorra o sombreamento total em uma célula, todo o grupo ao qual está inserida será afetado, entrando em funcionamento o diodo que cria um desvio para a corrente gerada no módulo. Quando o sombreamento atinge células de grupos distintos, os respectivos diodos em antiparalelo a esses grupos entram em

funcionamento e, embora o módulo deixe de fornecer potência, evitará danos (HECKTHEUER, 2001).

Figura 23 - Ligação de diodos de *bypass* em módulos fotovoltaicos



Fonte: (GTES, 2014).

Embora no exemplo acima o módulo possua dois diodos, só entrarão no modo condução ao mesmo tempo, quando além de ocorrer o sombreamento nos dois grupos de células, o módulo estiver ligado a outros módulos. Pois, caso o módulo funcione em um sistema isolado, ou seja, não conectado a outros módulos, os diodos não possuirão diferença de potencial suficiente para entrar no modo condução.



## Capítulo 4: Metodologia

Como abordado anteriormente, a quantidade de radiação solar incidente sobre um painel fotovoltaico influencia diretamente na quantidade de energia elétrica produzida. Assim, quando uma parte deste painel deixa de ser iluminada, ou sombreada, ele fornece uma potência menor que a nominal. Essa perda de potência pode ser agravada de acordo com o arranjo do painel, ou seja, forma como as células foram interligadas.

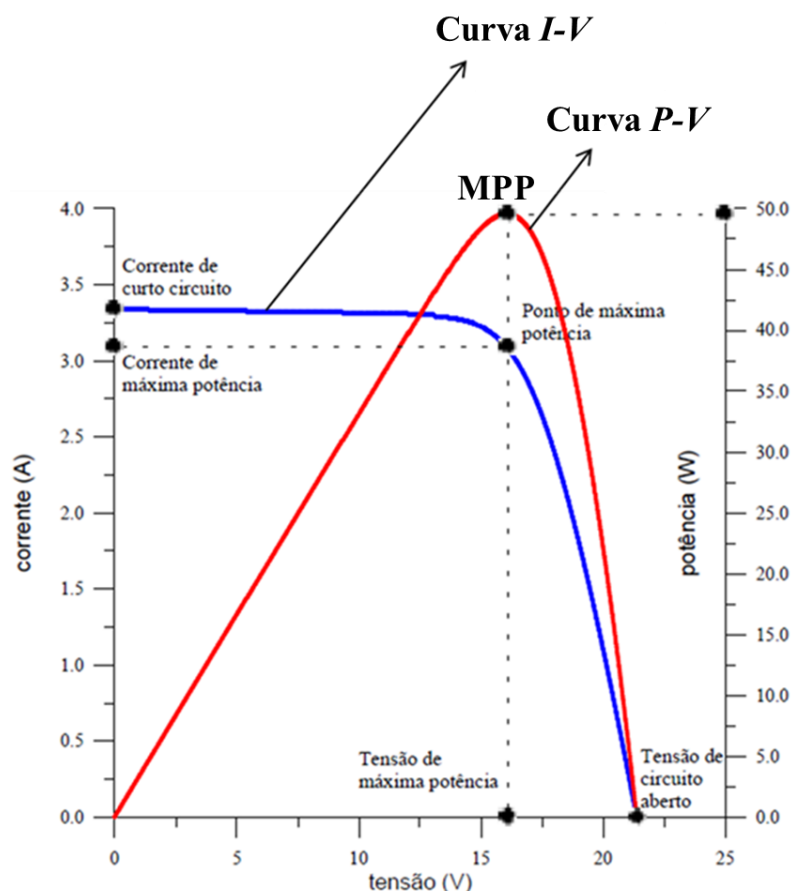
Com o objetivo de verificar esse fenômeno, bem como a efetividade no uso de diodos de *bypass* nos casos de sombreamento de painéis fotovoltaicos, este trabalho realiza comparações com painéis sombreados e não sombreados, e compara a potência gerada em ambos os casos. A forma como é feita a comparação e as ferramentas utilizadas são descritas nas seções a seguir.

### 4.1 Sistema de coleta de dados

Segundo Gasparin (GASPARIN, 2009), a curva  $I-V$ , corrente em função da tensão, descreve o comportamento da corrente em função da tensão em uma célula, módulo ou arranjo fotovoltaico. A curva descreve como estas grandezas variam de acordo com a variação da carga conectada, estando diretamente ligada à irradiância e inversamente à temperatura. Da mesma forma, a curva de potência  $P-V$ , potência em função da tensão, caracteriza como varia a potência fornecida pelo sistema fotovoltaico.

Uma forma de variar a carga conectada e gerar as curvas de um módulo é conectá-lo a um resistor variável, e, a partir de uma resistência inicial zero, aumentá-la até uma resistência muito alta. Assim, o módulo é sujeito inicialmente a um curto-circuito, onde fornece corrente máxima e tensão mínima, variando até um circuito aberto, onde fornece tensão máxima e corrente mínima. Estes valores de carga descrevem o primeiro e último pontos, respectivamente, das curvas, e os valores intermediários de corrente e tensão completam a curva, destacando o ponto importante onde se verifica a máxima potência fornecida (MPP). A Figura 24 exemplifica as curvas  $I-V$  e  $P-V$  de um módulo fotovoltaico.

Figura 24 - Curvas I-V e P-V



Fonte: adaptado de (HECKTHEUER, 2001).

Como o objetivo do presente trabalho é verificar o efeito do sombreamento e diodos de *bypass*, a análise das curvas *I-V* e *P-V* será utilizada na comparação da resposta dos módulos fotovoltaicos ao sombreamento. Dessa forma, é proposto um sistema que varia a carga conectada ao módulo e coleta dados de tensão e corrente.

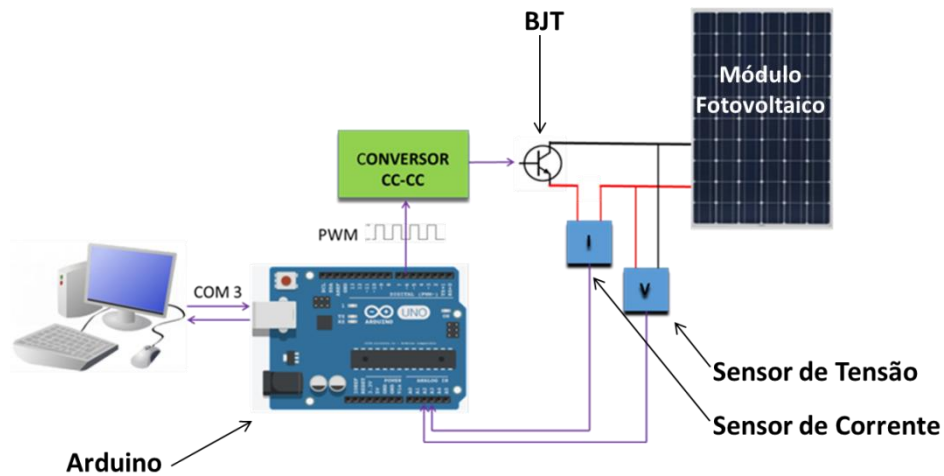
Segundo (HECKTHEUER, 2001), a medição de curvas características de módulos é regulamentada através de normas, entre elas, americanas e brasileiras, as quais têm por objetivo fixar condições mínimas para o teste de desempenho elétrico de módulos fotovoltaicos, a fim de obter-se resultados que, após serem corrigidos para a condição padrão, possam ser comparados com o de outros módulos testados. Porém, como caracterizar o sistema fotovoltaico não é foco deste estudo, e sim comparar a máxima potência fornecida por um mesmo módulo, sob diferentes condições de sombreamento, essas normas não foram seguidas.

O sistema proposto realiza a variação da carga conectada ao módulo fotovoltaico através do controle na região de trabalho de um transistor de junção bipolar (BJT). O BJT, que é muito utilizado em circuitos amplificadores e de chaveamento, possui três regiões distintas de trabalho: corte, ativa e saturação. Na região de corte se comporta como um circuito aberto, não permitindo a circulação de corrente entre seu coletor e emissor, ao contrário da região de saturação, onde a condução de corrente entre coletor e emissor é máxima, podendo ser comparada a um curto-circuito. Na região ativa, a condução de corrente entre coletor e emissor é controlada pela tensão que é aplicada em sua base (SEDRA; SMITH, 2000).

O BJT utilizado no circuito foi o 2N5038 (ON SEMICONDUCTOR, 2016), comumente utilizado em circuitos de potência, capaz de dissipar 140 W. Além da potência, outros dois fatores que influenciaram em sua escolha foram a corrente de coletor de 20A, e a tensão que o mesmo suporta entre coletor e emissor de 90 V. Estes dados são importantes, pois, como o transistor dissipará toda a potência fornecida pelo módulo, deve suportar a corrente de curto-circuito do módulo em seu coletor, que gira em torno de 9A, bem como a tensão de circuito aberto, que gira em torno de 25 V. Para aumentar a potência máxima dissipada pelo circuito, elevando para 280 W, dois transistores foram ligados em paralelo, e instalados em um dissipador de calor. Outro recurso utilizado para que possam trabalhar com sua potência máxima, sem o risco de danos, foi a instalação de ventilação forçada, com o objetivo de manter a temperatura do dissipador em níveis mais baixos.

Para controlar a tensão aplicada à base do BJT, foi montado um conversor CC/CC do tipo *Chopper Buck*, que através do chaveamento de um Transistor Bipolar de Porta Isolada (IGBT, do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*), controla o nível da tensão em sua saída, variando de um valor máximo a zero. O IGBT é chaveado através da técnica de modulação por largura de pulso (PWM), onde a largura dos pulsos de tensão, também chamado de ciclo de trabalho, pode variar enquanto o período de chaveamento é constante (AHMED, 2000). A variação no ciclo de trabalho faz com que o IGBT apresente diferentes níveis de condução de corrente, e em conjunto com os outros componentes do circuito, provoca a variação na tensão de saída, controlando a região de trabalho do BJT. Variando o sinal PWM de 0 a 100 %, o conversor CC/CC varia a tensão na base do transistor de um valor máximo até zero respectivamente, provocando a variação da carga conectada ao módulo fotovoltaico. A figura 25 ilustra um diagrama em blocos do sistema de coleta de dados.

Figura 25 - Diagrama de blocos do circuito proposto



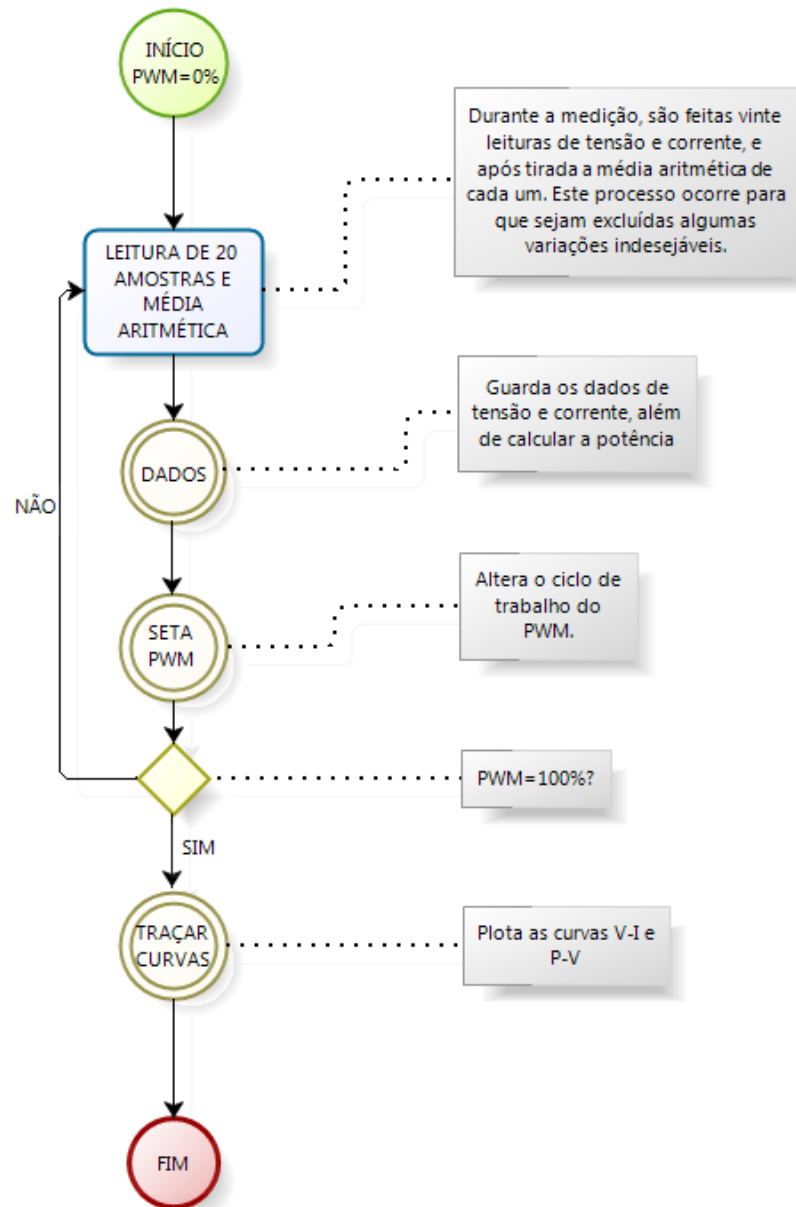
Fonte: produção do próprio autor.

A variação do sinal de PWM e a aquisição de tensão e corrente na saída do módulo fotovoltaico são feitas pelo microcontrolador Arduino® UNO. Além de portas de entrada/saída de dados, o microcontrolador gera um sinal PWM com frequência e ciclo de trabalho programáveis. Para coleta de dados de corrente foi utilizado o sensor de corrente ACS712 30A conectado a uma das portas analógicas do Arduino®. Esse sensor converte um sinal de corrente que pode variar de -30 A a +30 A, em um sinal de tensão de 0 a +5 V, compatível com o microcontrolador. Para a aquisição de dados de tensão foram utilizados divisores de tensão, de acordo com a tensão máxima do módulo fotovoltaico.

A programação do Arduino® (Apêndice A) permite que uma rotina criada no Matlab® (Apêndice B) controle o sistema de coleta de dados, variando o ciclo de trabalho do PWM de 0 a 100 %, em duzentos e cinquenta e cinco níveis diferentes, de acordo com as especificações do microcontrolador. A frequência do sinal PWM, é a disponível na porta 6 do microcontrolador, de 980 Hz. Dessa forma, para cada passo de variação no PWM são adquiridos os correspondentes níveis de tensão e corrente. Para cada ciclo de trabalho do PWM, são adquiridas vinte amostras de tensão e corrente, e após o cálculo da média aritmética, as grandezas são armazenadas. A aquisição de várias amostras é necessária para a eliminação de ruídos, e a quantidade foi escolhida de acordo com a melhor eficácia quanto à eliminação de ruídos e menor tempo de coleta de dados.

Ao todo, são duzentos e cinquenta e cinco passos, correspondendo à mesma quantidade de amostras de corrente e tensão, que formam as curvas  $I-V$  e  $P-V$  do sistema ensaiado. A Figura 26 mostra o algoritmo utilizado na rotina criada.

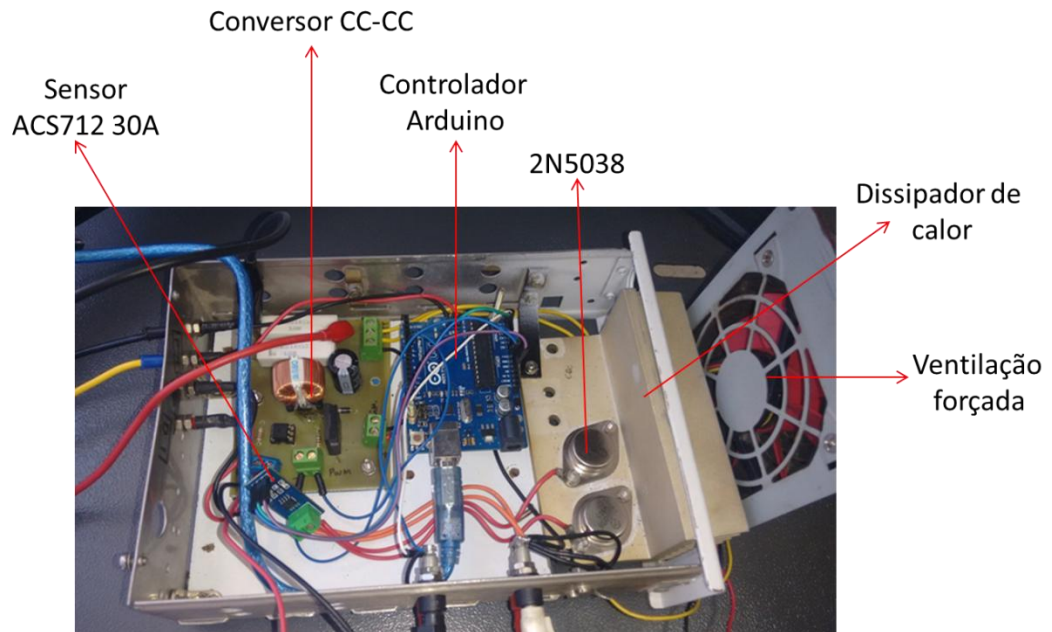
Figura 26 - Algoritmo da rotina utilizada no Matlab®



Fonte: produção do próprio autor.

O sistema montado para a aquisição de dados montado é mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Sistema de aquisição de dados



Fonte: produção do próprio autor.

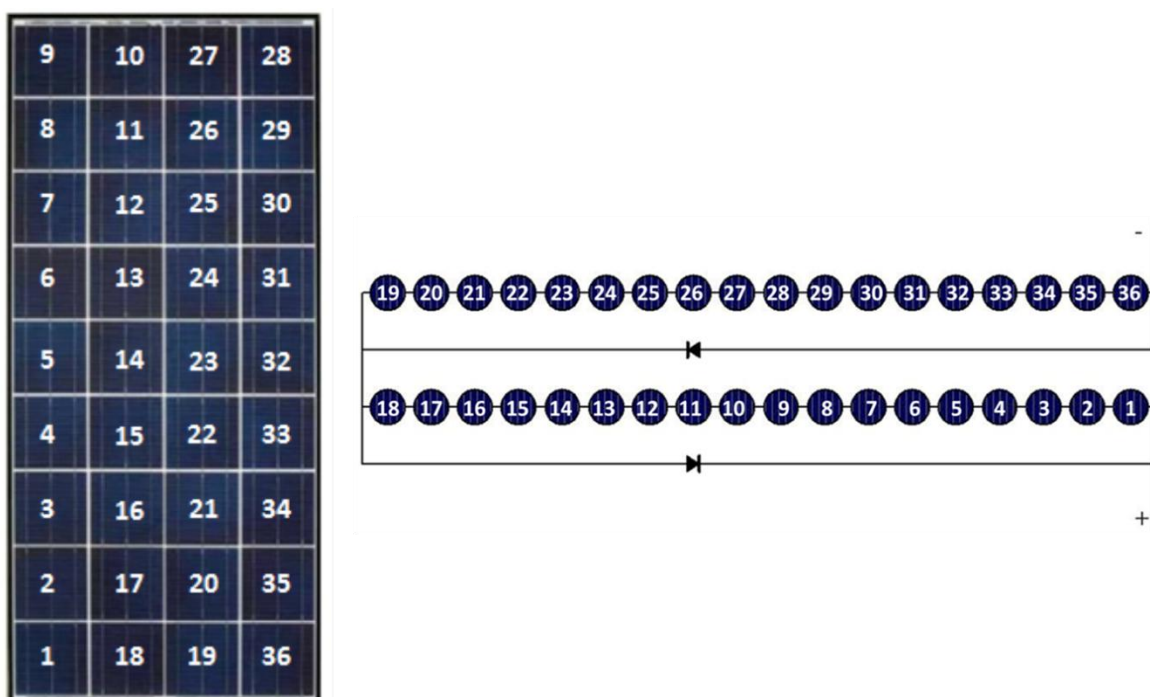
## 4.2 Estudo do impacto do sombreamento em módulos fotovoltaicos

O efeito do sombreamento acontece quando uma ou mais células recebem pouca ou nenhuma luz, impedindo a corrente elétrica produzida pelas outras células em um módulo fotovoltaico. Além de reduzir a potência fornecida pelo sistema, em casos de células ou módulos ligados em paralelo, os elementos iluminados podem passar a fornecer corrente elétrica aos sombreados, que, dependendo da intensidade dessa corrente podem ser danificados (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em seu trabalho, Dolara (DOLARA et al., 2013) faz um estudo experimental desses efeitos, utilizando as curvas  $I-V$  e  $P-V$  para diferentes níveis de sombreamento. Para verificar o efeito provocado em módulos fotovoltaicos, este trabalho propõe a comparação entre as curvas  $I-V$  e  $P-V$ . O sistema de coleta de dados descrito na seção 3.1 será utilizado para traçar as curvas características de dois módulos fotovoltaicos de mesma marca e modelo, sob quatro diferentes condições de sombreamento.

Para o estudo, são utilizados os módulos fotovoltaicos da marca Kyocera, modelo KD135SX-UPU, com 135 W de potência máxima a uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25 °C. Esses módulos são fabricados com silício policristalino e possuem uma eficiência em torno de 16 % (KYOCERA, 2012). Esse módulo é constituído por trinta e seis células interligadas em série, sendo que cada conjunto de dezoito células possui um diodo de *bypass*, conforme ilustrado pela Figura 28.

Figura 28 - Esquema de ligação das células do módulo Kyocera



Fonte: adaptado de (GTES, 2014).

Cada um dos módulos será testado sob quatro condições diferentes, para que seja feita a comparação. As quatro condições de testes que foram realizadas são:

- módulos sem sombreamento: no primeiro teste os módulos ficaram expostos de forma que todas as trinta e seis células recebam a radiação. Após traçar suas curvas, estas foram adotadas como parâmetro de comparação com as curvas nos testes onde ocorre algum tipo de sombreamento. A Figura 29 mostra os módulos durante os testes.

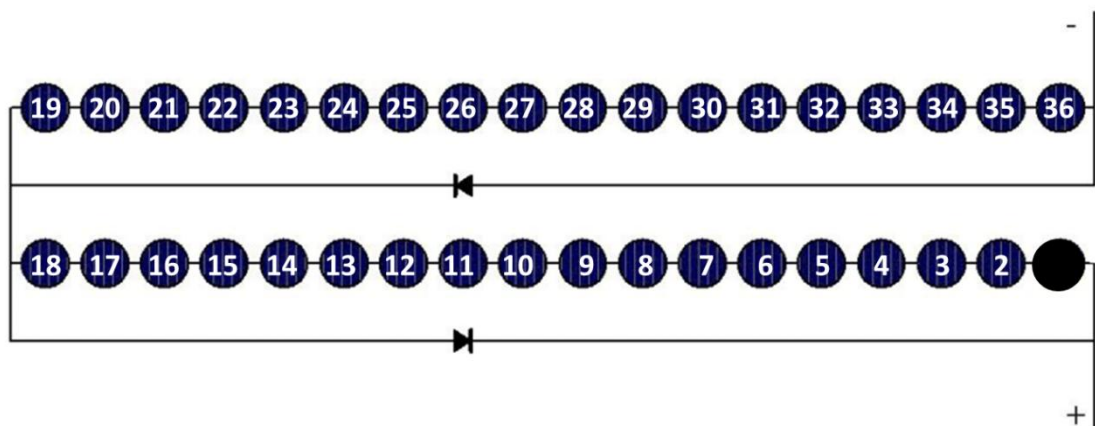
Figura 29 - Testes em módulos fotovoltaicos sem sombreamento



Fonte: produção do próprio autor.

- sombreamento total de uma célula: com o objetivo de verificar o efeito provocado pelo sombreamento em uma única célula, a segunda etapa consistiu em sombrear totalmente a célula de número uma de cada módulo, e plotar suas curvas, conforme ilustra a Figura 30.

Figura 30 - Esquema de ligação das células do módulo Kyocera KD135SX-UPU, com uma célula sombreada



Fonte: Adaptado de (GTES, 2014).



Para criar este efeito, foi instalado um anteparo entre o painel e a direção do sol, causando um sombreamento difuso e total na célula um. A Figura 31 mostra como foram feitos estes testes.

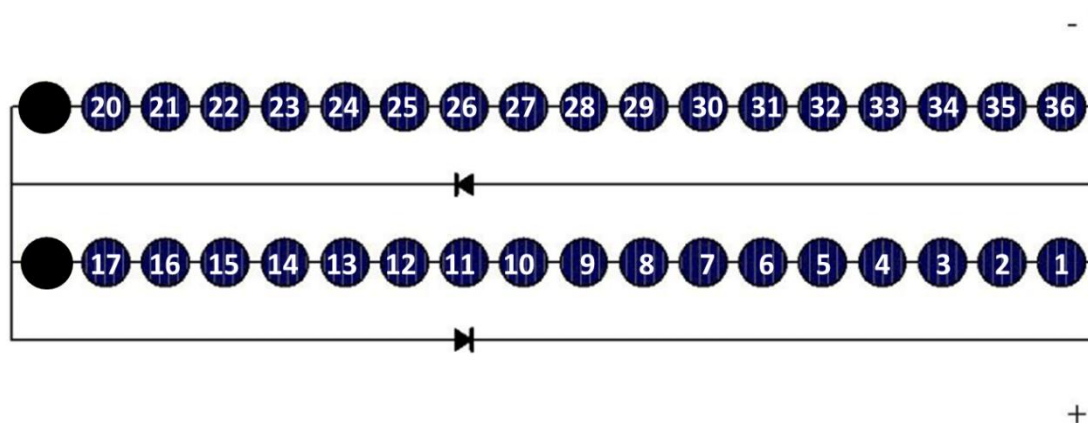
Figura 31 - Testes em módulo fotovoltaico com uma célula totalmente sombreada



Fonte: produção do próprio autor.

- sombreamento total de duas células: como as trinta e seis células do módulo estão ligadas em série, e um diodo de *bypass* para cada grupo de dezoito células, ao bloquear a radiação em uma célula de cada grupo, a potência fornecida pelo módulo ficaria totalmente comprometida, afetando os dois arranjos do módulo. Conforme ilustra a Figura 32, as células dezoito e dezenove, uma de cada arranjo série, foram sombreadas.

Figura 32 - Esquema de ligação das células do módulo Kyocera KD135SX-UPU, com duas células sombreadas



Fonte: Adaptado de (GTES, 2014).

Nesta configuração foram testados dois tipos de sombreamento sobre as duas células: o sombreamento difuso e o opaco. Da mesma forma que nos testes anteriores, o efeito difuso foi provocado instalando um anteparo entre o painel e a direção do sol, causando um sombreamento total nas duas células. A Figura 33 mostra como foram feitos os testes.

Figura 33 - Testes em módulo fotovoltaico com duas células sombreadas, afetando os dois arranjos série (sombreamento difuso)



Fonte: produção do próprio autor.

Sombreamento opaco e total foi provocado ao instalar sobre as duas células um papel de cor preta e fosca, isolando as bordas com uma fita também de cor preta. Neste sombreamento, diferente do difuso onde há uma pequena radiação, não há nenhuma radiação incidindo sobre as células. A Figura 34 ilustra como foi feito o sombreamento opaco nas células de número dezoito e dezenove do módulo fotovoltaico.

Figura 34 - Testes em módulo fotovoltaico com duas células sombreadas, afetando os dois arranjos série (sombreamento opaco)



Fonte: produção do próprio autor.

- módulos com sombreamento parcial: a última etapa consistiu em provocar um sombreamento parcial nos módulos e traçar suas curvas. O efeito foi provocado por um anteparo colocado entre o módulo e a direção da radiação solar, provocando o sombreamento de 50 % da célula de número 1, conforme nos mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Testes em módulo fotovoltaico com sombreamento parcial



Sombreamento em 50%  
da célula 1

Fonte: produção do próprio autor.

Para que as quatro condições testadas pudessem ser comparadas entre si, os testes foram realizados em dias de tempo aberto, e em horários que se mostraram com uma baixa variação de irradiância, entre 12 e 14 horas. O instrumento utilizado para garantir os mesmos níveis de radiação foi o medidor de irradiância da marca Icel modelo SP-2000. As medidas foram realizadas sob o mesmo plano em que se encontravam os módulos fotovoltaicos, e no caso de variações durante os testes, maiores que 5 % na irradiância, os dados coletados foram descartados.

Como os dois módulos se encontram sob a mesma inclinação, durante os testes no módulo 1 as medidas de irradiância foram feitas sobre o módulo 2, e da mesma forma, durante os testes do módulo 2, as medidas ocorreram sobre o módulo 1. Na coleta de dados para o módulo um foi verificada uma irradiância de  $650 \text{ W/m}^2$ , enquanto no módulo 2 a irradiância medida foi de  $630 \text{ W/m}^2$ . A Figura 36 mostra como foi feita a medição da irradiância durante a coleta de dados.

Figura 36 - Medição da irradiância durante os testes



Fonte: produção do próprio autor.

A variação de temperatura foi desconsiderada como fator de influência na coleta de dados, devido ao fato dos módulos estarem em local aberto, com ventilação, irradiância constante, e, a coleta de dados durar cerca de um minuto. Esse tempo não é suficiente para elevar a temperatura do módulo devido ao efeito Joule. Outro motivo para que a variação de temperatura fosse desconsiderada, é devido ao fato do módulo alterar, aproximadamente, cerca de 0,1 V para cada variação de 1 °C na sua temperatura (KYOCERA, 2012).

As medidas de temperatura foram realizadas utilizando a câmera termográfica da marca Irisys modelo IRI4035. Durante a coleta de dados, foi verificada uma temperatura de 52,7 °C no módulo 1, e 53,3 °C no módulo 2.

### **4.3 Estudo do impacto dos diodos de *bypass* em módulos fotovoltaicos**

Como abordado na subseção 2.2, o diodo de *bypass* é uma solução simples para amenizar os efeitos do sombreamento em módulos fotovoltaicos. Para (VILLALVA; GAZOLI, 2012) o ideal seria um diodo para cada célula. Alguns trabalhos como (ZHENG et al., 2014) mostram, através de simulações, que um menor número de células por diodo, aumenta a potência fornecida nos casos de sombreamento parcial do módulo.

Com o objetivo de verificar a efetividade dos diodos de *bypass* sob sombreamento, este trabalho propõe a montagem de um módulo fotovoltaico com quinze células fotovoltaicas interligadas em série. Para a construção do painel foram utilizadas células monocristalinas disponíveis no mercado nacional, com corrente de curto circuito de 8,88 A, tensão de circuito aberto de 0,62 V, e potência máxima de 4,39 W (BSOLAR, 2016). Estas células possuem uma eficiência de aproximadamente 18,39 %. O conjunto de quinze células totaliza uma tensão de 9,3 V com circuito aberto, e potência máxima de 65,85 W. As células foram montadas sobre uma base de madeira, recoberta com EVA, e interligadas eletricamente através de fitas estanhadas, como ilustra a Figura 37.

Figura 37 - Montagem do Painel Fotovoltaico



Fonte: produção do próprio autor.

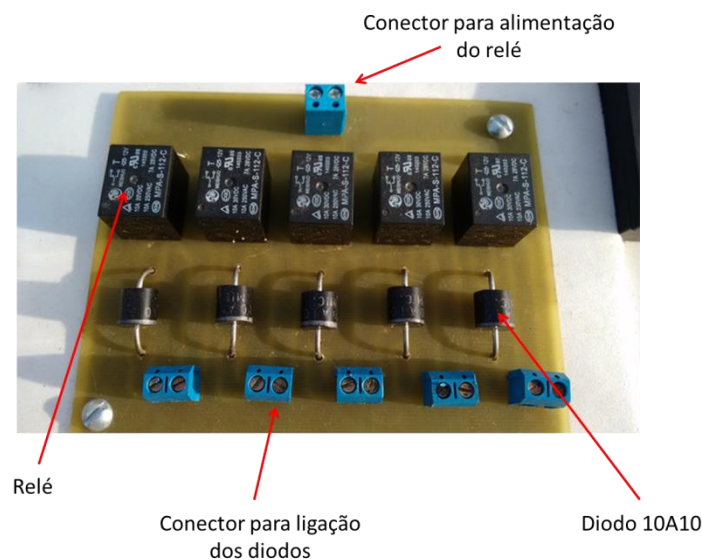
Para verificar a efetividade na utilização de diodos de *bypass*, foram instalados no módulo quinze diodos, que podem ser interligados em paralelo a diferentes números de células, através de conexões de cabos flexíveis. Os diodos utilizados na montagem do módulo foram diodos retificadores de silício com corrente direta de 10 A (RECTRON, 2016), da família 10AXX, especificamente o 10A10. A escolha desta família e diodos é justificada principalmente pela sua capacidade de condução de corrente direta. Como as células fornecem

uma corrente máxima de 9,2A, os diodos devem ser capazes de conduzir uma corrente igual ou maior que 9,2 A, pois caso contrário, há o risco de serem danificados.

O diodo 10A10 suporta uma tensão reversa máxima de 1000 V, e tensão direta de 1 V a uma corrente de 10 A (RECTRON, 2016). Embora a família 10AXX possua outros diodos com tensões reversas menores, de (50 a 800) V, e a tensão reversa máxima no módulo montado não passe de 10V, o diodo 10A10 foi utilizado por ser de fácil aquisição no mercado de componentes eletrônicos, além de um baixo custo.

Independente da quantidade de células às quais estão ligados, os diodos podem ser inseridos ou retirados do circuito através de contatos de relés. Cada diodo é ligado em série com um contato normalmente aberto de um relé, que quando alimentado com uma tensão externa de 12 V, faz a conexão com as células. Sem alimentação no relé, os diodos ficam desconectados do módulo. Dessa forma, pode-se fazer a comparação do funcionamento do módulo com e sem os diodos de *bypass*. Os diodos e relés foram montados em três placas de circuito impresso, cada uma delas podendo ser interligada a até cinco células do módulo, conforme ilustra a Figura 38.

Figura 38 - Placa de relés e diodos

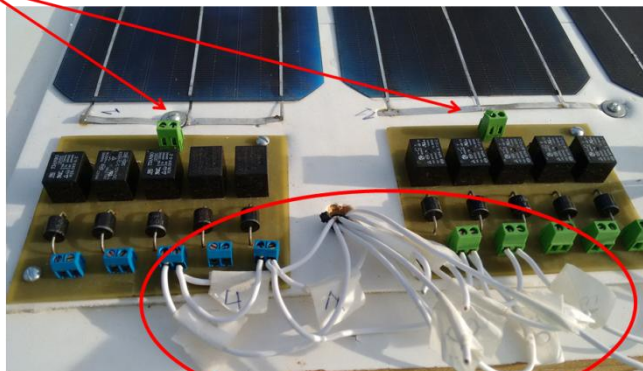


Fonte: produção do próprio autor.

A ligação dos diodos com as células é feita através de cabos flexíveis, que estão conectados a pontos de conexões entre as células do módulo, como ilustrado pela Figura 39. Desta forma pode-se interligar diferentes números de células aos diodos.

Figura 39 - Interligação dos diodos de *bypass* com as células

Ponto de conexão nas células

Cabos de conexão dos diodos  
com as células

Fonte: produção do próprio autor.

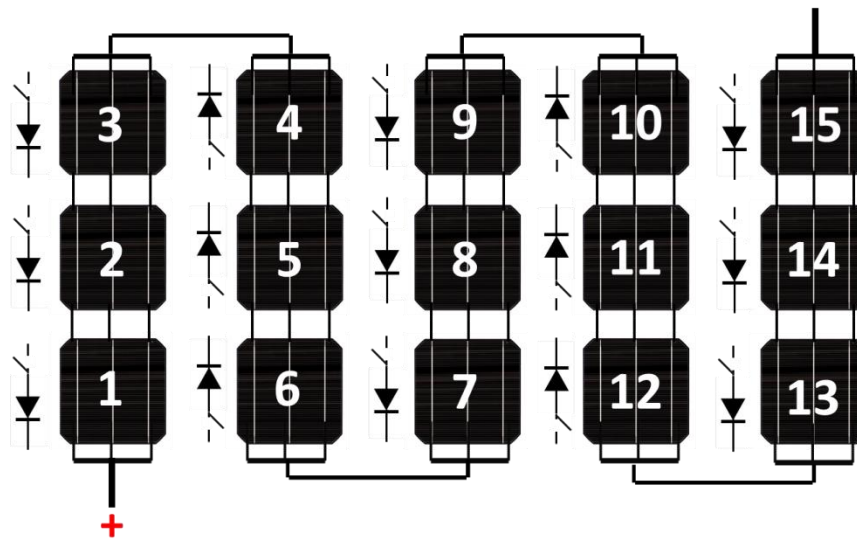
Os testes realizados no módulo montado ocorreram para duas diferentes configurações: a primeira com um diodo para cada célula, e a segunda com um diodo para cada grupo de três células. O objetivo destes testes é verificar qual configuração tem melhor rendimento sob condições de sombreamento.

#### 4.3.1 Módulo na configuração de um diodo de *bypass* para cada célula

Na primeira configuração testada, foi interligado em paralelo um diodo de *by-pass* a cada uma das quinze células do módulo. As células foram numeradas de acordo com o diagrama ilustrado na Figura 40 de forma a identifica-las durante os testes propostos.



Figura 40 - Diagrama do módulo fotovoltaico montado com um diodo por célula

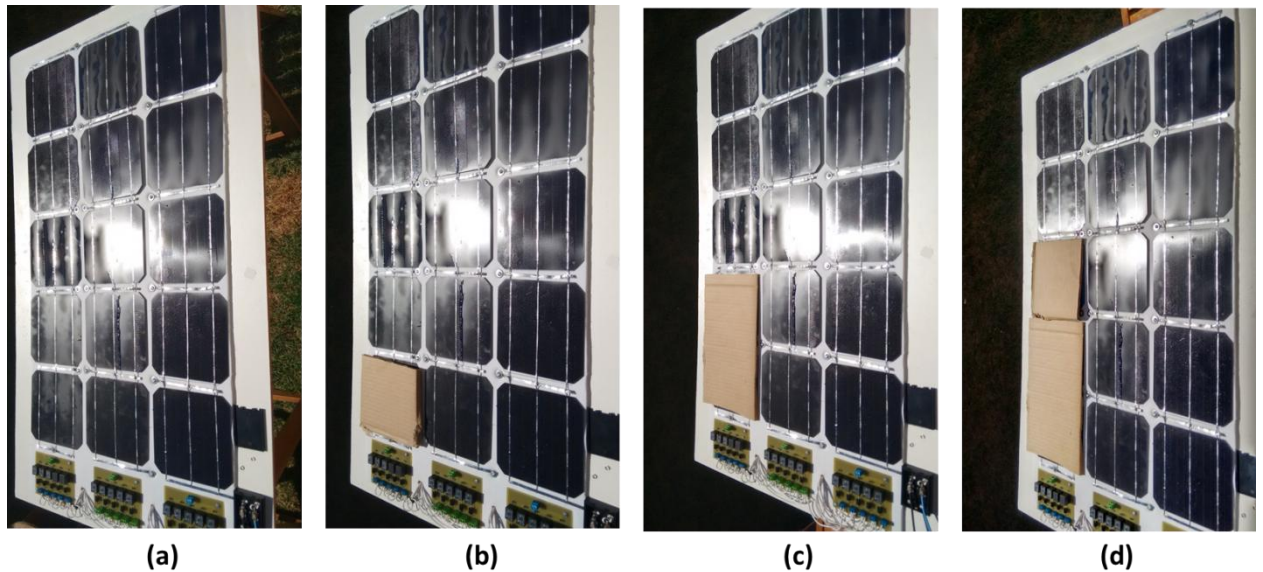


Fonte: produção do próprio autor.

Os experimentos realizados nesta configuração do módulo consistem em sombrear totalmente diferentes quantidades de células nas duas condições: com e sem os diodos de *bypass*. No caso dos diodos de *bypass* desligados do circuito do módulo, apenas uma célula sombreada provoca grande, ou total, perda de potência fornecida.

Com os diodos interligados ao circuito do módulo, o sombreamento foi realizado de forma gradual, ou seja, as células foram sendo sombreadas uma a uma. Os ensaios se iniciam com a coleta de dados do módulo sem sombreamento, onde são traçadas as curvas  $P-V$  e  $I-V$  para comparação com as outras condições de sombra. O passo seguinte foi a inserção gradual de sombreamento nas células no módulo, iniciando com uma célula, em seguida duas, e terminando com três células sombreadas (células de número 1 a 3). Para esta condição de teste, os relés foram alimentados com 12 V através de uma fonte externa de alimentação, conectando assim os diodos a cada uma das quinze células. A Figura 41 demonstra as condições de sombreamento testadas, sob irradiância de  $678 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $51,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Figura 41 - Testes realizados com o painel montado, sem sombreamento (a), uma célula sombreada (b), duas células sombreadas (c), e três células sombreadas (d)

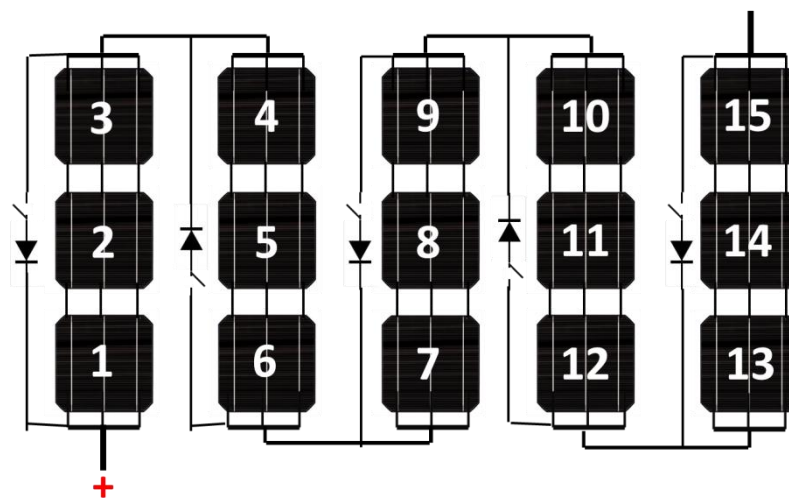


Fonte: produção do próprio autor.

### 4.3.2 Módulo na configuração de um diodo de *bypass* para cada conjunto de três células

A segunda configuração testada foi com a ligação de um diodo para cada grupo de três células ligadas em série, conforme ilustrado pelo diagrama da Figura 42.

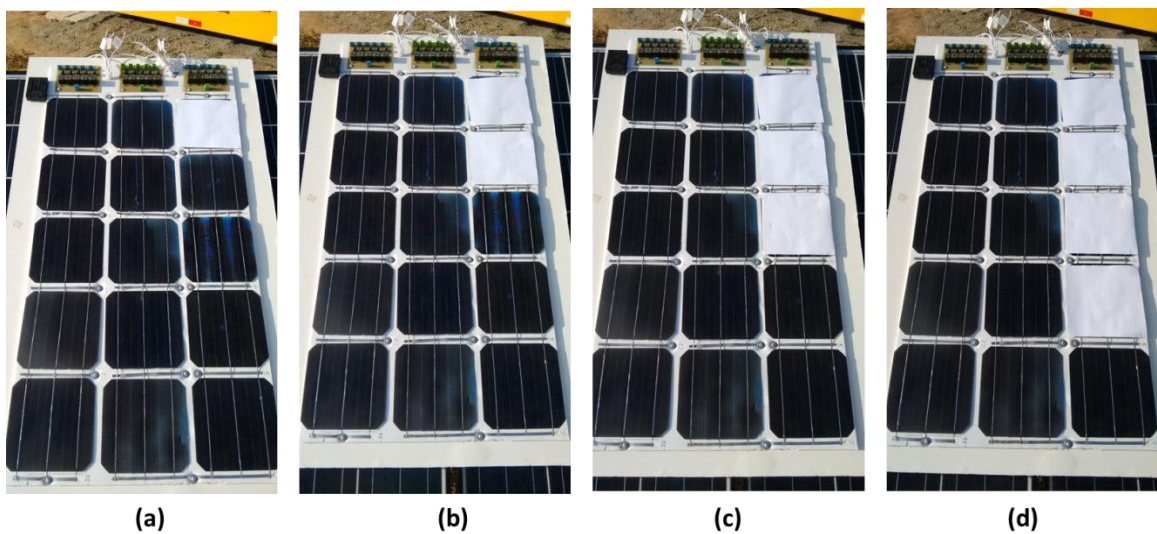
Figura 42 - Diagrama do módulo fotovoltaico montado com um diodo para cada três células



Fonte: produção do próprio autor.

Com esta configuração do módulo, além da coleta de dados na condição sem sombreamento, foram coletados dados em outras quatro diferentes condições: sombreamento em uma, duas, três e quatro células. As células sombreadas foram as de número 1 ao 4, como mostra a Figura 43. Durante estes ensaios a irradiância medida foi de  $541\text{W/m}^2$ , com uma temperatura de  $44,5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Figura 43 - Testes realizados com o painel montado, uma célula sombreada (a), duas células sombreadas (b), três células sombreadas (c), e quatro células sombreadas (d)



Fonte: produção do próprio autor.

## Capítulo 5: Resultados

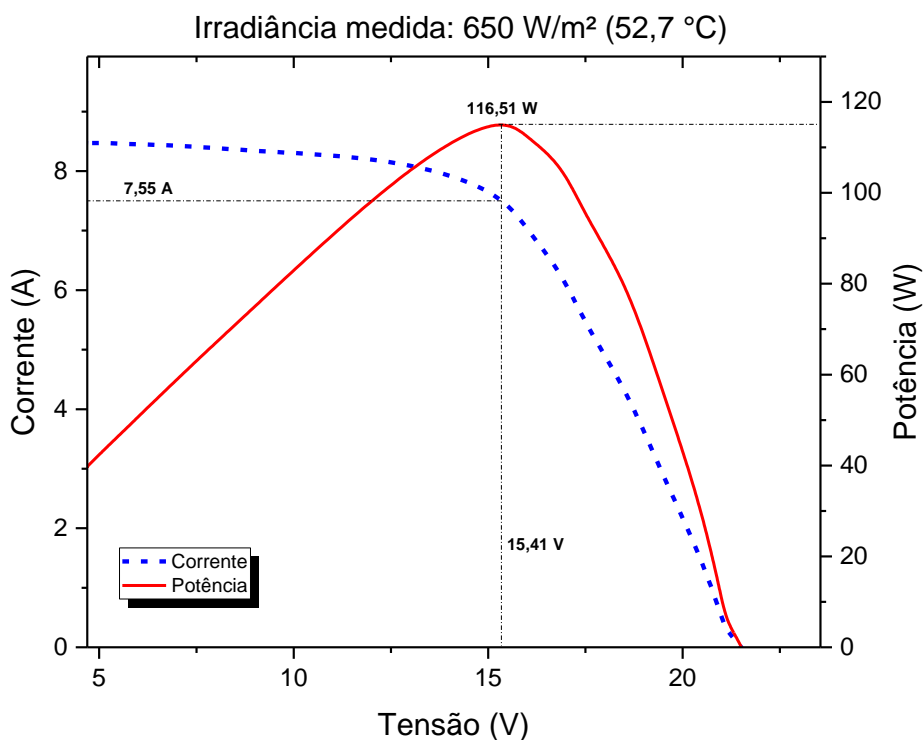
Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos de acordo com os testes descritos nas seções 4.2 e 4.3.

### 5.1 Impacto do Sombreamento sobre Módulos Comerciais

Os módulos da marca Kyocera, modelo KD135SX-UPU, foram testados ao sombreamento no dia 11/02/2016, no período entre as 12 e 14 horas. Durante os testes no módulo 1, a irradiância medida foi de  $650 \text{ W/m}^2$  e uma temperatura de  $52,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto o módulo 2 foi submetido a uma irradiância de  $630 \text{ W/m}^2$  a uma temperatura de  $53,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A Figura 44 ilustra as curvas  $I-V$  (em azul tracejado) e  $P-V$  (em vermelho sólido) do módulo 1 sem sombreamento, onde a máxima potência atingiu  $116,51 \text{ W}$ , para uma tensão e corrente elétrica de  $15,41 \text{ V}$  e  $7,55 \text{ A}$ , respectivamente.

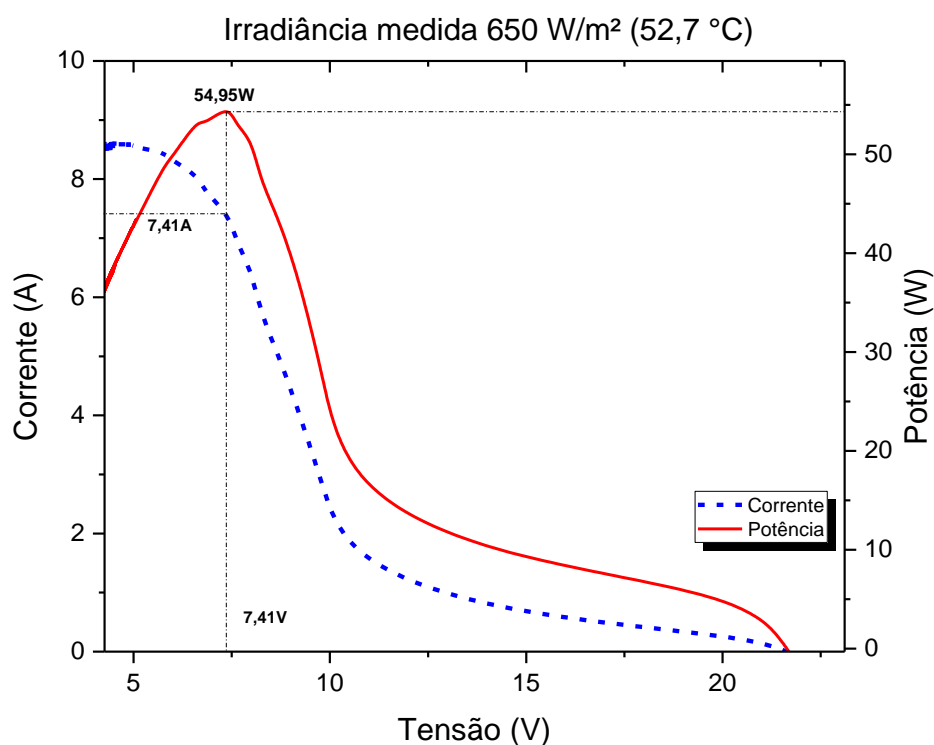
As curvas do módulo sem sombreamento servirão como base de comparação com os três sombreamentos propostos pelo trabalho. Uma observação importante a ser feita é sobre o fato das curvas não apresentarem o ponto de curto circuito do módulo, onde a corrente é máxima e a tensão mínima ( $0 \text{ V}$ ). Como exposto na seção 4.1, o objetivo do trabalho não é caracterizar os módulos, e sim avaliar o efeito do sombreamento, principalmente sobre o ponto de máxima potência.

Figura 44 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo 1 sem sombreamento

Fonte: produção do próprio autor.

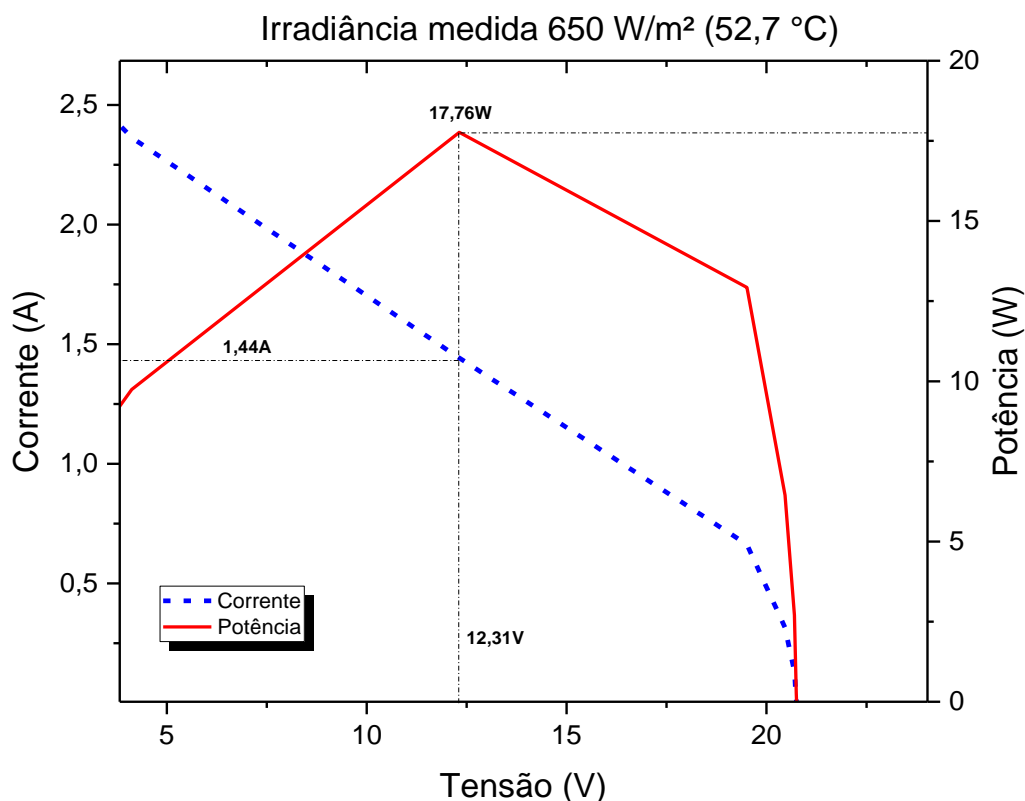
Com uma célula sombreada, Figura 45, o módulo apresenta uma grande redução na máxima potência fornecida, atingindo o valor de 54,95 W, sob tensão e corrente elétrica de 7,41 V e 7,41 A, respectivamente.

Comparando as curvas sem sombreamento e com sombreamento em uma célula, é possível verificar que a tensão para a máxima potência, no segundo caso, é aproximadamente 50 % menor, e que a corrente pouco se altera. Neste caso, percebe-se que apenas metade do módulo está fornecendo potência, e tal fato pode ser explicado pela atuação do diodo de *bypass*. Como uma célula não recebe radiação solar, esta se comporta como um diodo aberto, impedindo que as outras dezesseis células do arranjo em série forneçam corrente elétrica. O diodo de *bypass* cria um desvio para o fluxo de elétrons, permitindo que o segundo arranjo de quinze células série continue fornecendo potência. Dessa forma, os dados coletados neste ensaio foram de apenas uma metade do módulo, uma vez que a outra estava desligada pelo diodo, devido ao sombreamento de uma de suas células.

Figura 45 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo 1 com sombreamento em uma célula

Fonte: produção do próprio autor.

A Figura 46 ilustra as curvas  $I-V$  e  $P-V$  quando duas células, uma de cada arranjo série, estão sombreadas. Sob esta configuração de sombreamento percebe-se uma drástica redução na potência fornecida pelo módulo, chegando a um valor máximo de 17,76 W, com tensão e corrente elétrica de 12,31 V e 1,44 A, respectivamente. Por se tratar de um sombreamento difuso, conforme descrito na seção 3.1, há uma radiação muito pequena incidindo sobre as células sombreadas, capaz de produzir um baixo fluxo de elétrons. Desta forma, todas as outras células têm sua corrente limitada pelas células sombreadas. Nesta configuração de sombreamento, como os dois arranjos série do módulo estão limitados pelas duas células afetadas, os diodos de *bypass* continuam com a polarização reversa, e não conduzem. Os diodos só iriam atuar no caso do módulo ensaiado estar ligado em série com outros módulos, pois assim, ocorreria a diferença de potencial necessária para polarizá-los diretamente.

Figura 46 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo 1 com sombreamento em duas células

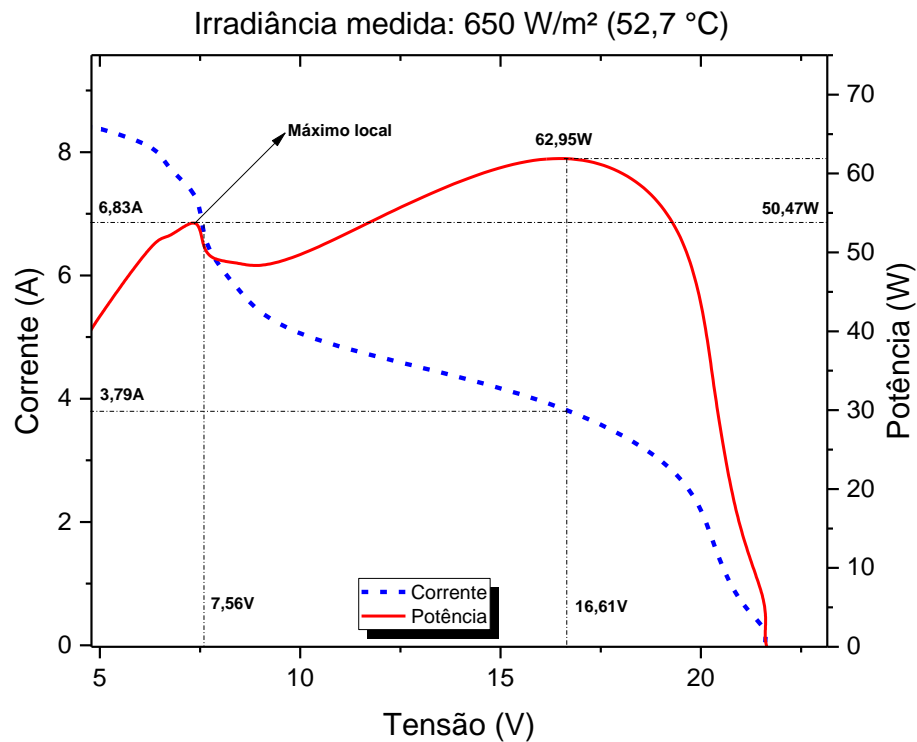
Fonte: produção do próprio autor.

Com o sombreamento parcial de 50 % de uma célula, percebe-se que a curva  $P-V$  apresentou dois picos. O primeiro, destacado na Figura 47 como máximo local, apresenta uma potência máxima de 50,47 W para uma corrente elétrica de 6,83 A e tensão de 7,56 V. Comparando esta primeira parte da curva, com a curva da Figura 45, percebe-se uma grande semelhança nas características das duas, uma vez que a corrente fornecida é próxima da nominal e a tensão cerca de 50 % da nominal (módulo sem sombreamento). Neste ponto de operação se pode concluir que o diodo de *bypass* está conduzindo, deixando apenas a parte não sombreada fornecer potência à carga.

A partir deste ponto de máximo local, o diodo de *bypass* começa a ser polarizado reversamente, saindo da região de condução para a de corte, perceptível na curva  $I-V$  através da queda no valor da corrente. Quando o diodo deixa de conduzir, eliminando assim o desvio do arranjo com a célula sombreada, a corrente fornecida pelo módulo fica limitada ao máximo que esta célula pode fornecer. Sob estas condições a potência máxima fornecida pelo módulo atinge o valor de 62,95 W, para valores de tensão e corrente elétrica de 16,61 V e 3,79 A, respectivamente. Como a área iluminada é reduzida a 50 %, a corrente máxima fornecida é

metade daquela quando o módulo encontra-se sem nenhum sombreamento, enquanto a tensão permanece com valores aproximados à condição sem sombreamento.

Figura 47 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo 1 com sombreamento parcial de 50 % em uma célula

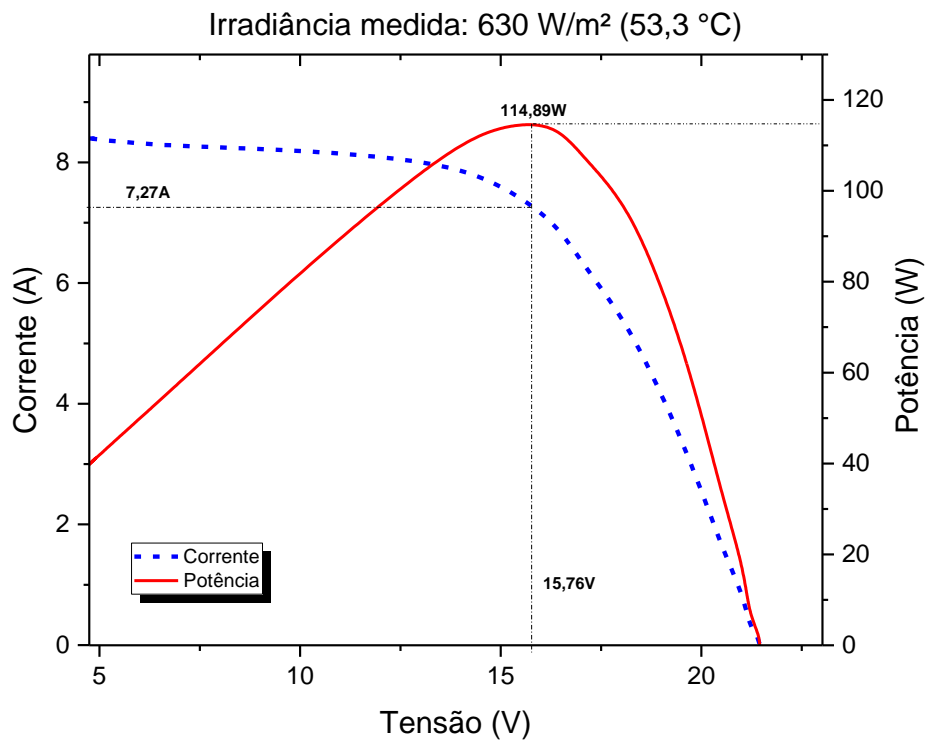


Fonte: produção do próprio autor.

Os mesmos procedimentos de testes foram repetidos no módulo 2, sendo os resultados obtidos apresentados a seguir. A Figura 48 exibe as curvas  $I-V$  e  $P-V$  deste módulo sem sombreamento, onde apresentou uma potência máxima de 114,89 W, para uma tensão de 15,76 V e corrente de 7,27 A. Comparando com o módulo 1, os valores são menores devido à menor irradiância e maior temperatura nestes testes. Estes valores obtidos serão utilizados para a comparação com as outras três condições de sombreamento.



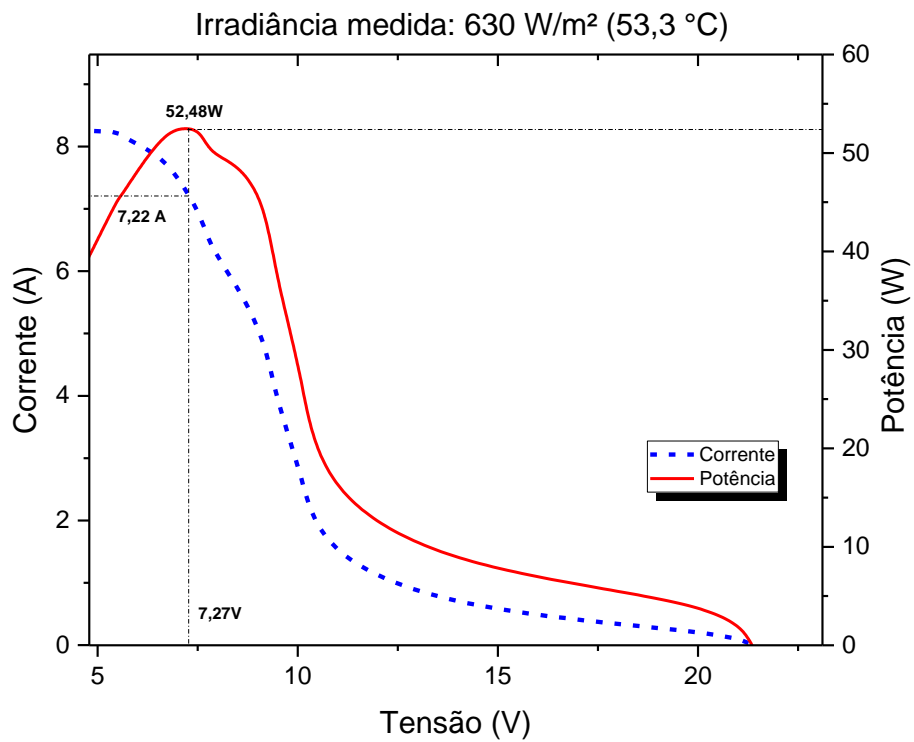
Figura 48 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo 2 sem sombreamento



Fonte: produção do próprio autor.

Com uma célula sombreada, o módulo 2 apresentou uma máxima potência de 52,48 W com tensão e corrente de 7,27 V e 7,22 A, respectivamente. Estes resultados apresentaram uma diferença menor que 5 %, em relação aos apresentados pelo módulo 1, comprovando o efeito deste tipo de sombreamento. Da mesma forma que no primeiro caso, o diodo de *bypass* ligado ao arranjo série em que a célula foi sombreada, cria um desvio para a corrente elétrica do outro arranjo (sem células sombreadas), mantendo assim apenas uma metade do módulo fornecendo potência à carga. A Figura 49 ilustra as curvas  $I-V$  e  $P-V$  para o módulo 2 com uma célula sombreada.

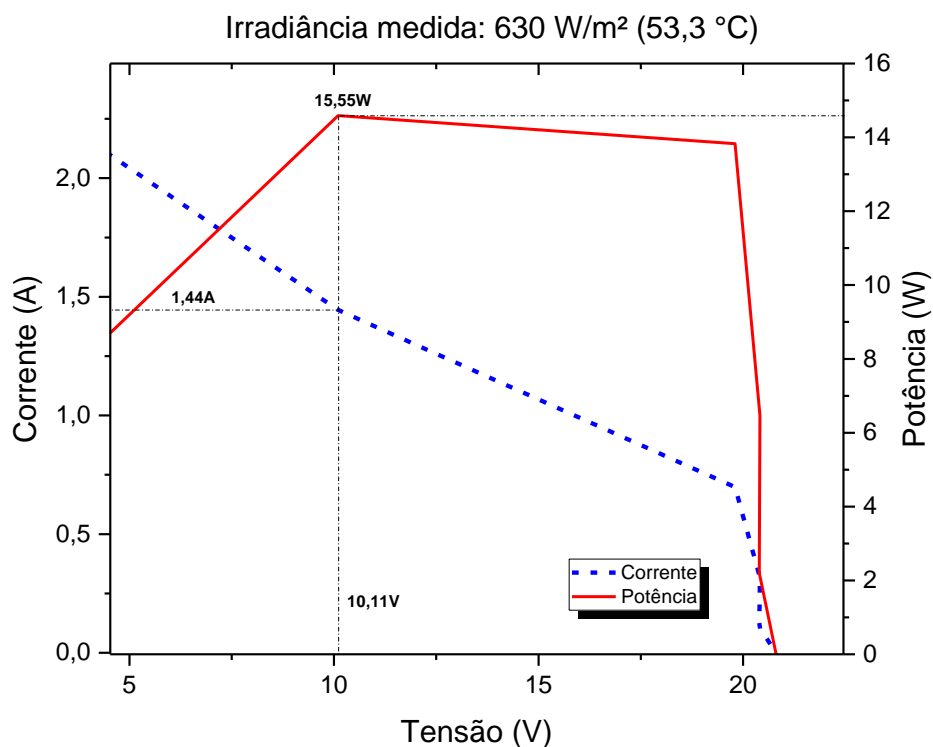
Figura 49 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo 2 com sombreamento em uma célula



Fonte: produção do próprio autor.

Ao sombrear duas células do módulo 2 de diferentes arranjos série, se pode verificar, assim como no primeiro caso, uma brusca queda na potência de saída, com baixos níveis de corrente fornecida. Neste teste a máxima potência atingiu o valor de 15,55 W, com tensão de 10,1 V e corrente de 1,44 A, conforme mostram as curvas da Figura 50.

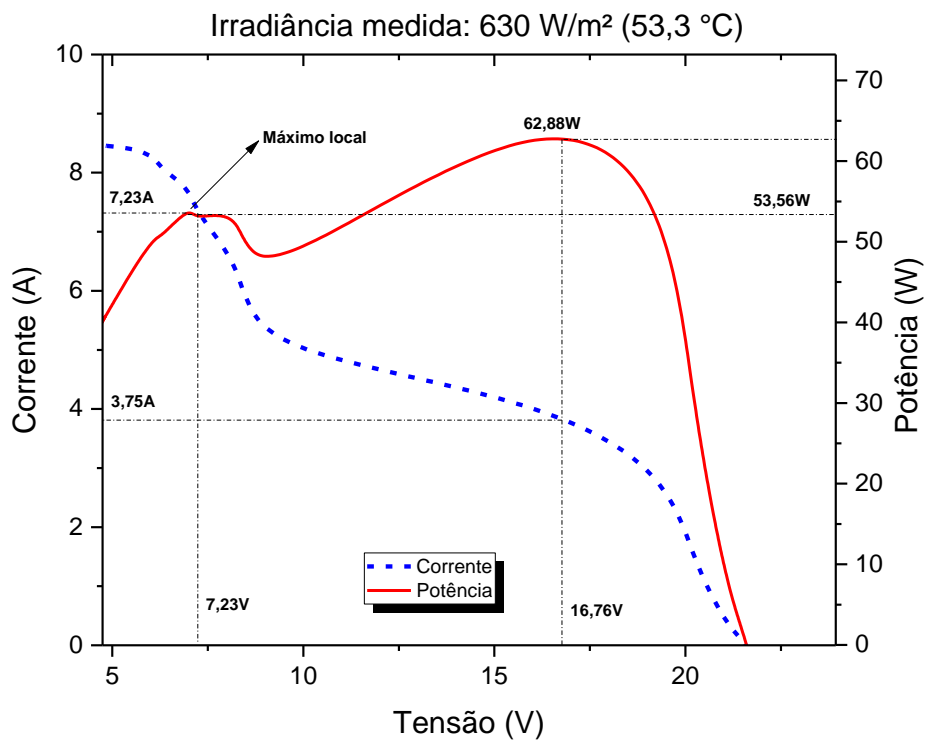
Figura 50 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo 2 com sombreamento em duas células



Fonte: produção do próprio autor.

Com o sombreamento parcial de 50 %, o comportamento foi similar ao primeiro módulo. Verifica-se um máximo local com potência de 53,56 W, com tensão de 7,23 V e corrente 7,23 A. Até este ponto percebe-se que o diodo de *bypass* está em operação e, a partir daí, passa para a região de corte, limitando a corrente fornecida pelo módulo, e consequentemente a potência. A máxima potência que o módulo fornece alcança o valor de 62,88 W, quando tensão e corrente atingem, respectivamente, 16,76 V e 3,75 A. Neste caso, a corrente quando o diodo deixa de conduzir também se reduz aproximadamente 50 % do seu valor, quando não sombreada. A Figura 51 exibe as curvas  $I-V$  e  $P-V$ , para este sombreamento.

Figura 51 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo 2 com sombreamento parcial de 50 % em uma célula



Fonte: produção do próprio autor.

As Tabela 1 e 2 resumem os resultados levantados durante os testes no módulo 1 e no módulo 2, respectivamente. Além dos valores para a máxima potência, destacam-se as variações na máxima potência fornecida ( $\Delta P$ ), na tensão ( $\Delta V$ ) e na corrente ( $\Delta I$ ).

Tabela 1 - Resumo dos resultados do módulo 1.

Tipo de Sombreamento	Máxima Potência (W)	Tensão para Máxima Potência (V)	Corrente para Máxima Potência (A)	$\Delta P$	$\Delta V$	$\Delta I$
Sem sombreamento	116,51	15,41	7,55	-	-	-
Sombreamento em uma célula	54,95	7,41	7,41	-52,8 %	-51,9 %	-1,8 %
Sombreamento em duas células	17,76	12,31	1,44	-84,7 %	-20,1 %	-80,9 %
Sombreamento parcial 50 %	62,95	16,61	3,79	-45,9 %	7,7 %	-49,8 %

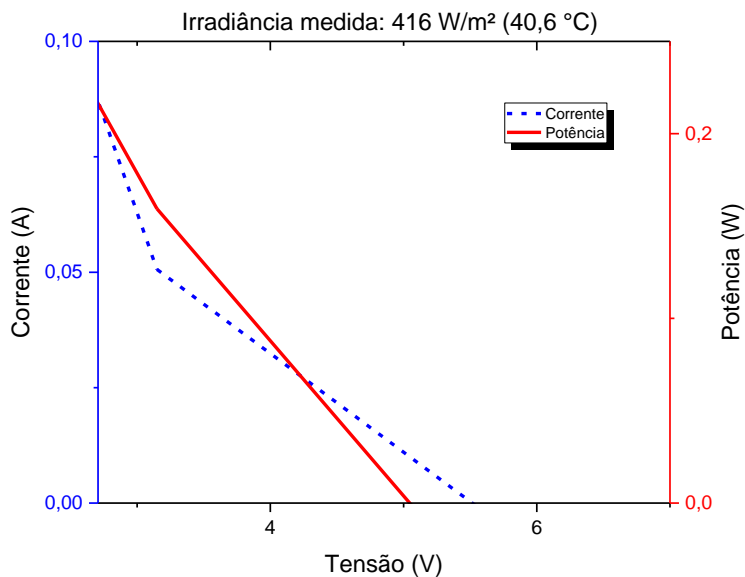
Tabela 2 - Resumo dos resultados do módulo 2.

Tipo de Sombreamento	Máxima Potência (W)	Tensão para Máxima Potência (V)	Corrente para Máxima Potência (A)	$\Delta P$	$\Delta V$	$\Delta I$
Sem sombreamento	114,89	15,76	7,27	-	-	-
Sombreamento em uma célula	52,48	7,27	7,22	-54,3 %	-53,8 %	-0,7 %
Sombreamento em duas células	15,55	10,1	1,44	-86,4 %	-35,9 %	-80,1 %
Sombreamento parcial 50 %	62,88	16,76	3,75	-45,2 %	6,3 %	-48,4 %

Comparando as duas tabelas, observa-se que os módulos se comportaram de maneira similar, apresentando uma maior divergência apenas quanto à variação da tensão para máxima potência, quando duas células foram sombreadas. Devido o sombreamento difuso, os níveis de radiação incidentes, embora muito baixos, não são perfeitamente iguais nos dois módulos, provocando então a diferença explicitada. Para verificar esta afirmação, foi feito o sombreamento opaco nas duas células, onde um papel de cor preta e opaca, não permite que nenhum nível de radiação incida sobre as células.

As curvas da Figura 52 exibem o resultado do sombreamento opaco em duas células, de diferentes arranjos série, do módulo 1. Como esperado a potência e a corrente fornecida pelo módulo são praticamente zero, pois as células sombreadas estão funcionando como um diodo aberto, impedindo que as outras células forneçam corrente.

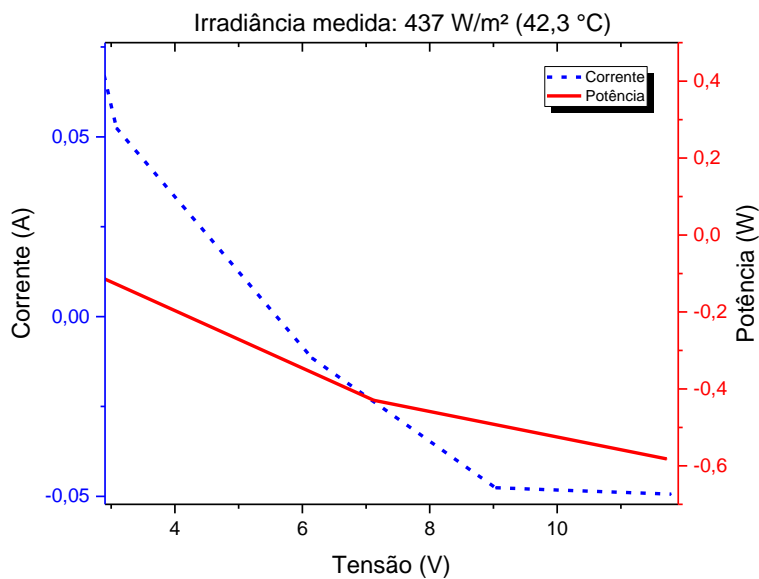
Figura 52 - Curvas I-V e P-V, módulo 1 com sombreamento opaco em duas células



Fonte: produção do próprio autor.

O mesmo resultado é observado para o módulo 2, de acordo com as curvas da **Erro!**  
**Fonte de referência não encontrada..**

Figura 53 - Curvas I-V e P-V, módulo 2 com sombreamento opaco em duas células.

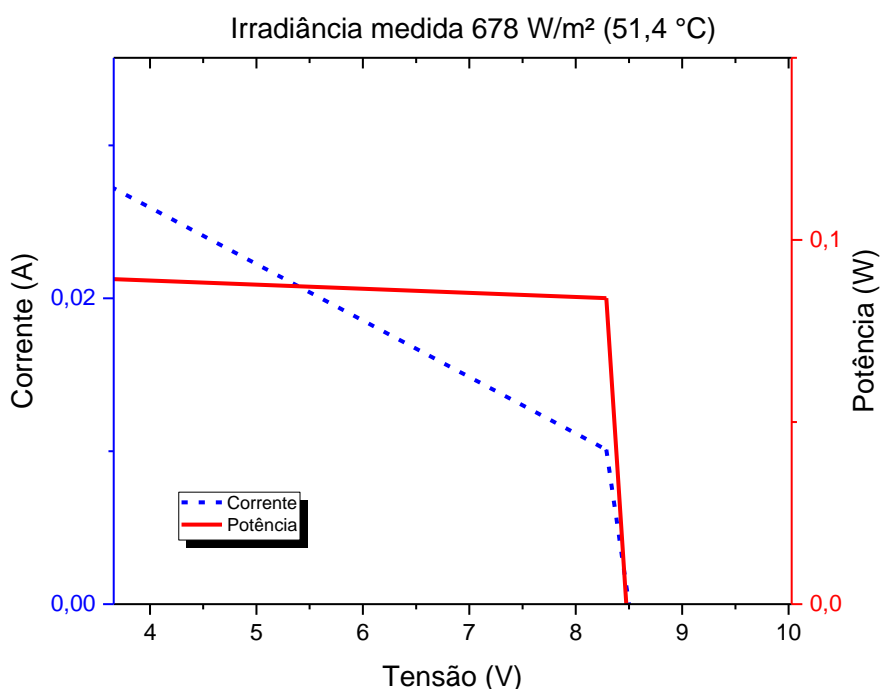


Fonte: produção do próprio autor.

## 5.2 Impactos do Sombreamento sobre o Módulo Montado

A primeira condição testada no módulo montado foi o sombreamento de uma célula, sem os diodos de *bypass* conectados às células. De acordo com o esperado, como não existem diodos conectados ao módulo possibilitando a polarização direta dos diodos, e criar um desvio para a corrente, a potência fornecida pelo módulo e a corrente são praticamente zero, conforme ilustra a Figura 54.

Figura 54 - Curvas *I-V* e *P-V*, módulo montado, sem diodos de *bypass*, com sombreamento em uma célula



Fonte: Produção do próprio autor.

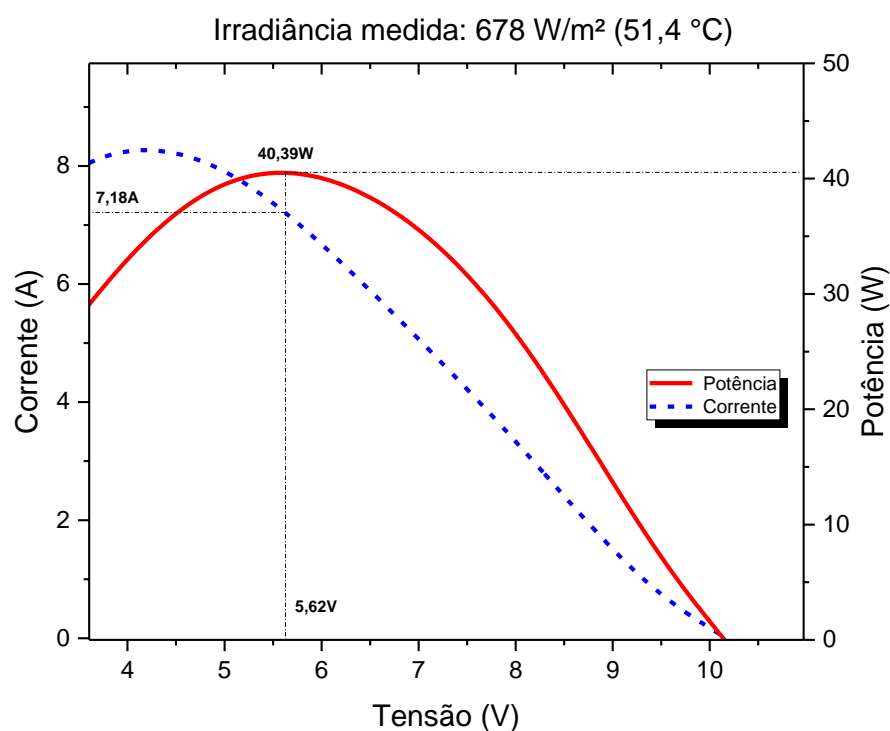
### 5.2.1 Módulo com um diodo para cada célula

A Figura 55 ilustra o comportamento do módulo montado sem sombreamento em suas células. Com todas as células recebendo uma irradiância de 678 W/m<sup>2</sup>, a uma temperatura de 51,4 °C, o módulo montado apresentou uma potência máxima fornecida de 40,38 W, com valores de tensão e corrente de 5,82 V e 7,18 A, respectivamente. Através das especificações

das células utilizadas na confecção do módulo, sua potência máxima sob condições de teste padrão, ou seja,  $1000\text{W/m}^2$  a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , deveria ser algo em torno de  $65,85\text{ W}$ . A diferença entre o valor especificado e o medido se dá principalmente pela menor irradiância sob o módulo montado. Outro fator que também contribuiu para este resultado é a resistência elétrica das malhas condutoras que interligam as células, que diminui o fluxo de corrente fornecida.

Embora os valores estejam abaixo daqueles esperados pela especificação das células, são utilizados como referência para comparar com as demais situações de sombreamento, quando uma, duas e três células são sombreadas.

Figura 55 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo montado sem sombreamento



Fonte: Produção do próprio autor.

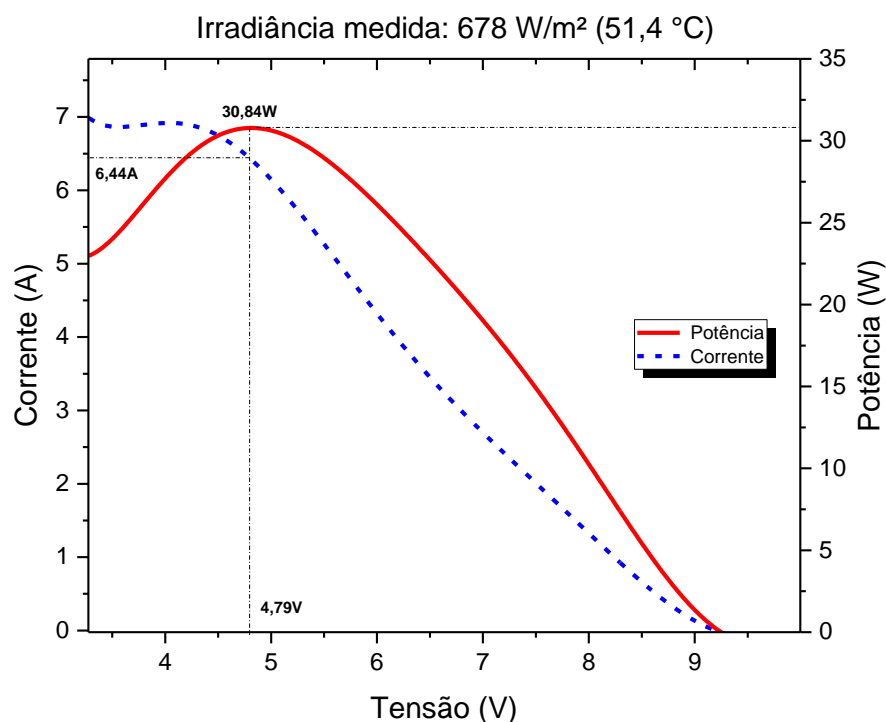
Com uma das células sombreadas, Figura 56, a máxima potência fornecida pelo módulo atingiu  $30,84\text{ W}$ , a uma tensão de  $4,79\text{ V}$  e corrente de  $6,44\text{ A}$ . Embora a potência máxima tenha reduzido  $23,64\%$ , percebe-se que o diodo de *bypass* ligado em paralelo com a célula sombreada está polarizado diretamente, e desviando o caminho da corrente fornecida



pelo módulo. A conclusão de que o diodo está realizando sua função no circuito pode ser estabelecida através da comparação da corrente que o módulo fornece, que embora menor quando na situação sem sombreamento, continua com valores próximos. A queda na corrente se dá pelo fato do diodo apresentar uma resistência interna que limitará a corrente do módulo, além das resistências das conexões e condutores que interligam os diodos às células.

A variação de potência em relação ao módulo sem sombreamento, que em teoria, deveria ficar em torno de 6,67 % (percentual equivalente à potência que a célula sombreada deixa de fornecer ao conjunto, um quinze avos do total), atinge 23,64 %, pois além da célula não fornecer a tensão ao conjunto, o diodo provoca uma queda de tensão de aproximadamente 0,7 V. Além deste fator, a limitação da corrente pelas resistências adicionadas ao circuito (diodo, conexões e condutores) também influencia na redução da potência fornecida.

Figura 56 - Curvas I-V e P-V, módulo montado com sombreamento em uma célula

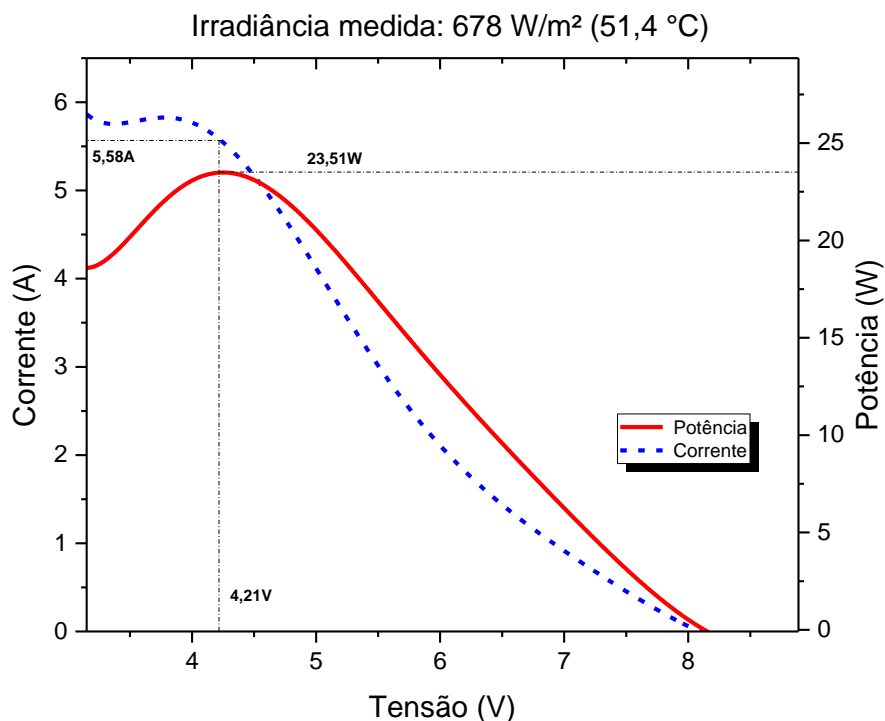


Fonte: Produção do próprio autor.

Ao sombrear duas células do conjunto de quinze, nota-se uma redução de 41,79 % na potência máxima, em relação ao módulo sem sombreamento, e atinge o valor de 23,51 W para a tensão de 4,21 V e corrente de 5,58 A. Mais uma vez percebe-se o funcionamento dos diodos de *bypass*, e nesta configuração não apenas um, mas dois diodos estão conduzindo, e evitando, assim, que a corrente fornecida pelo módulo fique limitada a níveis muito baixos devido ao sombreamento. O fato de dois diodos estarem conduzindo, aumenta ainda mais a limitação de corrente, uma vez que para esta situação suas resistências se somam em série ao circuito do módulo.

Da mesma forma que na situação de sombreamento anterior, a redução da máxima potência se dá às perdas adicionais, quedas de tensão e corrente, provocadas pelo diodo de *bypass*, além das duas células sombreadas não estarem fornecendo tensão. A Figura 57 exibe os resultados apresentados pelo módulo quando duas células foram sombreadas.

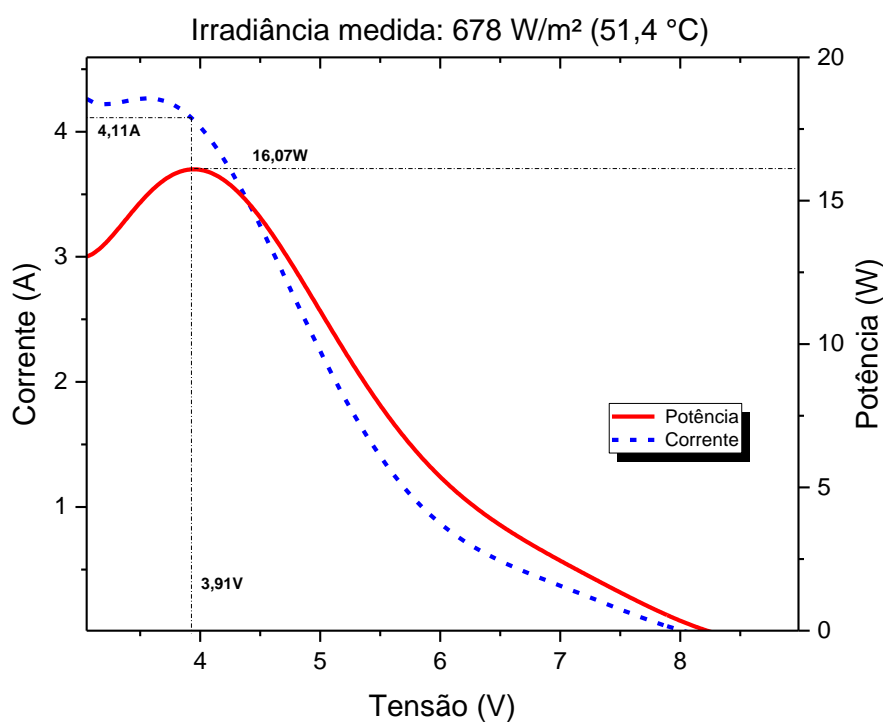
Figura 57 - Curvas *I-V* e *P-V*, módulo montado com sombreamento em duas células



Fonte: Produção do próprio autor.

Aumentando o número de células sombreadas, não é possível verificar uma relação linear, porém, com três células sombreadas as perdas já são aumentadas, atingindo uma redução de 60,21 % na potência máxima. A Figura 58 exibe os resultados quando três células do módulo são sombreadas. Com três células sombreadas a potência máxima atingida foi de 16,07 W, enquanto a tensão e corrente atingiram 3,91 V e 4,11 A, respectivamente. Da mesma forma que nas outras configurações, esses valores foram reduzidos pelas perdas inseridas ao circuito do módulo, que agora possui três diodos em condução.

Figura 58 - Curvas I-V e P-V, módulo montado com sombreamento em três células



Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 3 resume os resultados nos quatro cenários de sombreamento, e mostra as variações de potência, tensão e corrente em relação aos dados do módulo sem sombreamento.

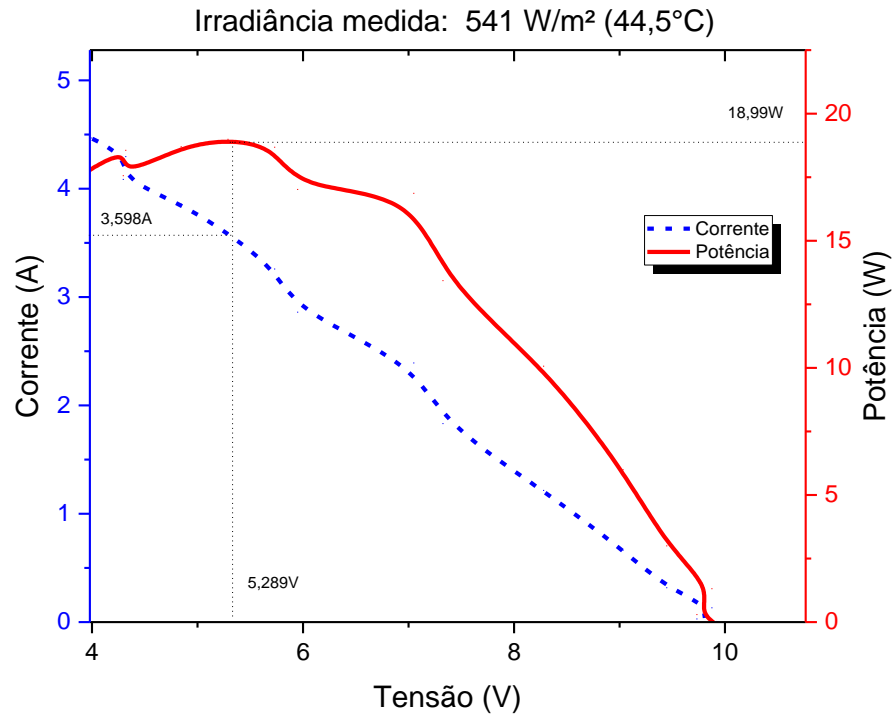
Tabela 3 - Resumo dos resultados do módulo montado com um diodo por célula.

<b>Tipo de Sombreamento</b>	<b>Máxima Potência (W)</b>	<b>Tensão para Máxima Potência (V)</b>	<b>Corrente para Máxima Potência (A)</b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b><math>\Delta V</math></b>	<b><math>\Delta I</math></b>
<b>Sem sombreamento</b>	40,39	5,62	7,18	-	-	-
<b>Sombreamento em uma célula</b>	30,84	4,79	6,44	<b>-23,6 %</b>	<b>-14,7 %</b>	<b>-10,3 %</b>
<b>Sombreamento em duas células</b>	23,51	4,21	5,58	<b>-41,7 %</b>	<b>-25,0 %</b>	<b>-22,2 %</b>
<b>Sombreamento em três células</b>	16,07	3,91	4,11	<b>-60,2 %</b>	<b>-30,4 %</b>	<b>-42,7 %</b>

### 5.2.2 Módulo com um diodo para cada conjunto de três células

No primeiro teste realizado para o módulo montado na configuração de três células para cada diodo, o mesmo foi exposto a uma irradiância de 541 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 44,5 °C, sem nenhum sombreamento. Sob estas condições o módulo forneceu uma potência máxima de 18,99 W, com corrente de 3,598 A e tensão de 5,289 V, conforme ilustrado pela Figura 59.

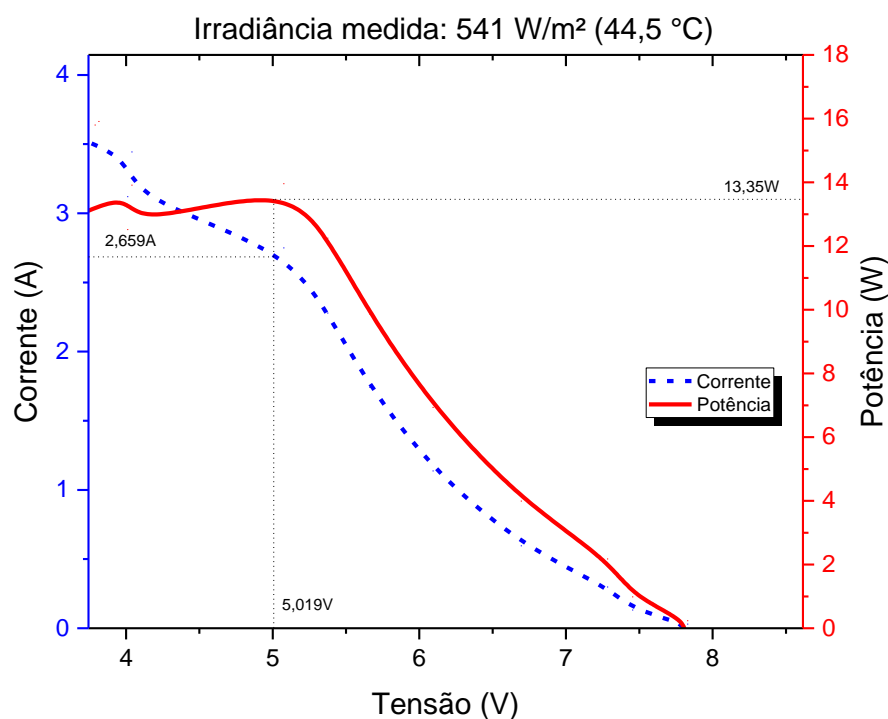
Figura 59 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo montado com três células por diodo, sem sombreamento



Fonte: Produção do próprio autor.

Com uma célula sombreada (número 1), a máxima potência fornecida é reduzida para 13,35 W, cerca de 30 % menor em relação à condição sem sombra. Os níveis de tensão e corrente para esta máxima potência são de 5,019 V e 2,659 A, respectivamente. Como esperado, ocorre uma queda na máxima potência fornecida, porém o módulo continua alimentando a carga devido ao caminho de desvio criado pelo diodo de *by-pass*, como ilustra a Figura 60.

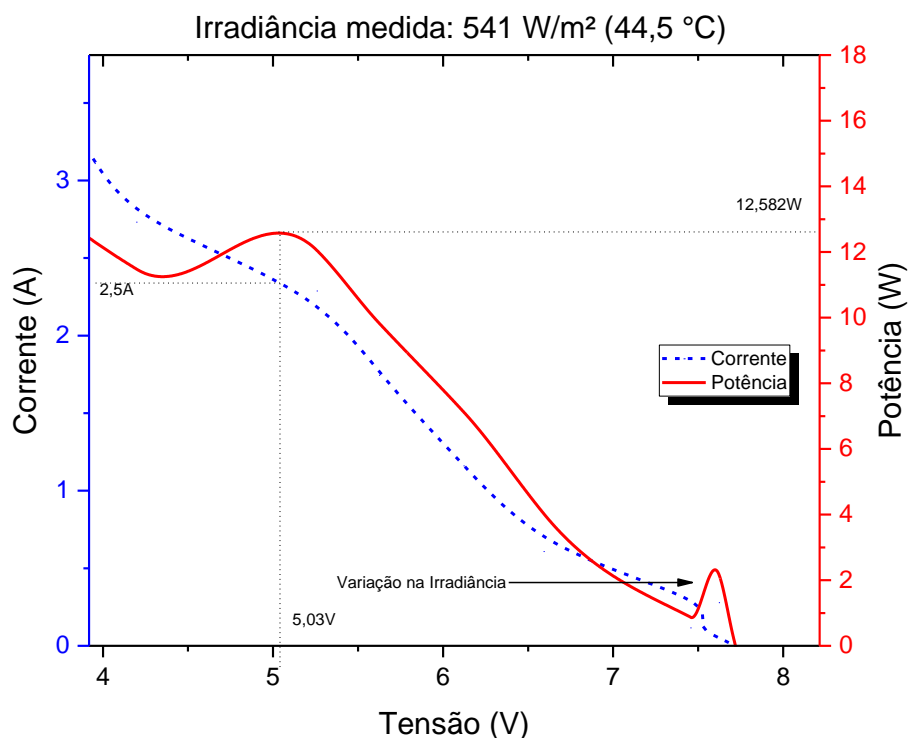
Figura 60 - Curvas  $I-V$  e  $P-V$ , módulo montado com três células por diodo, e sombreamento em uma célula



Fonte: Produção do próprio autor.

Ao sombrear duas células (número 1 e 2), a máxima potência se mantém em torno de 12,58 W, com tensão e corrente de 5,03 V e 2,5 A, respectivamente. Em relação à condição de sombreamento em uma célula, estes valores sofrem pouca variação, devido ao fato do diodo que está desviando o caminho da corrente estar ligado às duas células. Durante a coleta de dados para esta condição, foi observada uma variação positiva na irradiância, fazendo com que ocorra um pico de potência na curva  $P-V$ , quando a tensão se encontra em torno de 7,5 V, conforme destacado na Figura 61. Essa variação não foi considerada como possível fator de descarte dos resultados, por ocorrer longe do máximo de potência, foco deste trabalho.

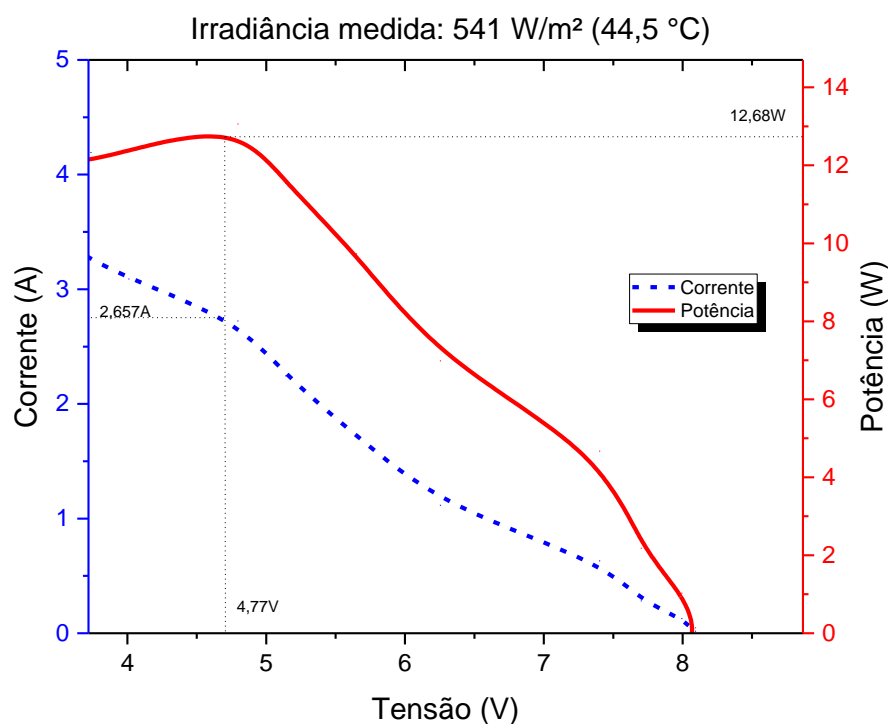
Figura 61 - Curvas I-V e P-V, módulo montado com três células por diodo, e sombreamento em duas células



Fonte: Produção do próprio autor.

Com o sombreamento de três células (número 1 a 3), a máxima potência se mantém em torno de 12,68 W, com tensão e corrente de 4,77 V e 2,65 A, respectivamente. Mais uma vez estes valores se mantêm próximos às condições anteriores (sombreamento em uma e duas células) devido ao fato do diodo que está conduzindo estar ligado às três células. Assim, sob qualquer nível de sombreamento em uma destas três células, o diodo atua isolando-as do módulo, conforme ilustra a Figura 62.

Figura 62 - Curvas I-V e P-V, módulo montado com três células por diodo, e sombreamento em três células

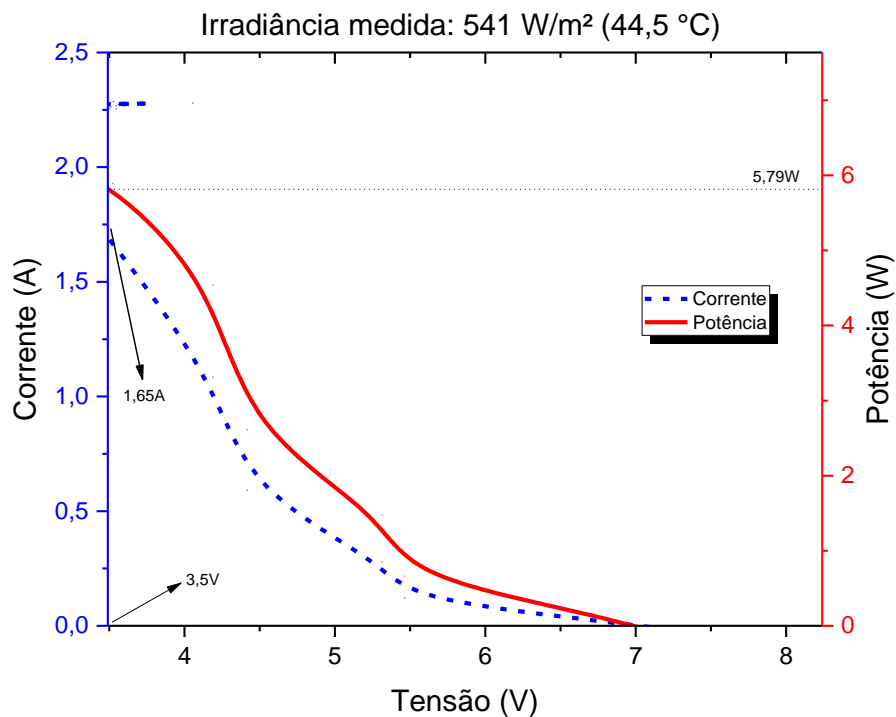


Fonte: Produção do próprio autor.

Sombreamento de quatro células (número 1 a 4) ocorre uma drástica queda na máxima potência fornecida pelo módulo atingindo o valor de 5,79 W, com tensão e corrente de 3,5 V e 1,65 A, respectivamente, conforme a Figura 63. Esta redução ocorre devido ao fato de com o sombreamento de quatro células, dois diodos entram no modo de condução, um desviando o caminho da corrente das células 1 a 3, enquanto o outro atua nas células 4 a 6. Assim, além de seis células não fornecerem potência, a resistência interna dos diodos que estão em condução, limita a corrente fornecida, impactando diretamente na potência.



Figura 63 - Curvas I-V e P-V, módulo montado com três células por diodo, e sombreamento em quatro células



Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 4 faz um resumo dos resultados obtidos sob as quatro condições de sombreamento no módulo com um diodo de *bypass* para cada conjunto de três células ligadas em série.

Tabela 4 - Resumo dos resultados do módulo montado com um diodo para cada três células.

Tipo de Sombreamento	Máxima Potência (W)	Tensão para Máxima Potência (V)	Corrente para Máxima Potência (A)	$\Delta P$	$\Delta V$	$\Delta I$
Sem sombreamento	18,99	5,289	3,598	-	-	-
Sombreamento em uma célula	13,35	5,019	2,659	-29,7 %	-5,1 %	-26,1 %
Sombreamento em duas células	12,582	5,03	2,5	-33,7 %	-4,9 %	-30,5 %
Sombreamento em três células	12,68	4,774	2,657	-33,2 %	-9,7 %	-26,1 %
Sombreamento em quatro células	5,79	3,5	1,65	-69,5 %	-33,8 %	-54,1 %

## Capítulo 6: Considerações Finais e Trabalhos Futuros

### 6.1 Considerações Finais

Pequenas áreas de sombra podem provocar grandes perdas de eficiência aos sistemas de geração fotovoltaica. O sombreamento em uma única célula, de acordo com a configuração dos diodos de *bypass*, pode comprometer a metade do módulo e, caso este sombreamento atinja duas células de diferentes arranjos série, todo o módulo poderá ficar comprometido.

Outro grave problema causado pelo sombreamento, principalmente quando ocorre de forma parcial, é a existência de mais de um pico de potência. O MPPT de um inversor pode considerar um pico de potência como o ponto de máxima potência, mesmo quando este não passa de um falso MPP. Em sistemas de microgeração, este problema pode ser minimizado com a utilização de inversores com mais de uma entrada de MPPT ou microinversores. Com mais de uma entrada de MPPT um inversor pode trabalhar sob a máxima potência de diferentes partes do arranjo de módulos, de forma que a parte sombreada não exerça grande influência no resto do arranjo. No caso de microinversores, apesar do alto custo, pode-se trabalhar individualmente, de forma que cada módulo trabalhe no seu ponto de máxima potência, como propõe Zheng (ZHENG et al., 2014).

Os diodos de *bypass* mostraram sua eficácia na minimização dos efeitos do sombreamento, uma vez que ao sombrear uma célula, nos testes realizados com os módulos Kyocera KDSX135-UPU, apenas uma metade do módulo deixa de funcionar. Caso as células estivessem interligadas sem este componente, a potência produzida pelo módulo sofreria uma queda considerável, reduzindo a valores muito baixos, prejudicando, assim, todo o sistema de microgeração.

Com os resultados obtidos através do módulo fotovoltaico montado, pode-se concluir que um diodo para cada célula não é a melhor solução para o problema do sombreamento. Embora alguns autores defendam que um diodo de *bypass* por célula poderia minimizar de forma eficaz os efeitos do sombreamento, verificou-se que a inserção de diodos no circuito do módulo fotovoltaico acarreta na inserção em série de resistências. Essas resistências são

devido à resistência interna dos diodos, que acabam limitando a corrente fornecida pelas células que não estão sombreadas.

Comparando as duas configurações montadas, percebe-se que um diodo para cada três células apresenta uma menor queda na potência fornecida. Embora com apenas uma célula sombreada apresente maior queda de máxima potência, aumentando o número de células sombreadas, a queda na potência cresce de forma menos acentuada, em comparação com a configuração de um diodo por célula. Destacam-se os resultados obtidos quando três células são sombreadas, quando a queda na máxima potência fornecida pelo módulo com uma célula por diodo é o dobro em relação à outra configuração testada. A Tabela 5 exhibe a comparação na redução da máxima potência fornecida para as duas configurações do módulo: uma célula por diodo, e três células por diodo.

Tabela 5 - Comparação na redução da máxima potência para as duas configurações testadas.

<b>Configuração do Módulo</b>	<b>Número de Células Sombreadas</b>			
	1	2	3	4
<b>Um diodo por célula</b>	23,6 %	41,7 %	60,2 %	-
<b>Um diodo para três células</b>	29,7 %	33,7 %	33,2 %	69,5 %

Nos módulos comerciais a ligação de um maior número de diodos de *bypass* pode diminuir ainda mais os efeitos provocados pelo sombreamento. Os módulos Kyocera testados, caso apresentassem um grupo de nove células para cada diodo de *bypass* (ao invés de dezoito), poderiam apresentar uma redução na potência fornecida em torno de 25 ou 50 %, nos casos de sombreamento de uma e duas células, respectivamente. Módulos com um maior número de diodos de *bypass*, embora tenham um maior custo, podem ser uma solução viável a unidades de microgeração, onde as estruturas vizinhas possam provocar sombreamento. Vale ressaltar que é preciso a realização de estudos que possam levantar a melhor relação entre o número de células para cada diodo, de forma a amenizar com maior eficácia os efeitos do sombreamento.

### **6.1.1 Trabalhos Publicados**

Durante a fase de confecção desta dissertação, foi apresentado o trabalho “O Efeito do Sombreamento em Módulos Fotovoltaicos”, através de seção interativa no VI Congresso Brasileiro de Energia Solar – CEBENS, realizado na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, entre os dias 04 e 07 de abril de 2016.

### **6.2 Trabalhos futuros**

Os diodos de *bypass* mostraram certa eficiência na minimização dos efeitos causados pelo sombreamento, porém, deve-se investigar melhor a relação custo benefício na fabricação. O módulo confeccionado para a investigação feita por este trabalho apresentou uma queda brusca na máxima potência fornecida a partir da terceira célula sombreada. Como o número de células é relativamente pequeno (quinze) a cada célula sombreada a queda de tensão aumenta muito, diminuindo, assim, a potência na saída.

Alguns trabalhos consultados durante a confecção desta dissertação, como o de Zheng (ZHENG et al., 2014) e Maki (MAKI; VALKEALAHTI, 2013), desenvolvem simulações sem explicitar em seus textos se as perdas provocadas pelos diodos de *bypass* são consideradas. Uma proposta inicial de trabalho é a simulação dos sistemas fotovoltaicos inserindo as perdas provocadas pelos diodos, com o objetivo de alcançar resultados teóricos aproximados aos resultados práticos.

Outra possível proposta de trabalho é a montagem de módulos com um maior número de células, com o objetivo de verificar seu desempenho diante de diferentes níveis de sombreamento e diferentes configurações de diodos de *bypass*. Os módulos fotovoltaicos comercializados atualmente possuem, no mínimo, quinze células para cada diodo. Além de investigar o efeito de um diodo de *bypass* por célula, uma possibilidade é a montagem de módulos com diferentes configurações na relação células por diodo.

Uma terceira proposta de trabalho é o aperfeiçoamento do sistema de coleta de dados implementado neste trabalho, para que o mesmo possa caracterizar sistemas fotovoltaicos.

Como descrito nas seções 4.1 e 5.1, este circuito é capaz de traçar apenas uma parte das curvas  $I-V$  e  $P-V$ , e não está de acordo com as normas para caracterização de módulos fotovoltaicos. A implementação de outras técnicas de variação de carga, junto ao sistema de aquisição de dados pode varrer todas as regiões de trabalho de um módulo, do curto circuito ao circuito aberto, propondo uma caracterização de baixo custo.

## Referências Bibliográficas

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.

ANEEL. **ANEEL 10 anos**, 2007. Disponível em:  
<[http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/aneel\\_10\\_anos.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/aneel_10_anos.pdf)>

ANEEL. **Capacidade de Geração no Brasil**. Disponível em:  
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 8 dez. 2015a.

ANEEL. **Bandeiras Tarifárias**. Disponível em:  
<<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=758&idPerfil=2>>. Acesso em: 8 dez. 2015b.

ANEEL. **Resolução Normativa n° 482/2012**. 2012. Disponível em:  
<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>

ANEEL. **Resolução Normativa n° 687/2015**. 2016. Disponível em:  
<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>

BOAS ENERGIAS. **Solar**. Disponível em:  
<<http://boasenergias.webnode.com.pt/portfolio/solar/>>. Acesso em: 9 jul. 2015.

BOYLESTAD, R. L.; NASHESKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

BSOLAR. **Monocrystalline Silicon Solar Cell**. 2016. Disponível em: <[http://www.b-solar.com/Pictures/Monofacial%20TG18.5BR\\_D200.pdf](http://www.b-solar.com/Pictures/Monofacial%20TG18.5BR_D200.pdf)>.

CABRAL, C. V. T. et al. Modelagem e simulação de gerador fotovoltaico. 2004.

CARUSO, F.; OGURI, V. **Física Moderna, Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

CARVALHO, P. M. S. DE. **Modelação e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos**. [s.l.] INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, 2013.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Energia solar princípios e aplicações. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**, p. 28, 2008.

DOLARA, A. et al. Experimental investigation of partial shading scenarios on PV (photovoltaic) modules. **Energy**, v. 55, p. 466–475, 2013.

DZIMANO, G. **MODELING OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**. [s.l.] Ohio State University, 2008.

GASPARIN, F. P. **Sistema traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. [s.l.: s.n.].

*Referências Bibliográficas*

- GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>.
- HECKTHEUER, L. A. **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**. [s.l.] UFRGS, 2001.
- JUNIOR, J. O. L. **CONVERTOR BUCK/BOOST A QUATRO CHAVES COM MODO BYPASS EM MPPT APLICADO AO CARREGAMENTO DE BATERIAS A PARTIR DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- KYOCERA. **Módulo Policristalino de Alta Eficiência KD135SX-UPU**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.br/site/arquivos/produtos/68.pdf>>.
- MAKI, A.; VALKEALAHTI, S. Effect of photovoltaic generator components on the number of MPPs under partial shading conditions. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 28, n. 4, p. 1008–1017, 2013.
- MANGAS, R. F. G. D. **Redes de Distribuição de Energia com Microgeração – Avaliação do Impacto de diferentes condições de licenciamento**. [s.l.] Faculdade do Porto, 2009.
- MARUJO, R.; SIMÕES, T.; ESTANQUEIRO, A. Integração de Sistemas de Energia Renovável a Instalações Residenciais. p. 124–131, 2010.
- MOREIRA, D. **Implementação de microgeração no sector residencial**. [s.l: s.n.].
- ON SEMICONDUCTOR. **2N5038**. 2016. Disponível em: <[http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/2N5038-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/2N5038-D.PDF)>
- PATEL, M. R. **Wind and Solar Power Systems. Design, Analysis, and Operation**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. v. 33
- RECTRON. **10A05 THRU 10A10**. 2016. Disponível em: <[http://www.rectron.com/data\\_sheets/10a05-10a10.pdf](http://www.rectron.com/data_sheets/10a05-10a10.pdf)>
- RESENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.
- SANT'ANNA, B. et al. **Conexões com a Física Vol. 3**. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2010.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.
- SEYEDMAHMOUDIAN, M. et al. Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems. **Energies**, v. 6, n. 1, p. 128–144, 2013.
- TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 5. ed. rio de Janeiro: LTC, 2012.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros, volume 3**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- VICENTE, E. M. **Sistema de mppt para painéis fotovoltaicos com baixa complexidade e alto rendimento**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2015a.
- VICENTE, P. DOS S. **RECONFIGURAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS SOMBREADOS UTILIZANDO A TEORIA DOS CONJUNTOS APROXIMADOS**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2015b.

Referências Bibliográficas

VIEIRA, A. **Refração da luz: por que a fibra óptica e o arco-íris são “parentes”?**

Disponível em: <<http://desconversa.com.br/fisica/refracao-da-luz-por-que-a-fibra-optica-e-o-arco-iris-sao-parentes/>>. Acesso em: 9 dez. 2015.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV, Ótica e Física Moderna**. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009.

ZHENG, H. et al. Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configurations. **Renewable Energy**, v. 68, p. 58–66, 2014.



## APÊNDICE A – Programa Arduino para Interface com o Matlab

```

/* Analog and Digital Input and Output Server for MATLAB */
/* Giampiero Campa, Copyright 2013 The MathWorks, Inc */

/* This file is meant to be used with the MATLAB arduino IO
package, however, it can be used from the IDE environment
(or any other serial terminal) by typing commands like:

0e0 : assigns digital pin #4 (e) as input
0f1 : assigns digital pin #5 (f) as output
0n1 : assigns digital pin #13 (n) as output

1c : reads digital pin #2 (c)
1e : reads digital pin #4 (e)
2n0 : sets digital pin #13 (n) low
2n1 : sets digital pin #13 (n) high
2f1 : sets digital pin #5 (f) high
2f0 : sets digital pin #5 (f) low
4j2 : sets digital pin #9 (j) to 50=ascii(2) over 255
4jz : sets digital pin #9 (j) to 122=ascii(z) over 255
3a : reads analog pin #0 (a)
3f : reads analog pin #5 (f)

R0 : sets analog reference to DEFAULT
R1 : sets analog reference to INTERNAL
R2 : sets analog reference to EXTERNAL

X3 : roundtrip example case returning the input (ascii(3))
99 : returns script type (0 adio.pde ... 3 motor.pde ) */

/* define internal for the MEGA as 1.1V (as as for the 328) */
#if defined(__AVR_ATmega1280__) || defined(__AVR_ATmega2560__)
#define INTERNAL INTERNAL1V1
#endif

void setup() {
  /* initialize serial */
  Serial.begin(115200);
  //Timer1.initialize(50); // inicializa a biblioteca timer1, e seta o periodo do pwm para 1000 us
  //Timer1.pwm(9, 512); // setup pwm on pin 9, 50 % duty cycle

  TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0b11; // pwm de 3900Hz no pino 3
  //TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0b1; //pwm de 31250Hz no pino 3}

```

Apêndice A

```

void loop() {

    /* variables declaration and initialization          */

    static int s = -1; /* state                        */
    static int pin = 13; /* generic pin number          */

    int val = 0;      /* generic value read from serial */
    int agv = 0;     /* generic analog value          */
    int dgv = 0;     /* generic digital value          */

    /* The following instruction constantly checks if anything
       is available on the serial port. Nothing gets executed in
       the loop if nothing is available to be read, but as soon
       as anything becomes available, then the part coded after
       the if statement (that is the real stuff) gets executed */

    if (Serial.available() >0) {

        /* whatever is available from the serial is read here */
        val = Serial.read();

        /* This part basically implements a state machine that
           reads the serial port and makes just one transition
           to a new state, depending on both the previous state
           and the command that is read from the serial port.
           Some commands need additional inputs from the serial
           port, so they need 2 or 3 state transitions (each one
           happening as soon as anything new is available from
           the serial port) to be fully executed. After a command
           is fully executed the state returns to its initial
           value s=-1 */

        switch (s) {

            /* s=-1 means NOTHING RECEIVED YET ***** */
            case -1:

                /* calculate next state */
                if (val>47 && val<90) {
                    /* the first received value indicates the mode
                       49 is ascii for 1, ... 90 is ascii for Z
                       s=0 is change-pin mode;
                       s=10 is DI; s=20 is DO; s=30 is AI; s=40 is AO;
                       s=90 is query script type (1 basic, 2 motor);
                       s=340 is change analog reference;
                       s=400 example echo returning the input argument;
                       */
                    s=10*(val-48);
                }
            }
        }
    }
}

```

Apêndice A

```

/* the following statements are needed to handle
   unexpected first values coming from the serial (if
   the value is unrecognized then it defaults to s=-1) */
if ((s>40 && s<90) || (s>90 && s!=340 && s!=400)) {
  s=-1;
}

/* the break statements gets out of the switch-case, so
/* we go back and wait for new serial data      */
break; /* s=-1 (initial state) taken care of    */

/* s=0 or 1 means CHANGE PIN MODE              */

case 0:
/* the second received value indicates the pin
   from abs('c')=99, pin 2, to abs('i')=166, pin 69 */
if (val>98 && val<167) {
  pin=val-97;      /* calculate pin      */
  s=1; /* next we will need to get 0 or 1 from serial */
}
else {
  s=-1; /* if value is not a pin then return to -1 */
}
break; /* s=0 taken care of                */

case 1:
/* the third received value indicates the value 0 or 1 */
if (val>47 && val<50) {
  /* set pin mode                                */
  if (val==48) {
    pinMode(pin,INPUT);
  }
  else {
    pinMode(pin,OUTPUT);
  }
}
s=-1; /* we are done with CHANGE PIN so go to -1 */
break; /* s=1 taken care of                    */

/* s=10 means DIGITAL INPUT ***** */

case 10:
/* the second received value indicates the pin
   from abs('c')=99, pin 2, to abs('i')=166, pin 69 */
if (val>98 && val<167) {
  pin=val-97;      /* calculate pin      */
  dgv=digitalRead(pin); /* perform Digital Input */
}

```

Apêndice A

```

    Serial.println(dgv);    /* send value via serial */
}
s=-1; /* we are done with DI so next state is -1 */
break; /* s=10 taken care of */

/* s=20 or 21 means DIGITAL OUTPUT ***** */

case 20:
/* the second received value indicates the pin
   from abs('c')=99, pin 2, to abs('i')=166, pin 69 */
if (val>98 && val<167) {
    pin=val-97;          /* calculate pin */
    s=21; /* next we will need to get 0 or 1 from serial */
}
else {
    s=-1; /* if value is not a pin then return to -1 */
}
break; /* s=20 taken care of */

case 21:
/* the third received value indicates the value 0 or 1 */
if (val>47 && val<50) {
    dgv=val-48;          /* calculate value */
    digitalWrite(pin,dgv); /* perform Digital Output */
}
s=-1; /* we are done with DO so next state is -1 */
break; /* s=21 taken care of */

/* s=30 means ANALOG INPUT ***** */

case 30:
/* the second received value indicates the pin
   from abs('a')=97, pin 0, to abs('p')=112, pin 15 */
if (val>96 && val<113) {
    pin=val-97;          /* calculate pin */
    agv=analogRead(pin); /* perform Analog Input */
    Serial.println(agv); /* send value via serial */
}
s=-1; /* we are done with AI so next state is -1 */
break; /* s=30 taken care of */

/* s=40 or 41 means ANALOG OUTPUT ***** */

case 40:
/* the second received value indicates the pin
   from abs('c')=99, pin 2, to abs('i')=166, pin 69 */

```

Apêndice A

```

if (val>98 && val<167) {
  pin=val-97;      /* calculate pin      */
  s=41; /* next we will need to get value from serial */
}
else {
  s=-1; /* if value is not a pin then return to -1  */
}
break; /* s=40 taken care of          */

```

```

case 41:
/* the third received value indicates the analog value */
analogWrite(pin,val); /* perform Analog Output */
s=-1; /* we are done with AO so next state is -1  */
break; /* s=41 taken care of          */

```

```

/* s=90 means Query Script Type:
(0 adio, 1 adioenc, 2 adiosrv, 3 motor)      */

```

```

case 90:
if (val==57) {
  /* if string sent is 99 send script type via serial */
  Serial.println(0);
}
s=-1; /* we are done with this so next state is -1  */
break; /* s=90 taken care of          */

```

```

/* s=340 or 341 means ANALOG REFERENCE ***** */

```

```

case 340:
/* the second received value indicates the reference,
which is encoded as is 0,1,2 for DEFAULT, INTERNAL
and EXTERNAL, respectively. Note that this function
is ignored for boards not featuring AVR or PIC32  */

```

```

#if defined(__AVR__) || defined(__PIC32MX__)

```

```

switch (val) {

  case 48:
    analogReference(DEFAULT);
    break;

  case 49:
    analogReference(INTERNAL);
    break;

  case 50:

```

Apêndice A

```

    analogReference(EXTERNAL);
    break;

    default:          /* unrecognized, no action */
    break;
}

#endif

s=-1; /* we are done with this so next state is -1 */
break; /* s=341 taken care of */

/* s=400 roundtrip example function (returns the input)*/

case 400:
/* the second value (val) can really be anything here */

/* This is an auxiliary function that returns the ASCII
   value of its first argument. It is provided as an
   example for people that want to add their own code */

/* your own code goes here instead of the serial print */
Serial.println(val);

s=-1; /* we are done with the aux function so -1 */
break; /* s=400 taken care of */

/* ***** UNRECOGNIZED STATE, go back to s=-1 ***** */

default:
/* we should never get here but if we do it means we
   are in an unexpected state so whatever is the second
   received value we get out of here and back to s=-1 */

s=-1; /* go back to the initial state, break unneeded */

} /* end switch on state s */

} /* end if serial available */

} /* end loop statement */

```

## APÊNDICE B – Rotina Matlab para Controle do Sistema de Dados

```

% Este programa faz a coleta de dados de tensão e corrente, para traçar a curva de carga de %painéis
fotovoltaicos. Autor: Carlos Roberto Coutinho. Data: 07/10/2015
% Adaptado do programa de Felipe Nascimento Martins, 11/out/2011 - atualizado em %26/abr/2014.
Mais informacoes em: http://nossosrobos.blogspot.com.br/2011/10/arduino-%com-matlab.html
clear;
% Conectando ao Arduino, que esta na COM3:
a = arduino('COM3');
%ts = 0.0005; % periodo de amostragem [s]
Arquivo=input(' Digite o nome do arquivo', 's');
potsol =input(' Digite a irradiância medida');
disp('Coletando dados...');
% figure;
v1=[]; i1=[]; V1=0; I1=0; V=[]; I=[]; P=[];
for i = 0:255;
    for j = 1:5; % 20 amostras
        v1 = (a.analogRead(3)*0.0048828125)*4.626 +0.519; % Leitura de tensão para Vmax = 24V
        V1=v1+V1;
        i1= (a.analogRead(2) * 0.0506)- 25.896;
        I1=i1+I1;
    j;
    end
    V1=V1/5;
    I1=I1/5;
    P=[P;V1*I1];
    V= [ V;V1];
    I= [I; I1];
    a.analogWrite(6, i); % PWM eh de 8 bits: 0 a 255.
end
figure(1);
plot (V,I);
title(['CURVA I-V Irradiância medida: ' num2str(potsol) 'W/m²']);
xlabel({'Tensão (V)'});
ylabel({'Corrente (A)'});
grid on;
figure(2);
plot(V,P);
title(['CURVA P-V Irradiância medida: ' num2str(potsol) 'W/m²']);
xlabel({'Tensão (V)'});
ylabel({'Potência (W)'});
grid on;
a.analogWrite(6, 255);
save (Arquivo,'V', 'I', 'P');
disp('Fim da coleta de dados.');
```

disp('Pressione qualquer tecla para encerrar o programa.');

```

pause;
% Desconectando do Arduino
delete(a);

```