

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – CAMPUS FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
GUILHERME MOURA SOARES**

**MODELAGEM ANALÍTICA E SIMULAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
UTILIZANDO O MODELO DE CINCO PARÂMETROS**

FORMIGA – MG

2019

GUILHERME MOURA SOARES

**MODELAGEM ANALÍTICA E SIMULAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
UTILIZANDO O MODELO DE CINCO PARÂMETROS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Formiga, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. MSc. Rafael Vinicius Tayette da Nobrega

FORMIGA – MG

2019

GUILHERME MOURA SOARES

**MODELAGEM ANALÍTICA E SIMULAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
UTILIZANDO O MODELO DE CINCO PARÂMETROS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 14 de junho de 2019.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Rafael Vinicius Tayette da Nobrega

Prof. MSc. Patrick Santos de Oliveira

Prof. Dr. Ulysses Rondina Duarte

Formiga/MG, 14 de junho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, por proporcionar e incentivar meus estudos, e ao meu falecido pai que mesmo ausente possibilitou que eu pudesse ter um bom ensino.

Agradeço também aos meus colegas e amigos, por todo apoio e incentivo nos momentos de dificuldade que passamos juntos ao longo da jornada de graduação.

Gratidão ao meu professor, mestre e orientador Rafael Tayette da Nobrega, pela dedicação ao prover uma orientação impecável, pelo incentivo e pela paciência ao compartilhar sua sabedoria.

Por fim agradeço a todos os professores que contribuíram com meu desenvolvimento intelectual e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para meu crescimento pessoal.

RESUMO

A energia solar tem mostrado um grande potencial na composição da matriz energética mundial, uma vez que se trata de uma energia limpa, sustentável e abundante. Levando em conta a grande dependência das condições ambientes (irradiação, temperatura, velocidade do vento) para a eficiência na geração de energia fotovoltaica, é de suma importância a análise das características de módulos fotovoltaicos visando a otimização da eficiência energética, mesmo para usuários de pequena escala. Desse modo, neste trabalho é desenvolvido a modelagem analítica e simulação do comportamento elétrico de módulos fotovoltaicos baseado no modelo de cinco parâmetros. O método implementado leva em consideração a solução analítica da equação principal do circuito equivalente do módulo, utilizando um artifício matemático conhecido como função W de Lambert, na obtenção de suas curvas características de corrente-tensão (I-V) e potência-tensão (P-V). A equação principal do módulo fotovoltaico depende dos cinco parâmetros: foto-corrente, corrente de saturação, resistência em série, resistência *shunt* e fator de idealidade, e tais parâmetros dependem dos dados fornecidos pelos fabricantes dos módulos. Além do mais, considerou-se os cinco parâmetros variando em função da irradiação solar e da temperatura de operação do módulo. A validação da metodologia foi realizada comparando as curvas simuladas com as curvas disponibilizadas pelo fabricante do módulo CS6K-295MS. E com os resultados obtidos pode-se verificar a validação satisfatória da metodologia, uma vez que obteve-se uma concordância mínima de 94,32%, entre os valores simulados e experimentais de potência máxima de operação do módulo. Posteriormente, aplicou-se a metodologia em dois exemplos de aplicação. No primeiro exemplo, implementou-se a simulação do módulo fotovoltaico JKM390M-72, com o intuito de obter uma expressão que representasse o comportamento da potência de operação do módulo em função da irradiação, da temperatura de operação e do seu tempo efetivo de operação. No segundo exemplo, simulou-se a quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico instalado no IFMG *campus* Formiga no ano de 2018, utilizando a metodologia desenvolvida neste trabalho.

Palavras-chave: Energia Solar. Sistemas Fotovoltaicos. Módulos Fotovoltaicos. Modelagem Analítica.

ABSTRACT

Solar energy has shown great potential in the composition of the world energy matrix, since it is a clean, sustainable and abundant energy. Taking into account the great dependence of the ambient conditions (irradiation, temperature, wind speed) for the efficiency in the generation of energetic photovoltaic, it is of great importance the analysis of the characteristics of photovoltaic modules aiming at the optimization of energy efficiency, even for small users scale. Thus, in this work is developed the analytical modeling and simulation of the electric behavior of photovoltaic modules based on the model of five parameters. The implemented method takes into account the analytical solution of the main equation of the equivalent circuit of the module, using a mathematical artifice known as Lambert's W function, in obtaining its characteristic curves current-voltage (I-V) and power-voltage (P-V). The main equation of the photovoltaic module depends on the five parameters: photo-current, saturation current, series resistance, shunt resistance and ideality factor, and these parameters depend on the data provided by the modules manufacturers. Furthermore, the five parameters were considered, varying as a function of the solar irradiance and the operating temperature of the module. The validation of the methodology was performed comparing the simulated curves with the curves provided by the manufacturer of the module CS6K-295MS. With the results obtained, a satisfactory validation of the methodology can be verified, since a minimum agreement of 94.32% was obtained, between the simulated and experimental values of the maximum operating power of the module. In sequence, the methodology was applied in two application examples. In the first example, the simulation of the photovoltaic module JKM390M-72 was implemented, in order to obtain an expression that represents the behavior of the module's operating power as a function of the irradiation, the operating temperature and its effective operating time. In the second example, the amount of energy generated by the photovoltaic system installed at the IFMG campus Formiga in the year 2018 was simulated using the methodology developed in this work.

Keywords: Solar energy. Photovoltaic systems. Photovoltaic modules. Analytical Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de captação e formas da energia solar	15
Figura 2 - Modelo de bandas dos três tipos de materiais: condutor, semiconductor e isolante.	16
Figura 3 - Lacuna em um semiconductor extrínseco tipo P.	17
Figura 4 - Elétrons livres em um semiconductor extrínseco tipo N.	17
Figura 5 - Ilustração do equilíbrio alcançado na junção P-N.....	18
Figura 6 - Ilustração do esquema de funcionamento de uma célula solar.	19
Figura 7 - - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.	20
Figura 8 - Silício monocristalino (m-Si).	21
Figura 9 – Silício policristalino (p-Si).....	22
Figura 10 - Silício amorfo (a-Si).	22
Figura 11 – Visão geral do módulo fotovoltaico policristalino instalado.....	23
Figura 12 – Visão geral do módulo fotovoltaico monocristalino instalado.	24
Figura 13 - Representação esquemática de células conectadas em paralelo.....	24
Figura 14 – Curva característica corrente-tensão de células conectadas em paralelo.	25
Figura 15 - Representação esquemática de células conectadas em série.	25
Figura 16 - Curva característica corrente-tensão de células conectadas em série.	26
Figura 17 - Curva típica de I-V de um módulo fotovoltaico genérico.	27
Figura 18 – Curva típica com parâmetros de potência máxima de um módulo fotovoltaico genérico.....	28
Figura 19 – Influência da radiação solar na curva de operação de um módulo fotovoltaico genérico.....	29
Figura 20 – Influência da temperatura na curva de operação de um painel solar genérico	30
Figura 21 – Circuito equivalente de uma célula solar ideal.....	31
Figura 22 – Modelo do circuito equivalente de um diodo para uma célula solar real	32
Figura 23 - Curvas de operação do módulo CS6K-295MS extraída do <i>datasheet</i>	45
Figura 24 – Comparação de curvas I-V simuladas e extraídas do <i>datasheet</i> variando com a temperatura.	46
Figura 25 - Comparação entre as curvas I-V simuladas e extraídas do <i>datasheet</i> variando com a irradiância.....	46
Figura 26 - Curva I-V e curva P-V simuladas com o modelo elétrico.....	47
Figura 27 - Simulação da curva P-V com a variação da temperatura.....	48
Figura 28 - Simulação da curva P-V com a variação da irradiância.....	49
Figura 29 - Curvas de I-V e P-V do módulo JKM390M-72, fornecidas pelo <i>datasheet</i>	51
Figura 30 – Comparação das curvas I-V e P-V simuladas e extraídas do <i>datasheet</i>	52
Figura 31 - Potência de operação em função da temperatura de operação obtido por meio de simulação.	53
Figura 32 - Gráfico da porcentagem da potência nominal entregue pelo módulo com o passar de 25 anos.	54
Figura 33 - Gráfico do desempenho da potência de operação com o passar dos anos.	55
Figura 34 - Superfície da potência efetiva entregue em função da temperatura e do tempo de uso do módulo fotovoltaico JKM390M-72.....	56
Figura 35 - Potência de operação em função da temperatura de operação obtido por meio de simulação.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela 1 – Dados de fábrica do módulo fotovoltaico CS6K-295MS.....	44
Tabela 2 - Comparação entre dados de pico simulados e obtidos a partir do datasheet do módulo CS6K-295MS.....	48
Tabela 3 - Dados de fábrica do módulo fotovoltaico JKM390M-72.....	51
Tabela 4 - Comparação entre dados de pico simulados e obtidos a partir do datasheet do módulo JKM390M-72.....	52
Tabela 5 - Valores de potência máxima obtidos variando a temperatura de operação através de simulação	53
Tabela 6 - Dados de fábrica do módulo fotovoltaico CS6K-260P.	57
Tabela 7 - Comparação de dados simulados e dados do CS6K-260P em STC.	58
Tabela 8 - Comparação de dados simulados e dados do CS6K-260P em NOCT.	58
Tabela 9 - Valores da potência simulada obtida para cada valor de temperatura de operação..	59
Tabela 10 - Dados usados para o cálculo da energia gerada.....	61
Tabela 11 - Dados da energia gerada por um módulo CS6K-260P, obtidos com a simulação...	61
Tabela 12 - Resultado do total de energia gerada pelos 110 módulos do IFMG Campus Formiga, segundo a simulação.	62
Tabela 13 - Comparação entre os valores obtidos com a simulação e o relatório CICE.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa	12
1.2 Objetivo Geral	12
1.3 Objetivos Específicos.....	13
1.4 Estrutura do Trabalho	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Energia Solar.....	14
2.2 Materiais Semicondutores	15
2.3 Efeito Fotovoltaico.....	18
2.4 Célula Fotovoltaica	19
2.5 Módulos Fotovoltaicos.....	23
2.5.1 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos	26
2.5.2 Influência da Radiação no Módulo Fotovoltaico	28
2.5.3 Influência da Temperatura no Módulo Fotovoltaico	29
3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA	31
3.1 Modelo Elétrico	31
3.2 Função corrente-tensão $I = f(V)$	33
3.3 Cálculo dos Parâmetros.....	38
3.4 Dependência dos fatores ambientais nos módulos fotovoltaicos	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 Validação da Metodologia.....	44
4.2 Exemplos de Aplicação	50
4.2.1 Exemplo de aplicação 1: Potência de operação efetiva em função da temperatura de operação e do tempo de uso do módulo.....	50
4.2.2 Exemplo de Aplicação 2: Simulação da quantidade de energia gerada pelos módulos instalados no IFMG <i>Campus Formiga</i>	57
5 CONCLUSÕES	63
5.1 Trabalhos Futuros	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

Uma célula fotovoltaica é a junção de dois materiais semicondutores, um tipo P e outro tipo N, que permite criar um dispositivo capaz de converter a radiação solar em um fluxo de elétrons. Com o auxílio de condutores é possível formar um circuito elétrico e alimentar diversos sistemas e cargas. Quanto mais células forem utilizadas em conjunto, maior será a potência gerada. O efeito fotovoltaico é o responsável por transformar a radiação solar incidente nas células solares em energia elétrica.

O aproveitamento de fontes sustentáveis de energia, bem como suas formas de captação, tem se tornado cada vez mais uma preocupação na sociedade moderna. Dentre as diferentes fontes, a energia fotovoltaica tem se tornado uma das mais relevantes em termos de potência instalada. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2019), ao final de março de 2019, o Brasil apresentava 2759 MW de capacidade instalada de geração fotovoltaica, sendo 2074 MW de geração centralizada e 683 MW de geração distribuída. Esses números representam uma evolução de 103,3% da capacidade instalada em relação ao final de março de 2018. Este fator, junto de uma vasta possibilidade de aplicações específicas, tem levado cientistas e pesquisadores a estudar o comportamento de células fotovoltaicas e os métodos de otimizar a sua capacidade de geração.

Desde metade do século 20, trabalhos com a descrição de mecanismos que regem a conversão da radiação solar em energia elétrica têm sido publicados. Além disso, grandes esforços têm sido direcionados para o desenvolvimento de circuitos equivalentes e modelos matemáticos que permitam analisar o comportamento de células solares em diferentes condições de radiação e temperatura. Em geral, a forma mais fácil de caracterizar uma célula solar é considerando uma fonte de corrente conectada em paralelo a um diodo. Dois resistores, um em série e um em paralelo (*shunt*), são normalmente adicionados para levar-se em consideração as perdas (CUBAS; PINDADO; VICTORIA, 2014).

Assim, neste trabalho, utilizou-se um conjunto de equações capazes de simular o comportamento dos parâmetros do módulo fotovoltaico, utilizando o MATLAB, com o intuito de compreender sua dependência com a radiação solar, a temperatura e o tempo de operação.

1.1 Justificativa

Um modelo elétrico consiste em um circuito simples cujo o comportamento se encaixa no comportamento real de uma célula solar. O uso destes modelos de circuito, juntos com uma boa definição matemática dos parâmetros envolvidos, é extremamente importante para estudos que visam maximizar a potência extraída de células trabalhando em condições reais. Além disso, o uso de modelos de circuito equivalente torna possível a simulação de sistemas elétricos mais complexos que incluem módulos fotovoltaicos (CUBAS; PINDADO; VICTORIA, 2014).

Levando em conta os usuários da geração fotovoltaica, observa-se que não há a definição clara de um perfil. A gama de usuários dessa forma de energia abrange desde o setor industrial, que possui grandes demandas, ao setor privado, representado por cidadãos e pessoas comuns que investem em módulos fotovoltaicos para a redução de custos com eletricidade. Apesar da diversidade entre eles, todos apresentam uma mesma necessidade em comum: possuir um melhor entendimento sobre sistemas fotovoltaicos, afim de obter a melhor eficiência do uso destes em termos de custo-benefício (CUBAS; PINDADO; MANUEL, 2014).

Tradicionalmente a modelagem de módulos fotovoltaicos é obtida por meio de extensos resultados experimentais e complexos ajustes numéricos. Entretanto, esta metodologia não é prática para pequenos usuários, onde uma decisão na aquisição entre diferentes módulos deve ser tomada e apenas informações dos dados de fabricante estão disponíveis. Neste caso, métodos analíticos representam a solução para o problema, pois estes são mais simples e necessitam de apenas uma pequena quantidade de informações, normalmente inclusas nos dados do fabricante, para a modelagem do comportamento do módulo.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um método analítico para a simulação do comportamento elétrico de módulos fotovoltaicos, utilizando os dados fornecidos pelo fabricante e em função da irradiação solar, temperatura e tempo de operação.

1.3 Objetivos Específicos

Pretende-se alcançar alguns objetivos específicos para validação do objetivo geral deste trabalho. São eles:

- Realizar um estudo para compreender os conceitos de energia fotovoltaica;
- Desenvolver o equacionamento do circuito elétrico equivalente do módulo fotovoltaico, baseado no modelo de cinco parâmetros;
- Implementar uma metodologia para a simulação de módulos fotovoltaicos;
- Validar a metodologia por meio de comparação das curvas tensão-corrente (I-V) e potência-tensão (P-V) simuladas e fornecidas pelo fabricante do módulo CS6K-295MS;
- Analisar os efeitos da variação da radiação solar incidente no módulo e sua temperatura de operação na potência gerada, bem como levar em conta o seu tempo efetivo de operação;
- Aplicar o modelo desenvolvido em exemplos de aplicação visando comprovar a versatilidade da metodologia apresentada.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. No capítulo 2 são apresentados conceitos teóricos necessários para compressão do trabalho, tais como energia solar, efeito fotovoltaico, características construtivas de uma célula solar, características elétricas de um módulo fotovoltaico e suas alterações com as influências do ambiente. No capítulo 3 é apresentada a metodologia desenvolvida no trabalho, baseada no circuito equivalente e nas equações utilizadas no modelo elétrico. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 4, e no capítulo 5 são mostrados a conclusão e as sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos importantes para a compreensão do trabalho, tais como energia solar, efeito fotovoltaico, características da célula solar, comportamento elétrico de um módulo fotovoltaico e sua dependência com variáveis do ambiente.

2.1 Energia Solar

A energia solar é a energia das ondas eletromagnéticas produzidas através de reações nucleares provenientes do Sol. Essas por sua vez, propagam-se através do espaço interplanetário até incidirem na superfície da Terra (PORTAL SOLAR, 2019).

Além de ser responsável pela preservação da vida, a luz do sol possui um papel fundamental em outras formas de geração de energia. São bons exemplos: a energia da biomassa, que origina-se da conversão de energia solar em energia química através da fotossíntese; a energia eólica aproveitada dos ventos, que são originados pelas diferentes temperaturas e pressões ao longo do globo; a hidráulica, que só é possível graças ao ciclo da água no globo terrestre, no qual o sol possui papel fundamental; e os próprios combustíveis fósseis que, para se formarem, dependem da decomposição da matéria orgânica, na qual não seria possível sem a radiação solar (VILLALVA; GAZOLI, 2013) (GHENSEV, 2006).

Através do sol, uma enorme quantidade de radiação solar (estimada em $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia) é entregue à superfície terrestre em um ano. Isto corresponde a 1000 vezes o consumo mundial de energia num mesmo período (PINTO, 2016).

O impacto ambiental, devido ao aumento da atividade econômica e industrial, criou nas últimas décadas uma crescente consciencialização de que a produção de energia por exploração de recursos fósseis está a tornar-se insustentável a médio prazo. Sendo assim, eventualmente será necessário que esta seja substituída por fontes de energia renováveis (PINTO, 2016).

Por se tratar de uma energia limpa, com mínimo impacto ambiental, ser abundante e ilimitada, a energia solar vem se destacando entre as diversas

alternativas disponíveis no planeta, e é vista como grande potencial na composição da matriz energética mundial (CRESESB, 2019).

Para a produção de energia elétrica, existem duas formas de aproveitamento da energia solar: direta ou indireta. A Figura 1 explica, por meio de um diagrama de blocos, os tipos e formas de se aproveitar a radiação solar (GHENSEV, 2006).

A captação de energia fotovoltaica, bem como o funcionamento das células fotovoltaicas e sua construção são apresentadas nas próximas subseções.

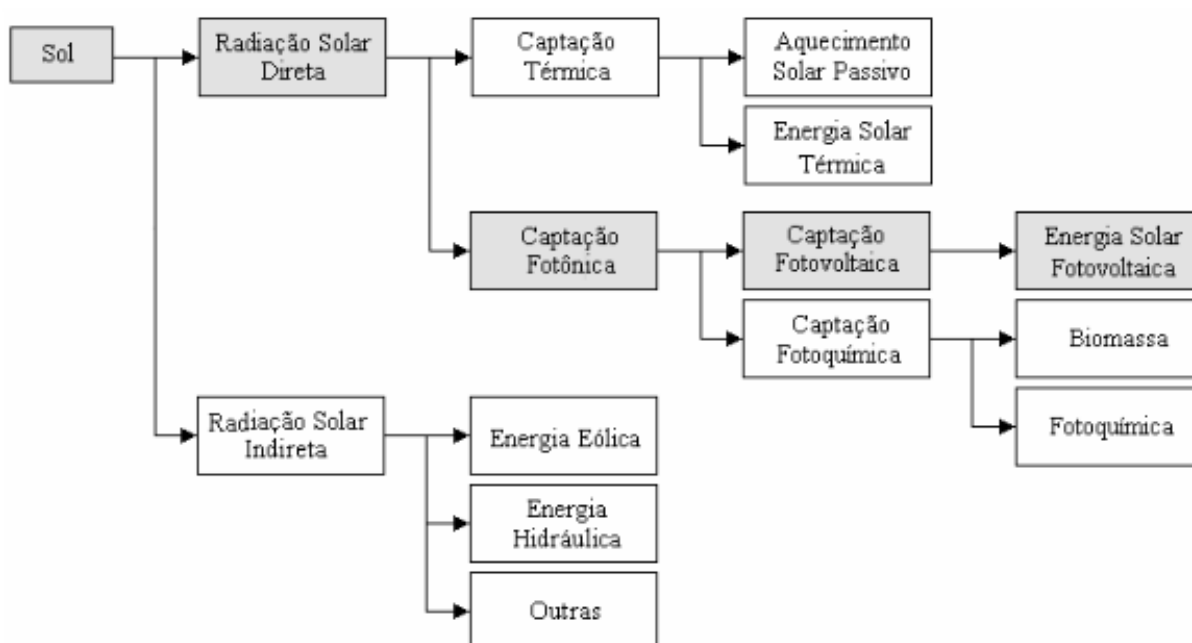


Figura 1– Tipos de captação e formas da energia solar

Fonte: Figura extraída de (GHENSEV, 2006).

2.2 Materiais Semicondutores

Existem três tipos de materiais na natureza: condutores, semicondutores e isolantes. O termo condutor é aplicado a qualquer material que, ao se aplicar uma tensão através de seus terminais, é capaz de sustentar um grande fluxo de carga. Isolante é o material que, ao ser submetido a uma tensão, oferece um mínimo nível de condutividade. Logo, um semicondutor é um material que possui o nível de

condutividade entre os extremos de um condutor e um semiconductor (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

A diferença entre os três tipos de materiais pode ser exemplificada pelo modelo de bandas, conforme ilustra a Figura 2.

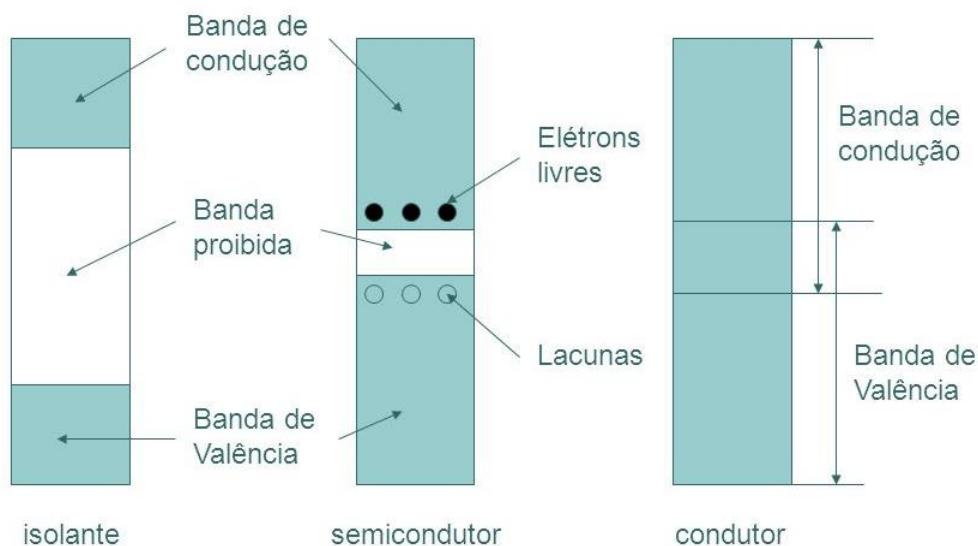


Figura 2 - Modelo de bandas dos três tipos de materiais: condutor, semiconductor e isolante.

Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2014).

O termo *gap* de energia é o nome que se dá para a distância entre a banda de valência e a banda de condução de um material, levando-o a apresentar uma boa predisposição à condução de corrente elétrica ou não. Quanto menor for o *gap*, maior será a facilidade de condução (OLIVEIRA, 2019).

Do ponto de vista da fabricação de componentes eletrônicos, a característica que mais torna atrativa o material semiconductor, é a possibilidade da variação substancial de sua condutividade através da alteração singela e controlada de sua composição química. Esse processo é chamado de dopagem (VIVACQUA, 2016).

Durante o processo de dopagem, um elemento adicional que possua três ou cinco elétrons na camada de valência é inserido na estrutura do material semiconductor com o intuito de alterar suas propriedades elétricas. Materiais dopados com elementos que possuem 3 (três) elétrons na camada de valência apresentam um excesso de lacunas (falta de um elétron na ligação covalente de um átomo do semiconductor com um átomo do elemento dopante), e são denominados semicondutores extrínsecos do tipo P. Já os materiais dopados com elementos que possuem 5 (cinco) elétrons na

camada de valência irão apresentar um excesso de elétrons livres, pois estes, ao se estabilizarem com 8 (oito) elétrons na camada de valência devido às 4 (quatro) ligações covalentes, ainda deixarão um elétron sobrando. Estes por sua vez, são denominados semicondutores extrínsecos do tipo N (MEIRELLES, 2002) (MACHADO; CORREA, 2015).

Para um melhor entendimento, é tomado como exemplo a dopagem do silício (material semiconductor) com Índio (elemento com três elétrons na camada de valência) e com Fósforo (elemento com cinco elétrons na camada de valência), como mostram as Figuras 3 e 4.

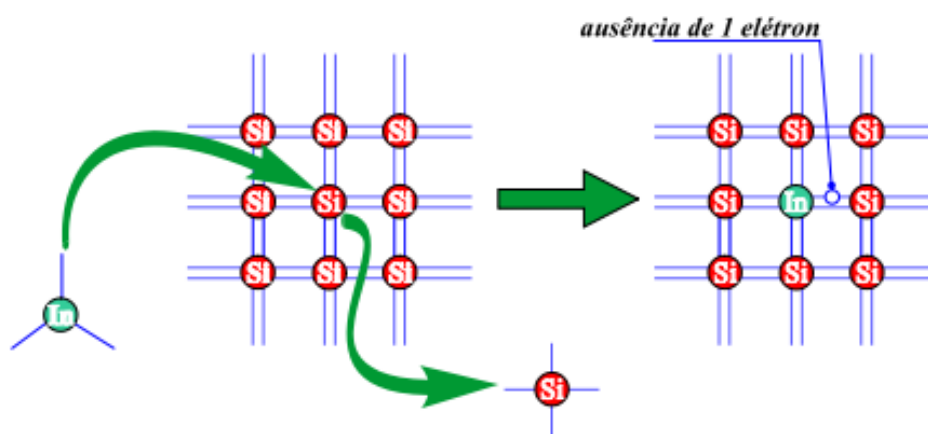


Figura 3 - Lacuna em um semiconductor extrínseco tipo P.

Fonte: Figura extraída de (DEMÉTRIO, 2013).

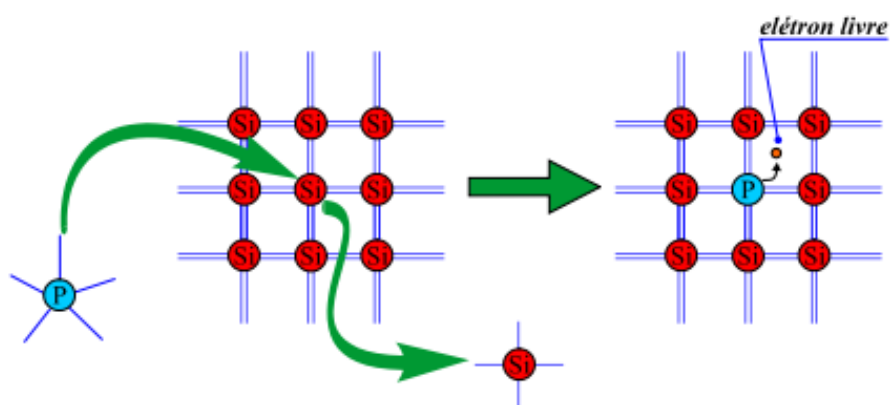


Figura 4 - Elétrons livres em um semiconductor extrínseco tipo N.

Fonte: Figura extraída de (DEMÉTRIO, 2013).

O conhecimento sobre o processo de formação dos semicondutores extrínsecos do tipo P e N é de suma importância para a compreensão do funcionamento de uma célula fotovoltaica, que é apresentado na próxima seção.

2.3 Efeito Fotovoltaico

Quando a luz solar brilha sobre uma célula fotovoltaica, parte é absorvida e parte é refletida. A energia da luz que é absorvida pela célula é transferida a seus átomos e então a seus elétrons, fazendo com que estes se desprendam dos átomos e propiciem um fluxo elétrico capaz de gerar uma corrente elétrica. Este fenômeno físico é conhecido como efeito fotovoltaico (GHENSEV, 2006) (CRESESB, 2019).

Para que possa ocorrer o efeito fotovoltaico, ou seja, para a criação de uma célula fotovoltaica, é necessário unir os semicondutores tipo N e tipo P formando uma junção P-N. Na interface da união destes materiais, quando os elétrons deixam o lado tipo N, há um acúmulo de carga positiva e carga negativa em cada um dos lados da fronteira, gerando um equilíbrio de cargas. Este equilíbrio será responsável pelo surgimento de um campo elétrico, que se deve à ocupação das lacunas do material semiconductor tipo P pelos elétrons livres do material tipo N. A Figura 5 ilustra este equilíbrio alcançado na junção P-N (MEIRELLES, 2002) (GHENSEV, 2006).

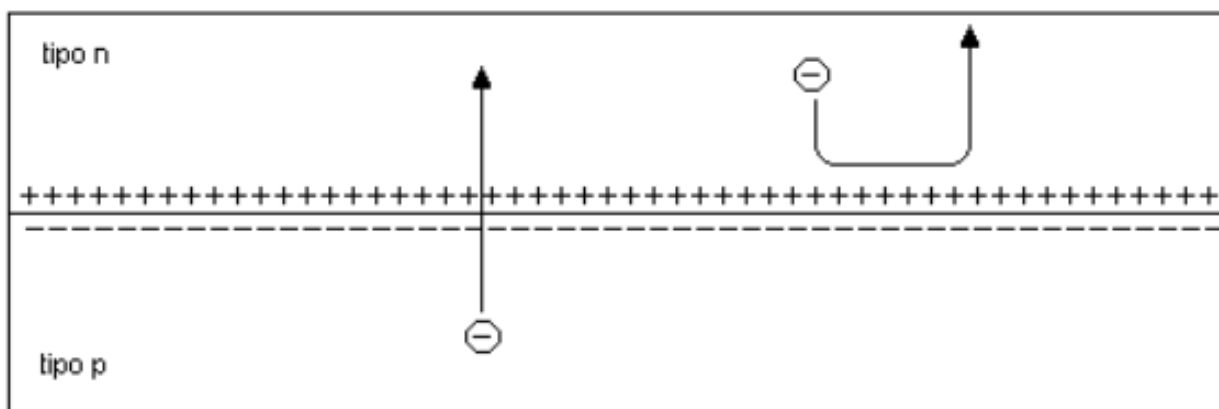


Figura 5 - Ilustração do equilíbrio alcançado na junção P-N.

Fonte: Figura extraída de (MEIRELLES, 2002).

Ao incidir-se luz na célula fotovoltaica, os fótons (pequenos pacotes que transportam a energia da radiação solar) colidem com os elétrons da estrutura. Se a energia fornecida pelos fótons for maior que a energia de *gap*, então, por consequência do campo elétrico formado pela junção P-N, uma diferença de potencial levará os elétrons a fluir da camada tipo P para a camada tipo N, enquanto os buracos irão para o lado tipo P. Desta forma é possível formar uma corrente elétrica conectando os terminais P e N com o auxílio de fios condutores. Essa, por sua vez, deverá permanecer enquanto a luz estiver incidindo sobre a célula e seu valor será proporcional à intensidade da radiação incidente. Para melhor entendimento, a Figura 6 ilustra o funcionamento do esquema apresentado (MEIRELLES, 2002), (GHENSEV, 2006).

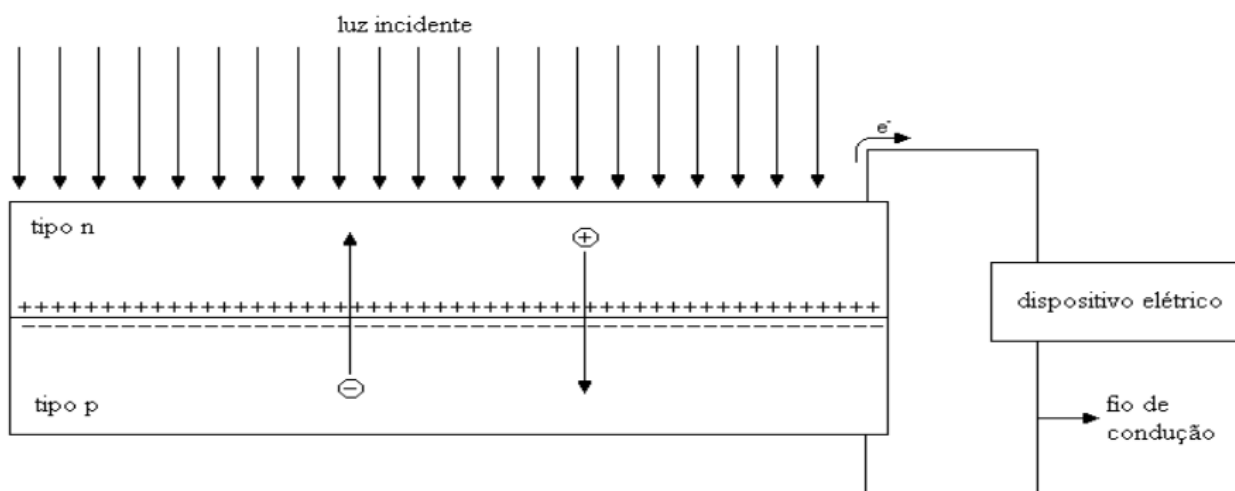


Figura 6 - Ilustração do esquema de funcionamento de uma célula solar.

Fonte: Figura extraída de (MEIRELLES, 2002).

2.4 Célula Fotovoltaica

Como já discutido, uma célula fotovoltaica pode ser compreendida como um dispositivo semicondutor capaz de produzir corrente elétrica por meio do efeito fotovoltaico, quando submetido à radiação eletromagnética emitida pelo sol.

Para melhorar o funcionamento da célula solar, além da junção P-N explicada anteriormente, algumas particularidades que podem ser observadas em sua construção são apresentadas com a ajuda da Figura 7.

A grade metálica impressa na célula, sinalizada como contato frontal na Figura 7, e deve ser extremamente fina para causar o mínimo de sombreamento, e serve como um caminho para os elétrons da camada N. Um material antirreflexivo também é adicionado abaixo do contato frontal, afim de evitar a reflexão e aumentar a quantidade de radiação absorvida pela célula. O contato inferior, sinalizado como contato de base na Figura 7, é normalmente composto por uma película de alumínio ou prata e é responsável por fechar o circuito junto com os terminais elétricos, para que possa haver a circulação de corrente (NIEDZIALKOSKI, 2013) (MACHADO; CORREA, 2015).

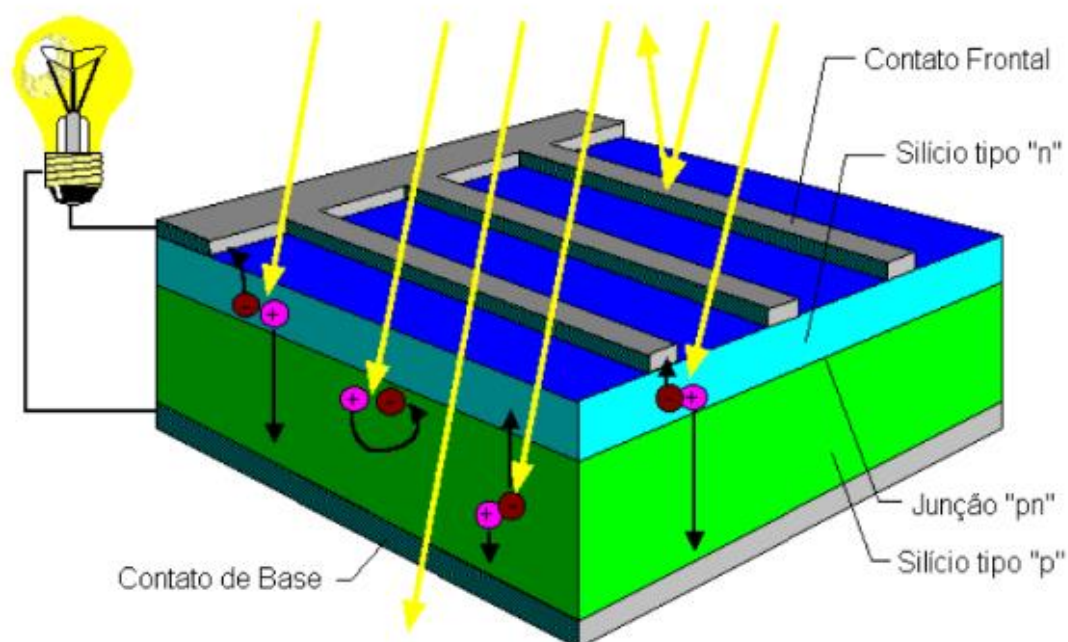


Figura 7 -- Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Figura extraída de (NIEDZIALKOSKI, 2013).

Devido a sua elevada abundância, seu baixo índice de contaminação e alta durabilidade, o semiconductor mais utilizado na fabricação de células solares, presente em cerca de 90% da produção mundial, é o silício. Atualmente, existem várias tecnologias utilizadas no tratamento deste material para a formação de células solares. Dentre elas, as mais encontradas são o silício monocristalino (*m-Si*), silício policristalino (*p-Si*) e silício amorfo (*a-Si*) (MACHADO; CORREA, 2015).

Devido ao alto consumo de energia em seu processo de fabricação, a célula de silício monocristalino é a que apresenta o maior custo. A uniformidade presente na sua estrutura molecular, graças à utilização de um cristal único, potencializa o efeito fotovoltaico, levando-a a um rendimento de aproximadamente 24% em laboratórios e de 15% em situações do dia a dia. (CASTRO, 2002) (MACHADO; CORREA, 2015). A Figura 8 mostra uma célula de silício monocristalino.

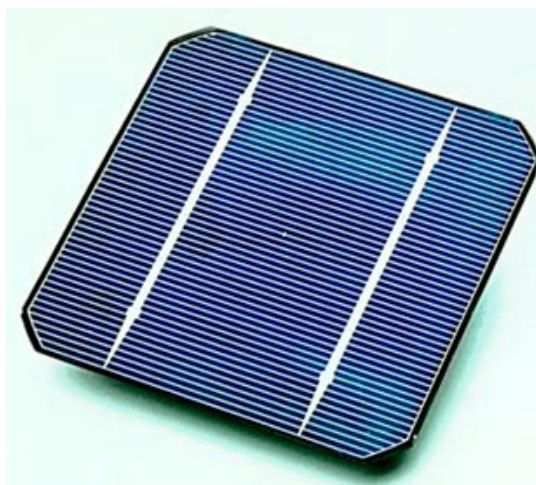


Figura 8 - Silício monocristalino (m-Si).

Fonte: Figura extraída de (SOLAR, 2019).

O silício policristalino apresenta um processo de fabricação mais simples e menos preciso, o que o torna mais barato. Em contrapartida, a descontinuidade da sua estrutura molecular encoraja a recombinação dos elétrons com as lacunas. Isso reduz a sua potência de saída, levando-o a apresentar um rendimento laboratorial de 18% e de 12% em situações práticas (CASTRO, 2002) (MACHADO; CORREA, 2015). A Figura 9 mostra como são visivelmente as células de silício policristalino.



Figura 9 – Silício policristalino (p-Si)

Fonte: Fonte: Figura extraída de (ECYCLE, 2019).

O silício amorfo apresenta a tecnologia de filmes finos que possui um alto potencial de redução de custos graças a baixa quantidade de material empregado. Para sua utilização na fabricação de células solares, é necessário passar por um processo de hidrogenização, onde os átomos de hidrogênio combinam-se quimicamente, de forma a minimizar os efeitos negativos de seus defeitos estruturais. Possui um bom desempenho como material de revestimento e seu processo de fabricação é ainda mais barato que o silício policristalino. Em contrapartida seu rendimento é baixo, da ordem de 13% em laboratórios, caindo para cerca de 6% em situações práticas graças à deterioração de suas propriedades conversoras. (CASTRO, 2002) (MACHADO; CORREA, 2015). A Figura 10 mostra uma célula de silício amorfo.



Figura 10 - Silício amorfo (a-Si).

Fonte: Figura extraída de (ECYCLE, 2019).

2.5 Módulos Fotovoltaicos

Também conhecidos como painel ou placa, o módulo fotovoltaico é o principal componente de um sistema de geração solar. É composto por um conjunto de células fotovoltaicas conectadas eletricamente. Visto que as células apresentam uma espessura reduzida de material frágil, essas são montadas sobre uma estrutura rígida capaz de fornecer resistência mecânica e mantê-las protegidas dos fatores ambientais (SILVA, 2014) (CRESESB, 2019). As Figuras 11 e 12 mostram um módulo fotovoltaico policristalino e um monocristalino, respectivamente.



Figura 11 – Visão geral do módulo fotovoltaico policristalino instalado.

Fonte: Figura extraída de (NIEDZIALKOSKI, 2013).

Com o intuito de fornecer a tensão e corrente elétricas necessárias de acordo com a demanda do sistema a ser alimentado, as células solares podem ser conectadas de duas formas: em paralelo ou em série. Quando conectadas em paralelo a tensão de saída fornecida será equivalente à tensão de cada célula individual, enquanto a corrente elétrica será a soma das correntes das células do conjunto, conforme ilustram as Figuras 13 e 14 (SILVA, 2014) (CRESESB, 2019).



Figura 12 – Visão geral do módulo fotovoltaico monocristalino instalado.

Fonte: Figura extraída de (NIEDZIALKOSKI, 2013).

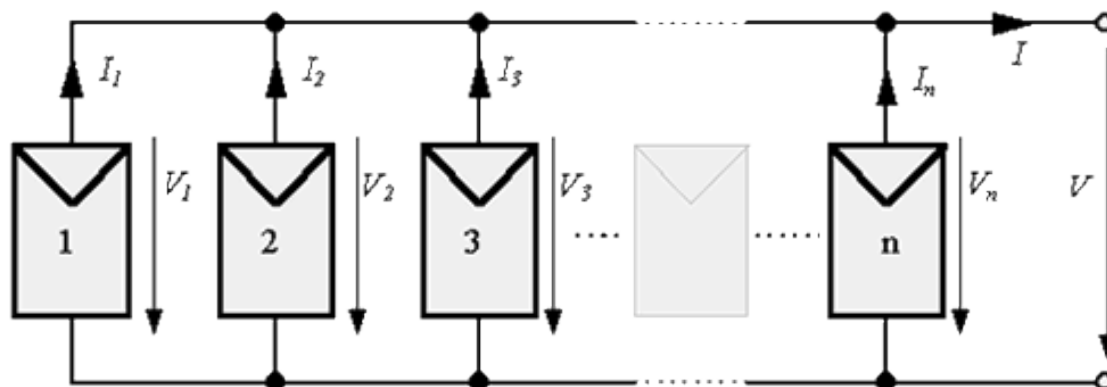


Figura 13 - Representação esquemática de células conectadas em paralelo.

Fonte: Figura extraída de (CRESESB, 2006).

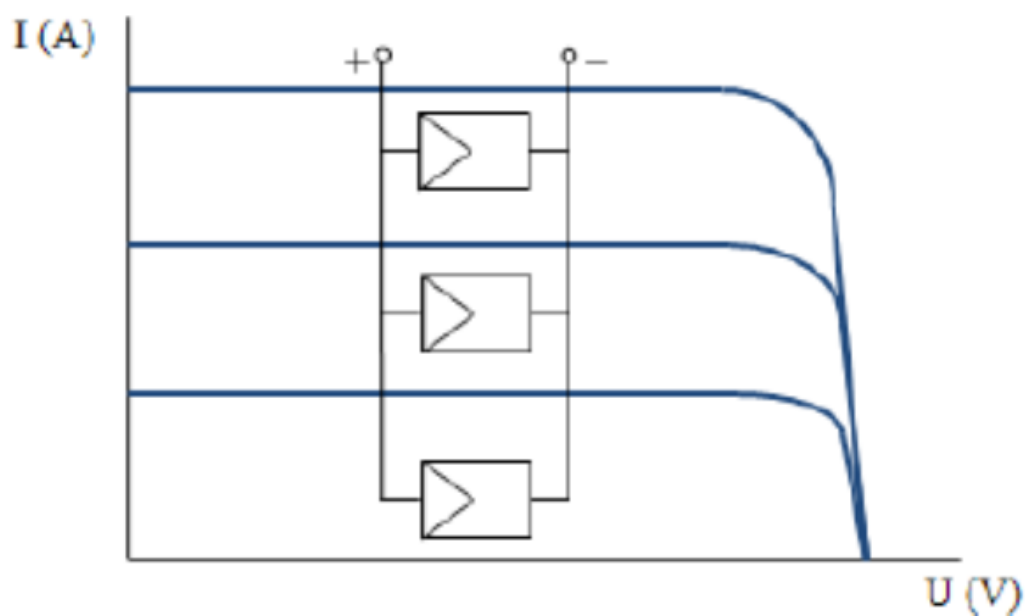


Figura 14 – Curva característica corrente-tensão de células conectadas em paralelo.

Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2014)

Quando conectadas em série, a corrente elétrica a circular no sistema será a mesma em todas as células, enquanto a tensão elétrica fornecida na saída será a soma da tensão de cada uma das células conectadas, conforme ilustram as Figuras 15 e 16 (SILVA, 2014) (CRESESB, 2006).

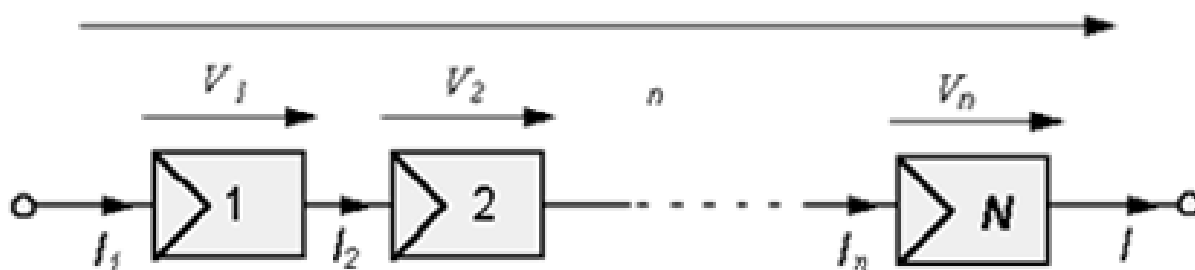


Figura 15 - Representação esquemática de células conectadas em série.

Fonte: Figura extraída de (CRESESB, 2006).

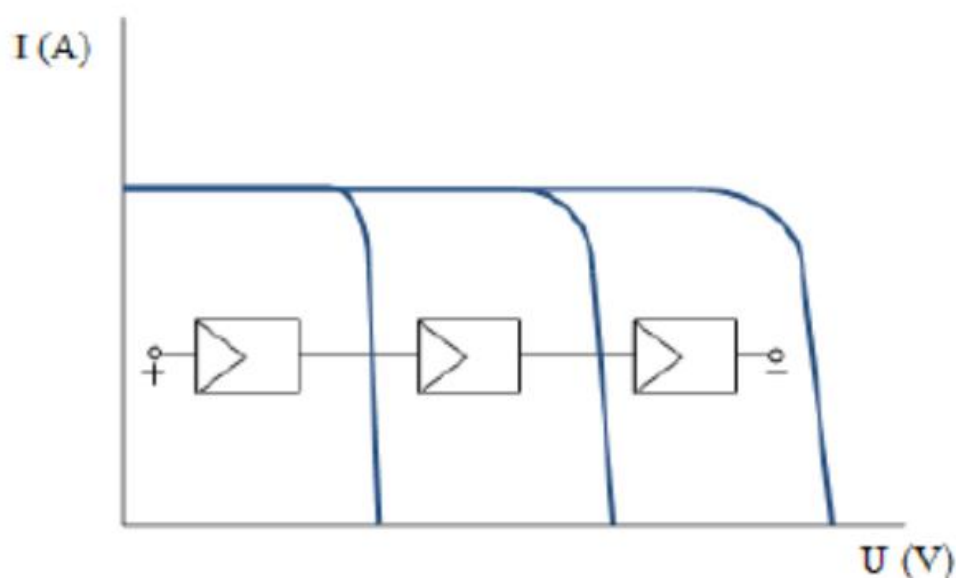


Figura 16 - Curva característica corrente-tensão de células conectadas em série.

Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2014).

É importante ressaltar que a mesma lógica utilizada para o cálculo da corrente e tensão de saída de células conectadas em série ou em paralelo, pode ser utilizada para a conexão elétrica de módulos fotovoltaicos em conjunto. Deve-se observar para que as tensões e correntes dos módulos interligados sejam iguais.

Cada módulo fotovoltaico possui uma relação corrente-tensão particular, bem como parâmetros elétricos individuais que os caracterizam. Para uma melhor compreensão, é feita uma breve explicação sobre as características elétricas destes dispositivos.

2.5.1 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

Segundo o (CRESESB; 2019), os módulos geralmente são especificados pela potência de pico (W_p), cujos parâmetros são obtidos considerando a Condição Padrão de Testes (STC - *Standard Test Conditions*), definida pela norma IEC 61215 (*International Electrotechnical Commission*): radiação solar de 1 kW/m^2 , temperatura de operação da célula de 25°C , Massa de Ar 1,5 e velocidade do vento de 1 m/s . No entanto, é possível, e muito provável, que determinados locais apresentem condições distintas. Sendo assim é importante que mais alguns parâmetros, capazes de levar

em consideração a variação do ambiente, sejam observados na caracterização e seleção de um módulo fotovoltaico. São estes:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): máxima tensão sob determinadas condições de temperatura e iluminação, correspondente a uma corrente igual a zero;
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): máxima corrente a ser produzida com uma tensão nula entre os terminais;
- Corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}): valor de corrente quando se obtém a máxima potência;
- Tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}): valor de tensão quando se obtém a máxima potência;
- Máxima potência (P_{mp}): ponto onde o valor de potência é máximo.

Para melhor entendimento, as Figura 17 e 18 mostram os gráficos com as curvas típicas e os parâmetros de um painel fotovoltaico genérico.

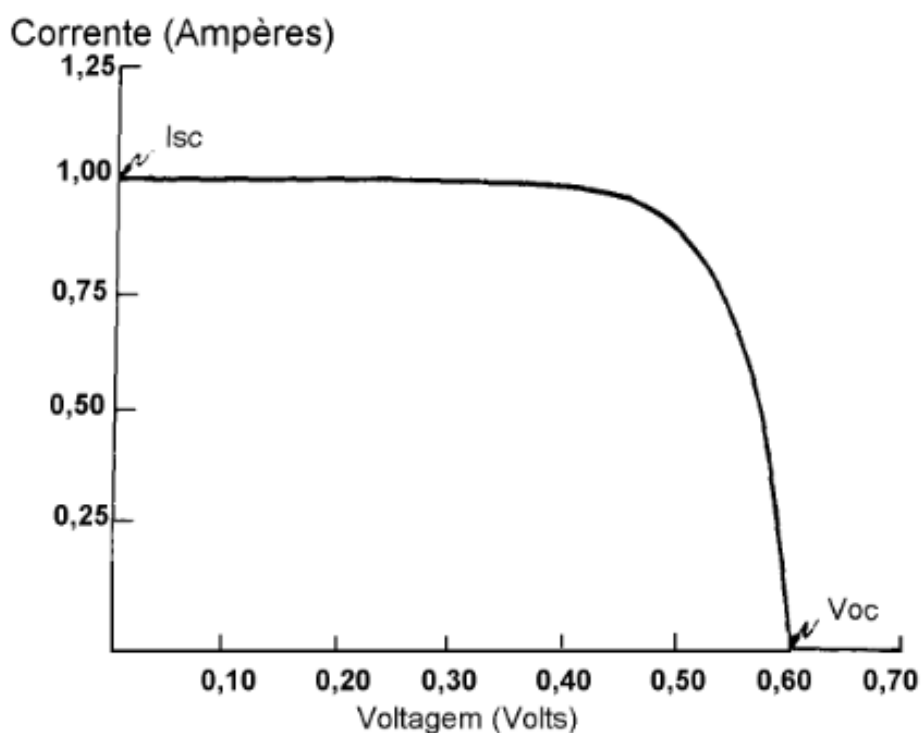


Figura 17 - Curva típica de I-V de um módulo fotovoltaico genérico.

Fonte: Figura extraída de (CRESESB, 2006).

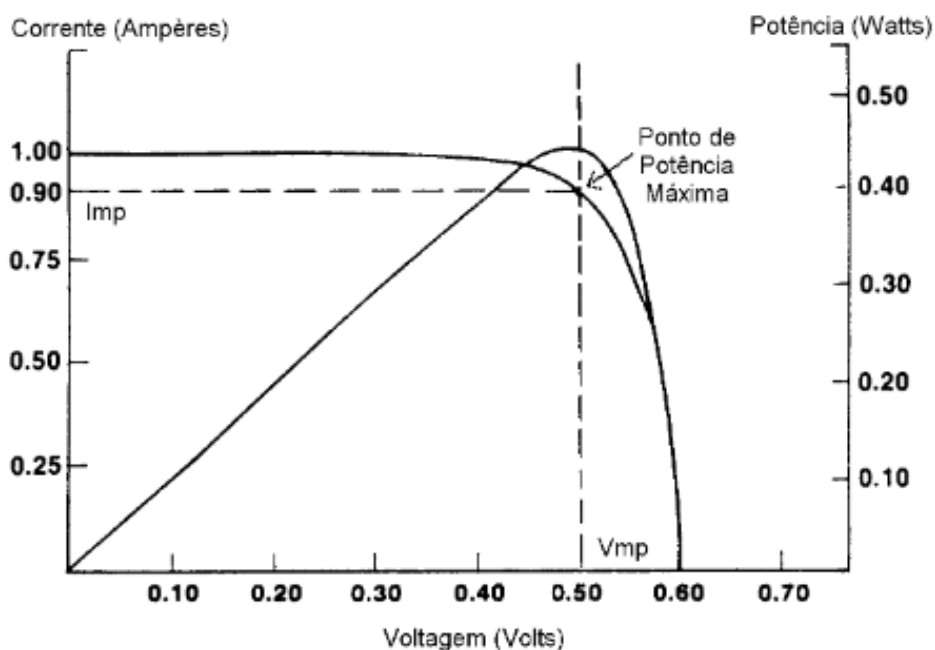


Figura 18 – Curva típica com parâmetros de potência máxima de um módulo fotovoltaico genérico.

Fonte: Figura extraída de (CRESESB, 2006).

Como dito anteriormente, os principais fatores a influenciar nas curvas característica de um módulo fotovoltaico são aqueles responsáveis por alterar o valor de seus parâmetros, levando-os para fora da Condição Padrão de Testes. São eles a irradiância e a temperatura de operação.

2.5.2 Influência da Radiação no Módulo Fotovoltaico

Como dito anteriormente, a radiação é um dos principais fatores a influenciar na produção de energia elétrica de um módulo fotovoltaico. Quanto maior for o espectro solar que atinge os painéis, quanto maior for o número de horas sol e menor for a massa de ar, maior será a energia de radiação disponível para a produção de energia elétrica, que implicará em uma corrente elétrica produzida (CANTOR, 2017).

É interessante observar a existência de fatores que impedem que a radiação direta que atinge as células solares seja a totalidade da radiação global. As nuvens, o albedo dos objetos, gotas de chuva e até mesmo a umidade presente no ar podem

causar a reflexão de parte da radiação a atingir um módulo fotovoltaico (CANTOR, 2017).

Alguns autores propõem métodos para obtenção de valores numéricos destes fatores através do uso de aparelhos de medição e equações físicas. Para o foco deste trabalho, basta a informação de que a corrente máxima é fornecida quando a irradiância solar atinge um valor de 1000 W/m^2 , a uma temperatura aproximada de 25°C (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

A Figura 19 ilustra como a irradiância atua na curva I-V de um módulo fotovoltaico.

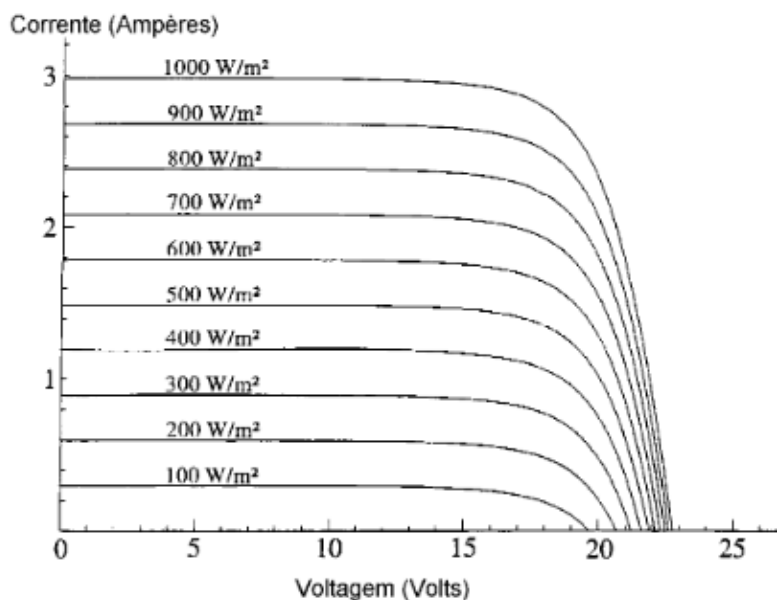


Figura 19 – Influência da radiação solar na curva de operação de um módulo fotovoltaico genérico.

Fonte: Figura extraída de (CRESESB, 2006).

2.5.3 Influência da Temperatura no Módulo Fotovoltaico

A influência da variação de temperatura em um módulo fotovoltaico está na potência máxima de operação e na tensão em que este é capaz de fornecer em seus terminais. Enquanto a corrente apresenta uma pequena variação com a mudança da temperatura, a tensão, por sua vez, varia drasticamente. O aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência energética do módulo diminua. A Figura 20 mostra

a diminuição dos pontos de operação nas curvas de potência máxima gerada na medida em que a temperatura aumenta (CANTOR, 2017) (CRESESB, 2006).

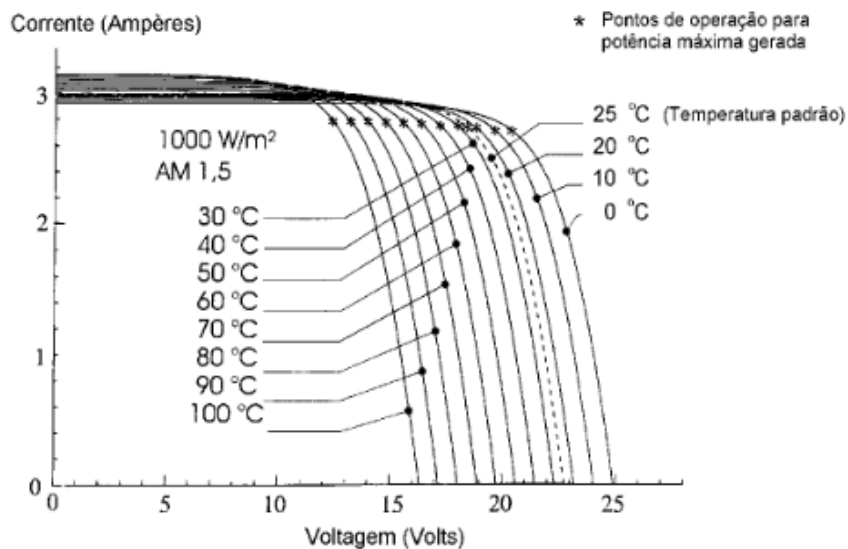


Figura 20 – Influência da temperatura na curva de operação de um painel solar genérico

Fonte: Figura extraída de (CRESESB, 2006).

Uma vez apresentados os conceitos necessários para a compreensão do trabalho, no próximo capítulo é apresentada a metodologia analítica para a simulação do comportamento elétrico de módulos fotovoltaicos.

3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Neste capítulo é apresentada a metodologia desenvolvida para simular o comportamento elétrico de módulos fotovoltaicos. Primeiramente, considerou-se o modelo elétrico do circuito equivalente de uma célula solar baseado no modelo de cinco parâmetros. Posteriormente, a partir do modelo da célula solar, implementou-se analiticamente a equação principal do módulo fotovoltaico.

3.1 Modelo Elétrico

Segundo o trabalho de Cubas, Pindado e Victoria (2014), a equação que descreve o comportamento de uma célula solar ideal é composta de dois termos, um relacionado à fonte e o outro à junção P-N, diodo ideal de *Shockley*, como mostram a Figura 21 e a Eq. (1),

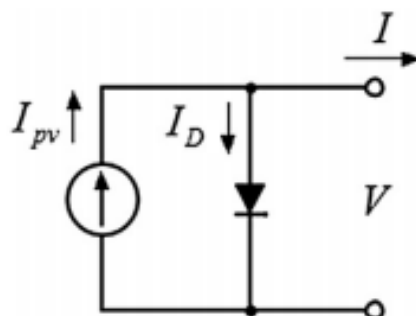


Figura 21 – Circuito equivalente de uma célula solar ideal.

Fonte: Figura extraída de (CUBAS; PINDADO; VICTORIA, 2014).

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right]. \quad (1)$$

O primeiro termo da Eq. (1), I_{pv} é a corrente fotovoltaica ou foto-corrente (A) entregue pela fonte dependente de corrente. O segundo termo é a corrente ideal (A) advinda da difusão e recombinação de elétrons e lacunas dos lados P e N da célula, onde I_0 é a corrente de saturação reversa (A), T é a temperatura (K), k_B é a constante

de Boltzmann ($1,38065 \times 10^{-23}$ J/K) e q é a carga do elétron (C). As últimas três variáveis são agrupadas para formar a equação da tensão térmica V_T e a variável N_s que é o número de células solares do módulo, é adicionada para que possa ser levado em consideração o número de células que contém o módulo fotovoltaico, como é mostrado na Eq. (2),

$$V_T = \frac{N_s k_B T}{q} . \quad (2)$$

Uma evolução do circuito ideal apresentado na Figura 21 e na Eq. (1) é adicionar dois resistores no circuito, visando a representação de um circuito elétrico mais real. Um é o resistor R_{sh} que representa as perdas internas e correntes de fugas nas junções P-N. R_{sh} é adicionado em paralelo com a fonte e o diodo, e é chamado de resistor *shunt* (Ω). O outro resistor, R_s , é adicionado em série e representa as perdas por efeito Joule devido às interconexões, pontos de solda e caixas de junções, por exemplo (CUBAS; PINDADO; VICTORIA, 2014). Este por sua vez é chamado de resistor série (Ω).

Uma constante adimensional, a , é adicionada ao termo da corrente de recombinação dos lados P e N. Essa constante é chamada de fator de idealidade. Assim, o circuito elétrico equivalente mais realista é mostrado na Figura 22.

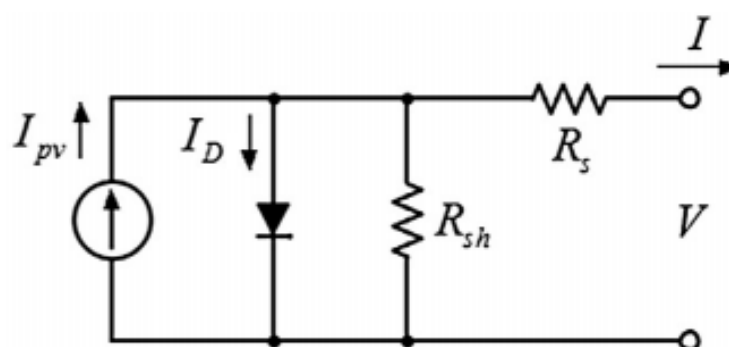


Figura 22 – Modelo do circuito equivalente de um diodo para uma célula solar real

Fonte: Figura extraída de (CUBAS; PINDADO; VICTORIA, 2014).

O circuito equivalente mostrado na Figura 22 é conhecido como modelo de cinco parâmetros (ou modelo de um diodo e dois resistores) e é um dos mais utilizados

no estudo do comportamento de células e/ou módulos fotovoltaicos. A equação que descreve o comportamento elétrico do módulo, é apresentada na Eq. (3).

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{aV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (3)$$

a mesma foi obtida aplicando as Leis de Kirchhoff da tensão e da corrente no circuito mostrado na Figura 22.

Com isso, pode-se determinar os quatro parâmetros restantes. Sendo assim, um método analítico para a obtenção da função da corrente em função da tensão é apresentado na próxima seção.

3.2 Função corrente-tensão $I = f(V)$

Como dito anteriormente, a equação que descreve o comportamento elétrico do módulo fotovoltaico é a Eq. (3). Analisando a Eq. (3), pode-se verificar que a mesma é um tipo de equação transcendental, cuja solução é geralmente obtida numericamente por meio do método de Newton-Raphson (REIS; 2017).

Entretanto, neste trabalho é implementado uma solução analítica completa para a obtenção da função corrente-tensão, $I = f(V)$, capaz de simular o comportamento elétrico de um módulo fotovoltaico. A solução desenvolvida neste trabalho baseou-se no trabalho de Cubas, Pindado e Victoria (2014). Partindo da Eq. (3), é possível rearranjá-la da seguinte maneira:

$$IR_{sh} = I_{pv}R_{sh} - I_0R_{sh} \left(e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} - 1 \right) - (V + IR_s)$$

$$IR_{sh} = I_{pv}R_{sh} - I_0R_{sh} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} + I_0R_{sh} - V - IR_s$$

$$I(R_{sh}R_s) = I_{pv}R_{sh} - I_0R_{sh} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} + I_0R_{sh} - V$$

$$I = \frac{1}{R_{sh} + R_s} \left(I_{pv} R_{sh} - I_0 R_{sh} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} + I_0 R_{sh} - V \right) \quad (4)$$

multiplicando a Eq. (4) por R_s ,

$$IR_s = \frac{R_s}{R_{sh} + R_s} \left(I_{pv} R_{sh} - I_0 R_{sh} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} + I_0 R_{sh} - V \right) \quad (5)$$

somando V em ambos os lados da Eq. (5),

$$\begin{aligned} V + IR_s &= \frac{R_s}{R_{sh} + R_s} \left(I_{pv} R_{sh} - I_0 R_{sh} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} + I_0 R_{sh} - V \right) + V \\ V + IR_s &= \frac{R_s}{R_{sh} + R_s} \left(I_{pv} R_{sh} - I_0 R_{sh} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} + I_0 R_{sh} \right) + \frac{VR_{sh}}{R_{sh} + R_s} \\ V + IR_s &= \frac{R_s}{R_{sh} + R_s} \left(I_{pv} R_{sh} - I_0 R_{sh} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} + I_0 R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \end{aligned} \quad (6)$$

dividindo ambos os lados da Eq. (6) por aV_T ,

$$\begin{aligned} \frac{V + IR_s}{aV_T} &= \frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv} R_{sh} - I_0 R_{sh} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} + I_0 R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \\ \frac{V + IR_s}{aV_T} + \frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} &= \frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv} R_{sh} + I_0 R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \end{aligned} \quad (7)$$

aplicando a exponencial em ambos os lados da Eq. (7),

$$\begin{aligned} \exp \left[\frac{V + IR_s}{aV_T} + \frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} \right] \\ = \exp \left[\frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv} R_{sh} + I_0 R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

aplicando a propriedade $\{e^{(A+B)} = e^A e^B\}$ na Eq. (8) tem-se:

$$\begin{aligned}
& e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} \exp \left[\frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} \right] \\
& = \exp \left[\frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv} R_{sh} + I_0 R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \right].
\end{aligned} \tag{9}$$

Multiplicando a Eq. (9) por $\frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)}$,

$$\begin{aligned}
& \frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} \exp \left[\frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} \right] \\
& = \frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \exp \left[\frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv} R_{sh} + I_0 R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \right]
\end{aligned} \tag{10}$$

Considerando que a Eq. (10) está escrita na forma:

$$X = Ye^Y \leftrightarrow Y = W(X), \tag{11}$$

onde W é a função de Lambert (CORLESS; 1996). A função W de Lambert não pode ser expressa em termos de funções elementares. Neste trabalho, utilizou-se a função pré-definida no MATLAB chamada de *lambertw*, na simulação das curvas.

Fazendo a seguinte mudança de variáveis:

$$Y = \frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}}$$

$$X = \frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \exp \left[\frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv} R_{sh} + I_0 R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \right]$$

e usando a relação de (11),

$$\begin{aligned}
& \frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} \\
& = W \left\{ \frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \exp \left[\frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv} R_{sh} + I_0 R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{12}$$

multiplicando ambos os lados da Eq. (12) por $\frac{aV_T(R_{sh}+R_s)}{I_0R_sR_{sh}}$,

$$e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} = \frac{aV_T(R_{sh}+R_s)}{I_0R_sR_{sh}} W \left\{ \frac{I_0R_sR_{sh}}{aV_T(R_{sh}+R_s)} \exp \left[\frac{R_s}{aV_T(R_{sh}+R_s)} \left(I_{pv}R_{sh} + I_0R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \right] \right\}$$

fazendo a seguinte mudança de variáveis,

$$u = \frac{I_0R_sR_{sh}}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \exp \left[\frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv}R_{sh} + I_0R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \right] \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{aV_T(R_{sh} + R_s)}{I_0R_sR_{sh}} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv}R_{sh} + I_0R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \quad (15)$$

assim,

$$u = \frac{e^\beta}{\alpha} \quad (16)$$

e tem-se que,

$$e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} = \alpha W(u) \quad (17)$$

aplicando logaritmo natural em ambos os lados da Eq. (17),

$$\ln \left(e^{\frac{V+IR_s}{aV_T}} \right) = \ln(\alpha W(u)) \quad (18)$$

$$\frac{V + IR_s}{aV_T} = \ln(\alpha W(u)) \quad (19)$$

Utilizando a propriedade da função W de Lambert (CORLESS; 1996),

$$\ln(\alpha W(u)) = \ln \alpha + \ln u - W(u) \quad (20)$$

$$\ln(\alpha W(u)) = \ln \alpha + \ln \frac{e^\beta}{\alpha} - W(u)$$

$$\ln(\alpha W(u)) = \ln \alpha + \ln e^\beta - \ln \alpha - W(u)$$

$$\ln(\alpha W(u)) = \ln e^\beta - W(u) = \beta - W(u). \quad (21)$$

Substituindo a Eq. (21) na Eq. (19),

$$\frac{V + IR_s}{aV_T} = \beta - W(u)$$

$$\frac{V}{aV_T} + \frac{IR_s}{aV_T} = \beta - W(u)$$

$$\frac{IR_s}{aV_T} = -\frac{V}{aV_T} + \beta - W(u) \quad (22)$$

multiplicando ambos os lados da Eq. (22) por $\frac{aV_T}{R_s}$,

$$I = \frac{aV_T}{R_s} \left[-\frac{V}{aV_T} + \beta - W(u) \right]$$

$$I = -\frac{V}{R_s} + \frac{aV_T}{R_s} \beta - \frac{aV_T}{R_s} W(u)$$

$$I = -\frac{V}{R_s} + \frac{aV_T}{R_s} \left[\frac{R_s}{aV_T(R_{sh} + R_s)} \left(I_{pv}R_{sh} + I_0R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s} V \right) \right] - \frac{aV_T}{R_s} W(u)$$

$$I = -\frac{V}{R_s} + \frac{I_{pv}R_{sh} + I_0R_{sh} + \frac{R_{sh}}{R_s}V}{R_{sh} + R_s} - \frac{aV_T}{R_s} W(u)$$

e finalmente, a equação que expressa $I = f(V)$ é,

$$I(V) = -\frac{V}{R_s} + \frac{R_{sh} \left(I_{pv} + I_0 + \frac{V}{R_s} \right)}{R_{sh} + R_s} - \frac{aV_T}{R_s} W \left(\frac{I_0 R_s R_{sh}}{aV_T (R_{sh} + R_s)} e^{\frac{R_{sh}}{aV_T (R_{sh} + R_s)} (R_s I_{pv} + R_s I_0 + V)} \right). \quad (23)$$

Para o funcionamento adequado do modelo, é necessário obter os cinco parâmetros: I_{pv} , I_0 , R_{sh} , R_s e a . Dessa forma, torna-se necessário encontrar expressões que representem o comportamento desses parâmetros em função dos dados de fabricantes dos módulos.

3.3 Cálculo dos Parâmetros

Em geral, os dados disponibilizados pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos incluem as seguintes informações: curto-circuito quando $V = 0$ e $I = I_{sc}$, circuito aberto quando $V = V_{oc}$ e $I = 0$ e potência máxima $V = V_{mp}$ e $I = I_{mp}$. Dessa forma, é possível obter quatro condições de contorno, que não são suficientes para a determinação dos cinco parâmetros. Assim, neste trabalho considerou-se o valor do fator de idealidade, $a = 1,3$, que de acordo com os trabalhos de Cubas, Pindado e Victoria (2014) e de Cubas, Pindado e Manuel (2014), tal valor deve estar entre 1 e 1,5.

Aplicando-se diretamente as condições de curto circuito na Eq. (3), onde $I = I_{sc}$ e $V = 0$, é possível obter a seguinte expressão:

$$I_{sc} = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}}. \quad (24)$$

De acordo com Cubas, Pindado e Victoria (2014), pode-se verificar que o segundo termo do lado direito da Eq. (24) pode ser desprezado, permitindo que a expressão seja reescrita como mostra a sequência abaixo que resulta na Equação (6):

$$I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{SC} R_s}{a V_T} \right) - 1 \right] \approx 10^{-5}$$

$$I_{pv} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{SC}. \quad (25)$$

Agora, aplicando-se as condições de circuito aberto, onde $I = 0$ e $V = V_{OC}$, a Eq. (3) pode ser reescrita como mostra a Eq. (26),

$$0 = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{OC}}{a V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{OC}}{R_{sh}}$$

$$I_{pv} = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{OC}}{a V_T} \right) - 1 \right] + \frac{V_{OC}}{R_{sh}}. \quad (26)$$

Novamente, fazendo uma análise da magnitude dos termos da Eq. (26), observa-se que o segundo termo pode ser desprezado (CUBAS; PINDADO; VICTORIA, 2014). Sendo assim, I_{pv} pode ser substituída utilizando a Eq. (25) e a corrente de saturação I_0 pode ser isolada e reduzida a partir da Eq. (26), da seguinte maneira,

$$\frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{SC} = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{OC}}{a V_T} \right) \right] + \frac{V_{OC}}{R_{sh}}$$

$$\frac{(R_{sh} + R_s) I_{SC} - V_{OC}}{R_{sh}} = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{OC}}{a V_T} \right) \right]$$

$$I_0 = \frac{(R_{sh} + R_s) I_{SC} - V_{OC}}{R_{sh} \exp \left(\frac{V_{OC}}{a V_T} \right)}. \quad (27)$$

Considerando as condições de máxima potência, onde $I = I_{mp}$ e $V = V_{mp}$, a partir da Eq. (3) é possível obter diretamente,

$$I_{mp} = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}}. \quad (28)$$

A quarta condição a ser analisada para obtenção dos quatro parâmetros restantes, é o pico no ponto de máxima potência.

A potência elétrica pode ser expressada como:

$$P = IV \quad (29)$$

Ao derivar a Eq. (29) em relação à tensão (V), obtêm-se o seguinte resultado:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = V \frac{\partial I}{\partial V} + I. \quad (30)$$

Impondo a condição de pico no ponto de máxima potência ($P = 0$), a seguinte expressão é obtida,

$$\left(\frac{\partial I}{\partial V} \right) \Big|_{I_{mp}V_{mp}} = - \frac{I_{mp}}{V_{mp}}. \quad (31)$$

Derivando a Eq. (3) em relação a tensão e aplicando o ponto de máxima potência, obtêm-se:

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I_0}{aV_T} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV} \right) \exp \left(\frac{V + IR_s}{aV_T} \right) - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 + \frac{dI}{dV} R_s \right) \quad (32)$$

$$- \frac{I_{mp}}{V_{mp}} = - \frac{I_0}{aV_T} \left(1 - \frac{R_s I_{mp}}{V_{mp}} \right) \exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{aV_T} \right) - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right). \quad (33)$$

Segundo Cubas, Pindado e Victoria (2014), levando em consideração as Eqs. (25), (27) e (28) é possível obter uma expressão implícita de R_s , como função dos parâmetros iniciais, a partir da Eq. (33),

$$\frac{aV_T V_{mp}(2I_{mp} - I_{SC})}{(V_{mp}I_{SC} + V_{OC}(I_{mp} - I_{SC})) (V_{mp} - I_{mp}R_s) - aV_T(V_{mp}I_{SC} - V_{OC}I_{mp})} = \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s - V_{OC}}{aV_T}\right). \quad (34)$$

Como a Eq. (34) é uma equação transcendental, é possível relacioná-la com a função W de Lambert. Entretanto, neste trabalho é utilizado o valor de R_s obtido no trabalho de Cubas, Pindado e Victoria (2014) cuja expressão é,

$$R_s = A\{W_{-1}[B\exp(C)] - (D + C)\}, \quad (35)$$

onde:

$$A = \frac{aV_T}{I_{mp}} \quad (36)$$

$$B = \frac{V_{mp}(2I_{mp} - I_{SC})}{(V_{mp}I_{SC} + V_{OC}(I_{mp} - I_{SC}))} \quad (37)$$

$$C = \frac{2V_{mp} - V_{OC}}{aV_T} + \frac{(V_{mp}I_{SC} - V_{OC}I_{mp})}{(V_{mp}I_{SC} + V_{OC}(I_{mp} - I_{SC}))} \quad (38)$$

$$D = \frac{V_{mp} - V_{OC}}{aV_T}. \quad (39)$$

Ressaltando que a função W de Lambert possui dois ramos definidos em seu intervalo de validade, considerando o lado real da variável x , a função W é definida para $x \geq (-1/e)$ e tem valor duplo no intervalo $[-1/e, 0]$, sendo os dois ramos da função expressos como $W_0(x)$ para $W(x) \geq -1$, e $W_{-1}(x) \leq -1$ (CORLESS; 1996). Assim, neste trabalho, considerou-se que a função W de Lambert utilizada na Eq. (23) é $W_0(x)$ e na Eq. (35) é empregado $W_{-1}(x)$.

De acordo com o trabalho de Cubas, Pindado e Victoria (2014), a partir de uma análise de magnitude dos termos da Eq. (28) combinando-a com a Eq. (34), também é possível obter-se a seguinte equação explícita de R_{sh} ,

$$R_{sh} = \frac{(V_{mp} - I_{mp}R_s)(V_{mp} - R_s(I_{SC} - I_{mp}) - aV_T)}{(V_{mp} - I_{mp}R_s)(I_{SC} - I_{mp}) - aV_T I_{mp}}. \quad (40)$$

Finalmente, as Eqs. (25), (27), (35) e (40), juntamente com os dados disponibilizados pelos fabricantes de módulos, podem ser utilizadas para determinar os cinco parâmetros: I_{pv} , I_0 , R_s , R_{sh} e a é considerado igual a 1,3.

3.4 Dependência dos fatores ambientais nos módulos fotovoltaicos

Conforme dito anteriormente, alguns fatores ambientais como variações na temperatura e irradiância causam mudanças no comportamento de um módulo fotovoltaico, alterando suas curvas características I-V e P-V.

Com o intuito de tornar a metodologia desenvolvida mais robusta, é apresentado nesta seção as expressões dos parâmetros do módulo fotovoltaico que dependem da temperatura e da irradiação solar. Primeiramente são apresentadas as expressões em função da temperatura de operação obtidas do trabalho de Cubas, Pindado e Manuel (2014),

$$V_{OC,T} = V_{OC,T_r} \left(1 + \frac{\beta V_{OC}(T - T_r)}{100} \right) \quad (41)$$

$$V_{mp,T} = V_{mp,T_r} \left(1 + \frac{\beta V_{mp}(T - T_r)}{100} \right) \quad (42)$$

$$I_{SC,T} = I_{SC,T_r} \left(1 + \frac{\alpha I_{SC}(T - T_r)}{100} \right) \quad (43)$$

$$I_{mp,T} = I_{mp,T_r} \left(\frac{100 + \gamma(T - T_r)}{100 + \beta V_{mp}(T - T_r)} \right) \quad (44)$$

T_r é a temperatura de referência STC ($25 + 273,15 = 298,15$ K), βV_{OC} e βV_{mp} são respectivamente a variação percentual das tensões de circuito aberto e máxima potência quando a temperatura aumenta um grau, αI_{SC} é a variação percentual da corrente de curto circuito quando a temperatura aumenta um grau; e γ é a variação percentual da potência máxima com a temperatura. É importante ressaltar que βV_{OC} , βV_{mp} , αI_{SC} e γ são dados fornecidos pelo fabricante do módulo. Quando βV_{mp} não é fornecido considera-se $\beta V_{mp} \approx \beta V_{OC}$.

Por fim, pode-se apresentar a expressão do parâmetro I_{pv} que depende da irradiação solar (CUBAS; PINDADO; MANUEL, 2014),

$$I_{pv,G} = I_{pv,G_r} \frac{G}{G_r} \quad (45)$$

onde G é a irradiância solar que atinge o módulo, $I_{pv,G}$ é a foto-corrente entregue pela fonte de corrente do circuito equivalente, e G_r e I_{pv,G_r} são os valores de referência em STC.

Assim, de posse da Eq. (23) que representa a função de $I = f(V)$ e das Eqs. (25), (27), (35) e (40), que são utilizadas para calcular os parâmetros do módulo, juntamente com os dados disponibilizados pelos fabricantes, incluindo as correções de temperatura e irradiação solar apresentadas nas Eqs. (41), (42), (43), (44) e (45), pode-se simular no MATLAB o comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da metodologia desenvolvida neste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da metodologia desenvolvida no capítulo 3. Primeiramente validou-se a simulação do módulo fotovoltaico com as curvas experimentais do CS6K-295MS. Posteriormente, aplicou-se a metodologia em dois exemplos de aplicação.

4.1 Validação da Metodologia

Os dados do módulo CS6K-295MS utilizado para validação do modelo, encontram-se na Tabela 1 e foram obtidos através do *datasheet* oferecido pelo fabricante Canadian Solar.

Tabela 1 – Dados de fábrica do módulo fotovoltaico CS6K-295MS.

Fabricante	Canadian Solar
Modelo	CS6K-295MS
Tecnologia	Monocristalino
Eficiência	18,02%
Potência nominal (P_{max})	295 W
Tensão para máxima potência (V_{mp})	32,3 V
Corrente para máxima potência (I_{mp})	9,14 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	39,5 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	9,75 A
Número de células (N)	60
Coefficiente de temperatura da potência (γ)	-0,39% / °C
Coefficiente de temperatura da tensão (βV_{oc})	-29% / °C
Coefficiente de temperatura da corrente (αI_{sc})	0,05% / °C

Fonte: Adaptado de (CANADIANSOLAR, 2017).

De posse dos dados do módulo, utilizou-se o MATLAB na implementação das equações apresentadas no capítulo 3, visando a obtenção das curvas necessárias para a validação. Afim de comparar as curvas obtidas por meio do modelo simulado com as fornecidas pelo fabricante no *datasheet* do módulo, utilizou-se o *software* aberto *WebPlotDigitizer* para extrair as curvas mostradas na Figura 23 e coloca-las, em um mesmo gráfico, com as curvas simuladas.

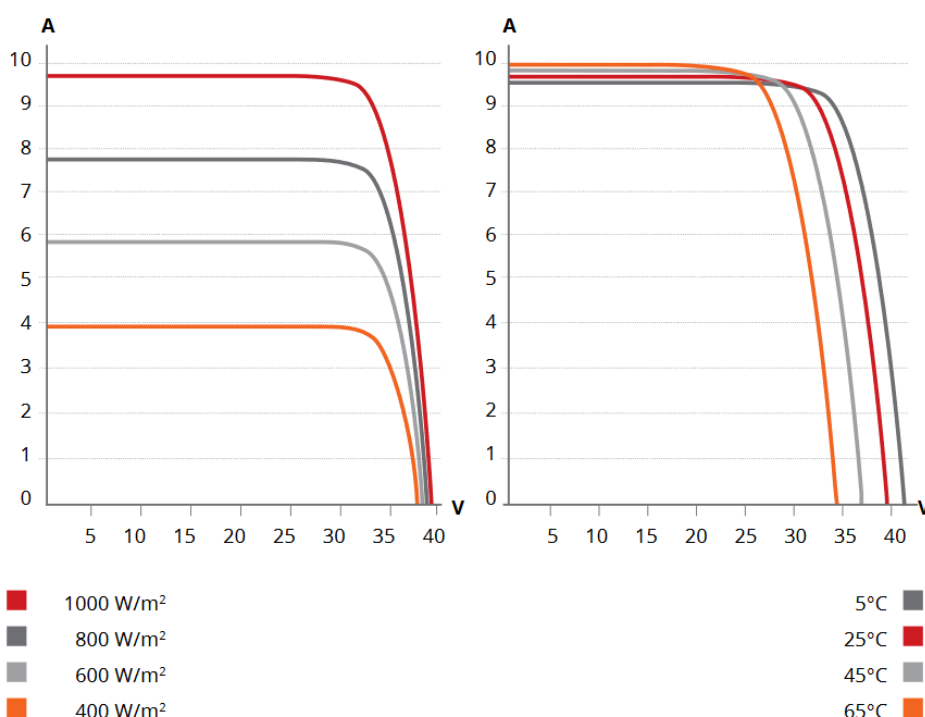


Figura 23 - Curvas de operação do módulo CS6K-295MS extraída do *datasheet*.

Fonte: Figura extraída de (CANADIANSOLAR, 2017).

As Figuras 24 e 25 mostram os resultados obtidos, implementando a Eq. (23) que representa a função de $I = f(V)$ e das Eqs. (25), (27), (35) e (40), que são utilizadas para calcular os parâmetros do módulo, juntamente com os dados disponibilizados pelos fabricantes, incluindo as correções de temperatura e irradiação solar apresentadas nas Eqs. (41), (42), (43), (44) e (45).

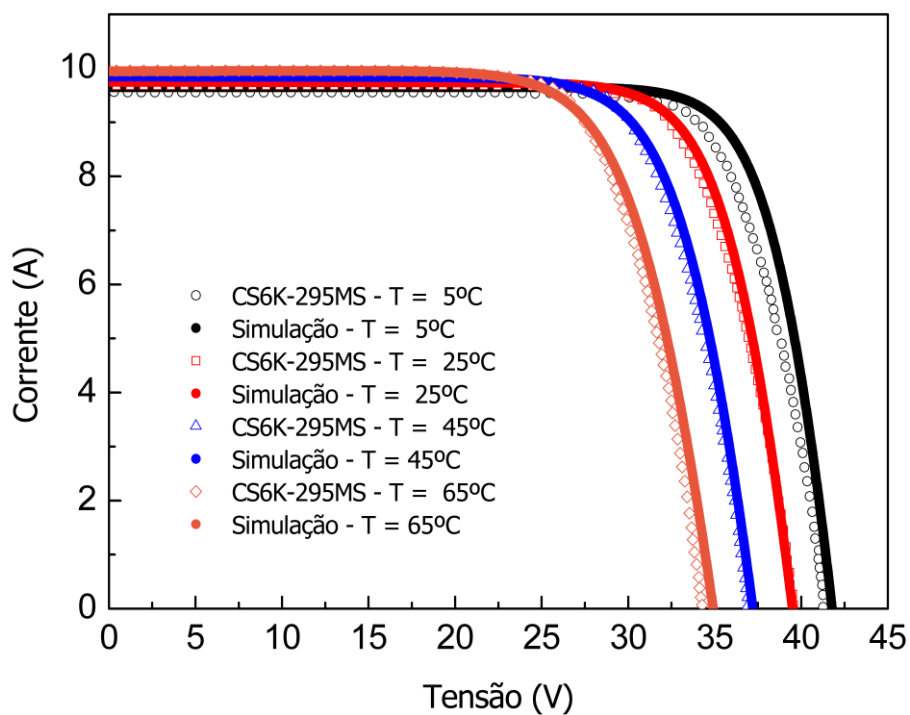


Figura 24 – Comparação de curvas I-V simuladas e extraídas do *datasheet* variando com a temperatura.

Fonte: Figura adaptada de (CANADIANSOLAR, 2017).

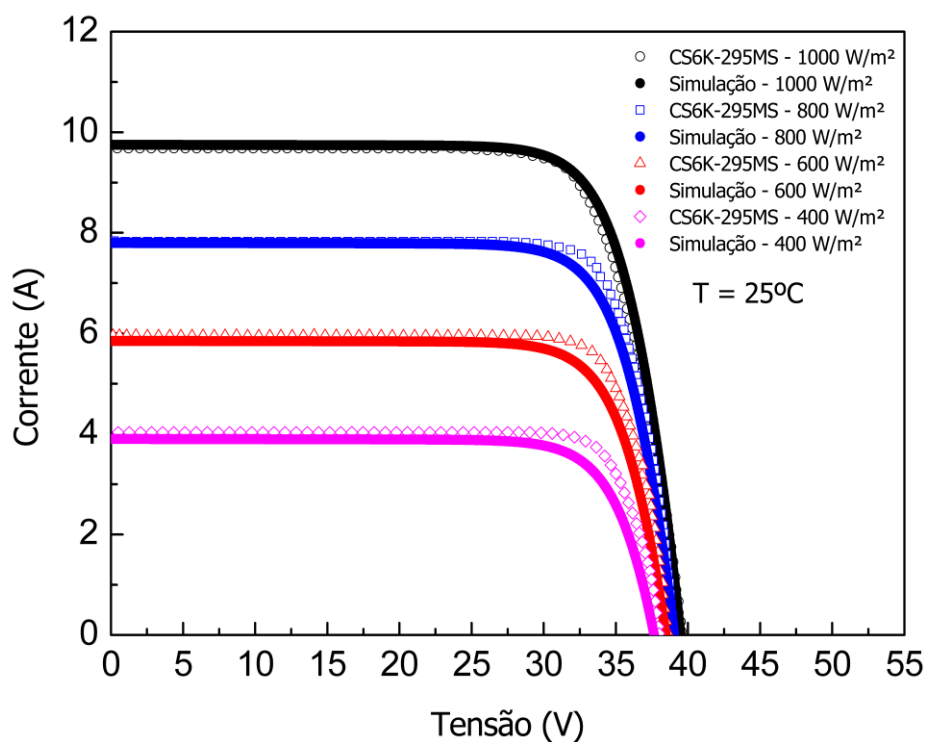


Figura 25 - Comparação entre as curvas I-V simuladas e extraídas do *datasheet* variando com a irradiância.

Fonte: Figura adaptada de (CANADIANSOLAR, 2017).

Para obtenção das curvas de P-V, basta multiplicar o resultado da Eq. (23) pela tensão no mesmo intervalo. Lembrando que o fator de idealidade considerado neste trabalho foi igual a 1,3, em todas as simulações (CUBAS; PINDADO; VICTORIA, 2014).

Analisando as Figuras 24 e 25 observa-se que as curvas simuladas se aproximam das curvas experimentais fornecidas pelo fabricante. A pequena diferença observada visualmente se deve a limitação do modelo para baixas temperaturas e baixa irradiação solar, entretanto o modelo é utilizado em condições de temperaturas superiores aos 25°C de STC e com um nível de radiação solar igual a 1000 W/m².

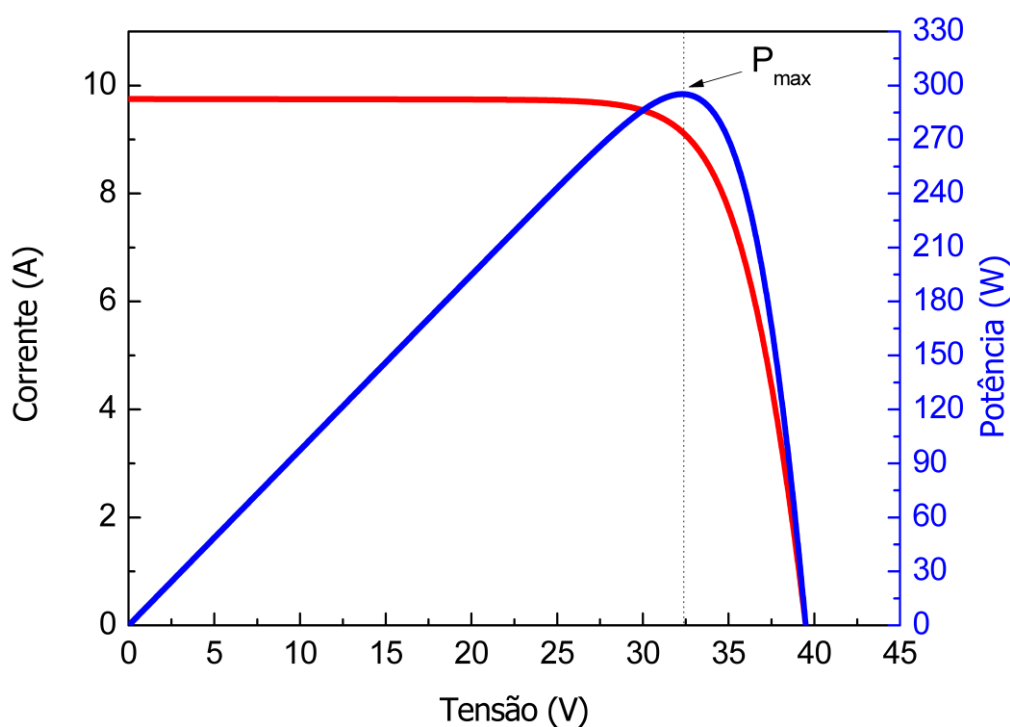


Figura 26 - Curva I-V e curva P-V simuladas com o modelo elétrico.

Fonte: (Acervo do autor; 2019).

A curva de potência obtida com o procedimento utilizado para obtenção do ponto de máxima potência, juntamente com a curva I-V é mostrada na Figura 26. Esse processo é repetido sempre que necessário determinar o valor da potência de pico.

As Figuras 27 e 28 foram obtidas pela simulação, pois as curvas de potência em função da temperatura e da radiação solar não são fornecidas nos dados de fabricantes do módulo CS6K-295MS. Estas são apresentadas como uma demonstração de utilidade para o modelo estabelecido, e fornecem uma forma

adicional de avaliar o comportamento da potência do módulo fotovoltaico com a variação da temperatura e irradiância. Além disso, com os dados experimentais fornecidos nas curvas do *datasheet* do módulo, é possível estipular os valores de pico para cada valor de temperatura, permitindo assim mais uma forma de comparação e validação do modelo estabelecido. Os valores de pico obtidos com a simulação, mostrados na Figura 27, bem como os obtidos por meio dos dados experimentais de fábrica são apresentados na Tabela 2 e comparados por meio de uma porcentagem de concordância.

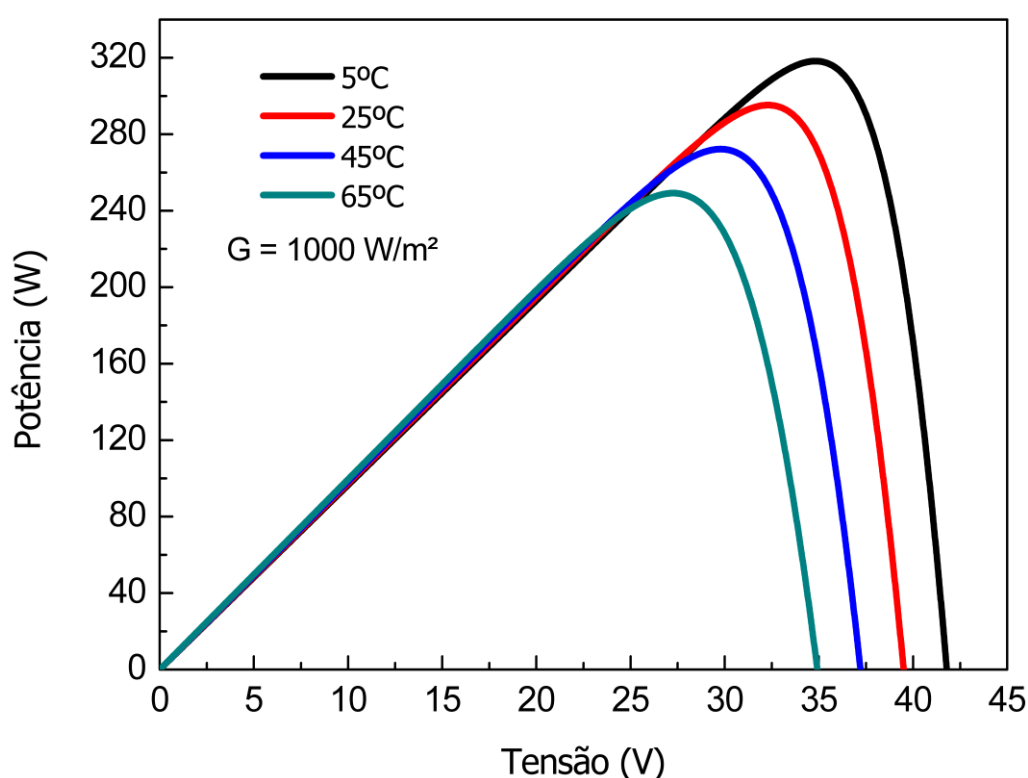


Figura 27 - Simulação da curva P-V com a variação da temperatura.

Fonte: (Acervo do autor; 2019)

Tabela 2 - Comparação entre dados de pico simulados e obtidos a partir do datasheet do módulo CS6K-295MS.

Temperatura (°C)	V _{mp} (V)	P _{mp} simulado (W)	P _{mp} CSK-295MS (W)	Concordância (%)
5	34,83	318,25	301,14	94,32
25	32,32	295,22	292,41	99,0
45	29,78	272,19	272,73	99,8
65	27,26	249,17	249,56	99,8

Fonte: (Acervo do autor; 2019).

Com o comportamento das curvas na Figura 27 observa-se uma diminuição considerável da potência fornecida pelo módulo com o aumento da temperatura de operação, para um valor constante de irradiância, 1000 W/m^2 . Este comportamento atende ao esperado, visto que ao se observar as curvas fornecidas pelo fabricante, o mesmo efeito se mostra presente.

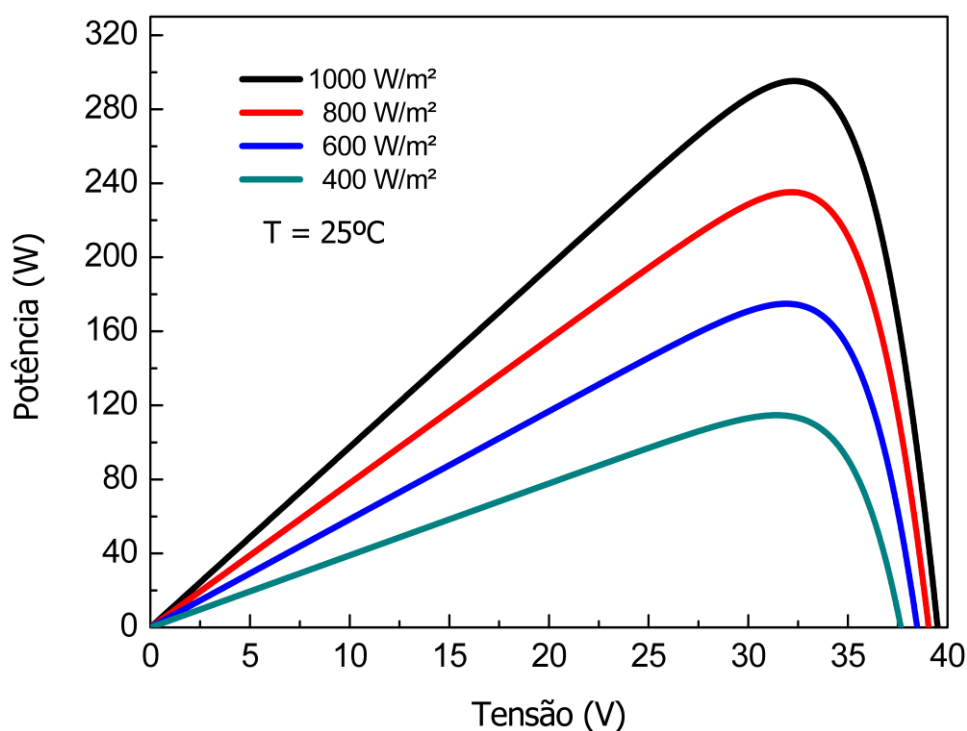


Figura 28 - Simulação da curva P-V com a variação da irradiância.

Fonte: (Acervo do autor; 2019).

Na Figura 28, o comportamento das curvas mostra que, conforme o esperado, a diminuição da irradiância incidente no módulo para um mesmo valor de temperatura de operação, 25°C , causa uma diminuição da potência de operação do módulo.

Observou-se com os dados da Tabela 2 que a metodologia desenvolvida mostrou-se confiável ao apresentar uma concordância mínima de 94,32% em comparação com os dados de fabricante do módulo CS6K-295MS.

Uma vez validado o modelo, são apresentados a seguir dois exemplos de aplicação utilizando dados de diferentes módulos fotovoltaicos.

4.2 Exemplos de Aplicação

Nesta seção são apresentados dois exemplos de aplicação da metodologia desenvolvida e validada. Em cada exemplo são utilizados os parâmetros de fábrica de módulos fotovoltaicos distintos.

Para as aplicações no primeiro e segundo exemplos, foi necessário determinar a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos, e assim, neste trabalho, utilizou-se a expressão apresentada por Chenni (2007),

$$T_{OP} = 0,943T_{amb} + 0,028G - 1,528WS + 4,3 \quad (46)$$

onde T_{OP} é a temperatura de operação do módulo fotovoltaico ($^{\circ}\text{C}$), T_{amb} é a temperatura do ambiente ($^{\circ}\text{C}$), G é a irradiância solar no módulo (W/m^2) e WS é a velocidade do vento (m/s).

No segundo exemplo, foi necessário utilizar uma estimativa da energia gerada por um módulo fotovoltaico durante um dia (MIRANDA, 2014), cuja expressão é

$$E_g = \text{HSP} \frac{P_{OP}(G, T_{OP})}{1000} \text{TD} \quad (47)$$

onde E_g é a energia gerada em um dia (kWh), HSP é a quantidade média de horas de sol pleno diária (h/dia), P_{OP} é a potência de operação (W) dada em função da irradiância G (W/m^2) e da temperatura de operação do módulo T_{OP} ($^{\circ}\text{C}$), e TD é a taxa de desempenho do sistema (%) estimada com o valor de 80% (SILVA E CALDAS, 2016).

4.2.1 Exemplo de aplicação 1: Potência de operação efetiva em função da temperatura de operação e do tempo de uso do módulo

Com os dados retirados do *datasheet* do painel JKM390M-72 da Jinko Solar, apresentados na Tabela 3, implementou-se a metodologia validada na seção anterior.

As curvas de I-V e P-V foram novamente extraídas dos dados experimentais de fábrica utilizando o *WebPlotDigitizer*, e então comparadas com as obtidas na simulação conforme mostra a Figura 30. A Figura 29 mostra as curvas experimentais extraídas do *datasheet*.

Tabela 3 - Dados de fábrica do módulo fotovoltaico JKM390M-72.

Fabricante	Jinko Solar
Modelo	JKM390M-72
Tecnologia	Monocristalino
Eficiência	19,67%
Potência nominal (P_{max})	390 W
Tensão para máxima potência (V_{mp})	41,1 V
Corrente para máxima potência (I_{mp})	9,49 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	49,3 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	10,12 A
Número de células (N)	72
Coefficiente de temperatura da potência (γ)	-0,37% / °C
Coefficiente de temperatura da tensão (βV_{oc})	-28% / °C
Coefficiente de temperatura da corrente (αI_{sc})	0,048% / °C

Fonte: Adaptado de (JINKOSOLAR, 2019).

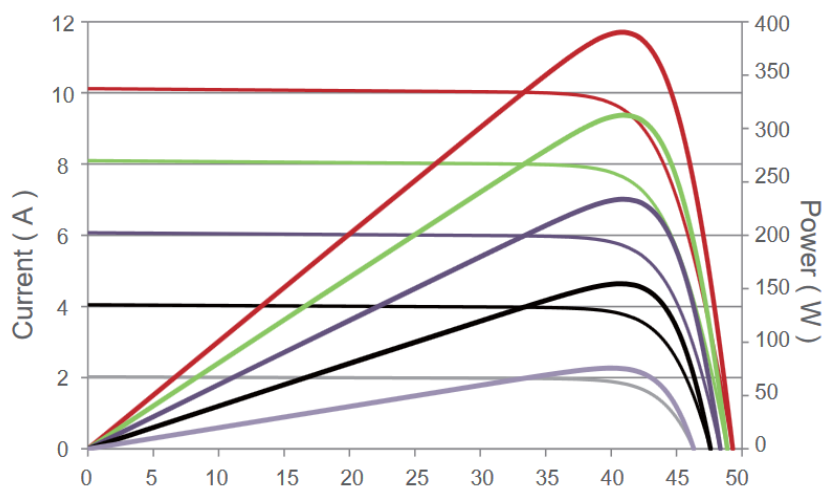


Figura 29 - Curvas de I-V e P-V do módulo JKM390M-72, fornecidas pelo *datasheet*.

Fonte: (JINKOSOLAR; 2019).

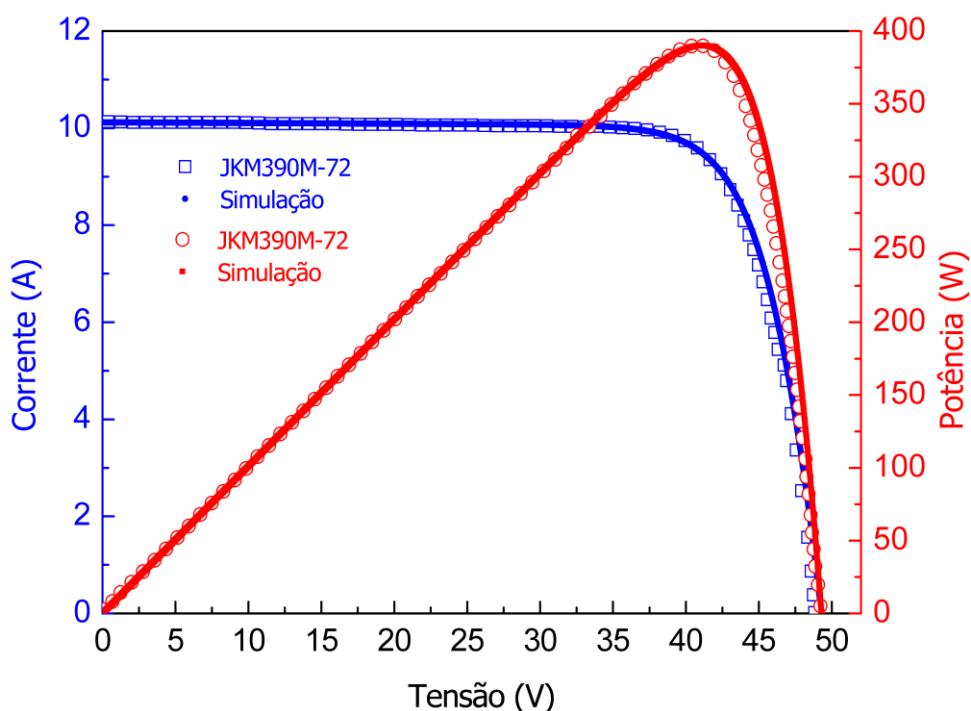


Figura 30 – Comparação das curvas I-V e P-V simuladas e extraídas do *datasheet*.

Fonte: (Acervo do autor; 2019)

Analisando visualmente a Figura 30 observa-se que as curvas simuladas se aproximam das obtidas experimentalmente pelo fabricante, garantindo novamente a validação do modelo. Para uma melhor consolidação a Tabela 4 mostra os valores de potência máxima simulados e experimentais, cuja concordância foi de 99,9%.

Tabela 4 - Comparação entre dados de pico simulados e obtidos a partir do datasheet do módulo JKM390M-72.

Temperatura (°C)	V_{mp} (V)	P_{mp} simulado (W)	P_{mp} CSK-295MS (W)	Concordância (%)
25	41,1	390,04	390	99,9

Fonte: (Acervo do autor; 2019)

Considerando um intervalo de 20°C a 100°C (variando de 10°C) para a temperatura de operação do módulo, calculou-se a potência máxima por meio da simulação do módulo JKM390M-72. A Tabela 5 mostra os valores obtidos.

Tabela 5 - Comparação entre dados de pico simulados e obtidos a partir do datasheet do módulo JKM390M-72.

Temperatura de operação (°C)	Potência máxima simulada (W)
20	397,25
30	382,82
40	368,39
50	353,96
60	339,53
70	325,1
80	310,67
90	296,23
100	281,8

Fonte: (Acervo do autor; 2019).

A partir dos valores mostrados na Tabela 5, obteve-se um gráfico de potência de operação em função da temperatura de operação. O resultado é ilustrado na Figura 31.

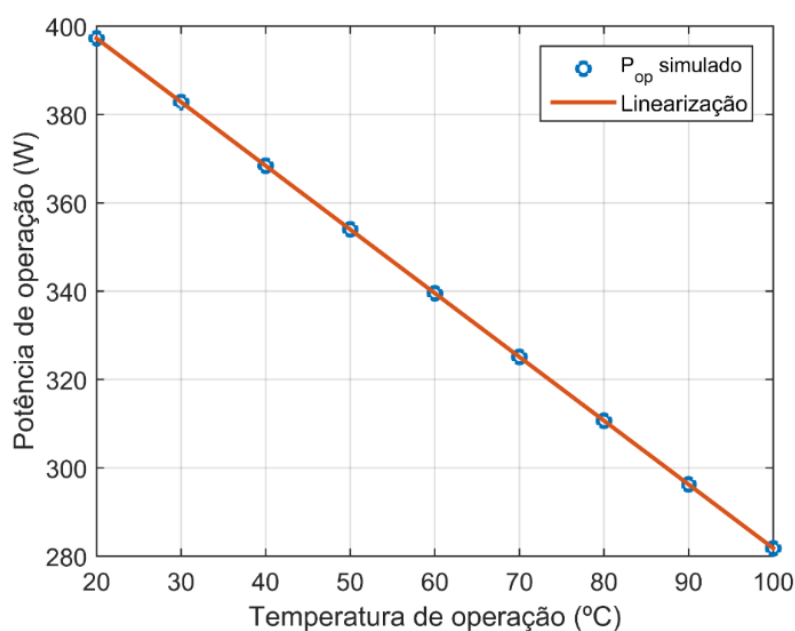


Figura 31 - Potência de operação em função da temperatura de operação obtido por meio de simulação.

Fonte: (Acervo do autor; 2019)

Utilizando a função *polyfit* do MATLAB, obteve-se uma equação linear da potência de operação do módulo utilizado em função da temperatura de operação. A equação obtida foi,

$$P_{op}(T_{op}) = -1,4432T_{op} + 426,1148 \quad (48)$$

Afim de validar a expressão obtida considerou-se uma temperatura de operação de 25°C, onde o valor de potência de operação retornado deve ser próximo de 390 W, que é a potência nominal fornecida pelo fabricante. O resultado obtido foi:

$$P_{op}(25) = -1,4432 * 25 + 426,1148 = 390,035 \text{ W.}$$

Sendo assim, houve uma concordância de 99,99% entre o valor obtido com a Equação (48) e o valor fornecido pelos dados de fábrica.

A Jinko Solar disponibiliza em seu *datasheet* um gráfico linear, Figura 32, com uma estimativa da potência que seu módulo fotovoltaico deve fornecer ao longo do seu tempo de operação, aproximadamente 25 anos.

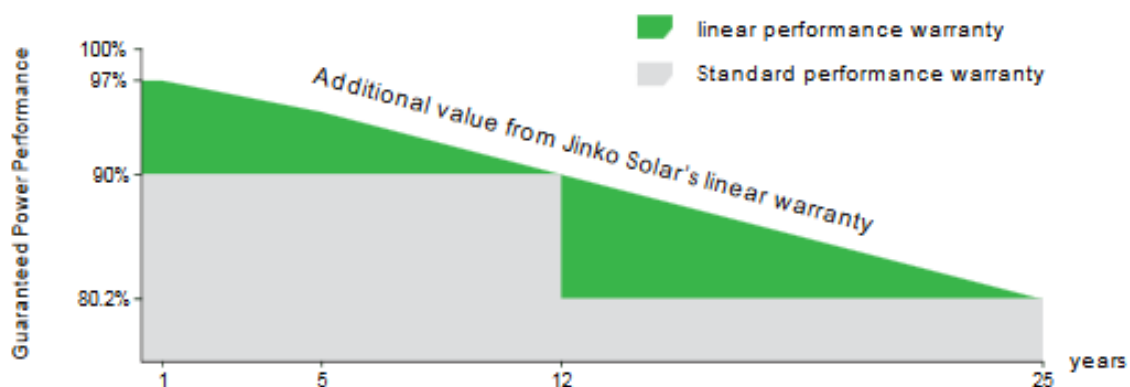


Figura 32 - Gráfico da porcentagem da potência nominal entregue pelo módulo com o passar de 25 anos.

Fonte: (JINKOSOLAR; 2019)

Com base nos dados do fabricante, foi possível verificar que o painel reduz linearmente a sua potência nominal de 97% para 80,2% em 25 anos de operação. Assim, usando novamente a função *polyfit* do MATLAB, pôde-se obter uma equação

da porcentagem da potência de operação (P_{op}) em função do tempo de uso do painel em anos (t). O gráfico da função é mostrado na Figura 33 e o resultado é mostrado na Eq. (49),

$$\%P_{op} = (-0,7016 t + 97,9538) / 100 . \quad (49)$$

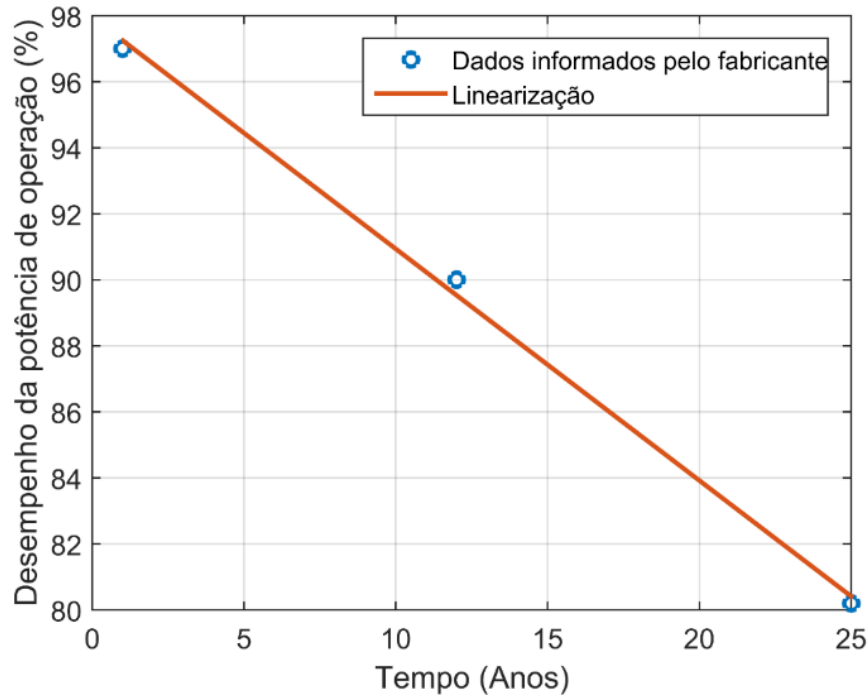


Figura 33 - Gráfico do desempenho da potência de operação com o passar dos anos.

Fonte: (Acervo do autor; 2019)

Então, multiplicando a Eq. (48) pela Eq. (49) foi possível obter uma expressão para a potência efetiva de operação ($P_{eff,op}$) entregue pelo módulo em função da temperatura de operação e do tempo de uso. A expressão é apresentada na Eq. (50),

$$P_{op}(T_{op}) * \%P_{op}(t) = P_{eff,op}(T_{op}, t)$$

$$P_{eff,op}(T_{op}, t) = (-1,4432T_{op} + 426,1148) * (-0,7016t + 97,9538) / 100$$

$$P_{\text{eff,op}}(T_{\text{op}}, t) = \frac{(1,0125T_{\text{op}}t - 141,3669T_{\text{op}} - 298,9621t + 41739,5639)}{100}. \quad (50)$$

E assim, a partir da Eq. (50) levantou-se um gráfico de superfície de $P_{\text{eff,op}}(T_{\text{op}}, t)$. O resultando é mostrado na Figura 34, e pode-se verificar que com o passar do tempo o painel deixa de entregar a potência nominal e assim como para temperaturas de operação mais altas a potência de operação do módulo diminui consideravelmente.

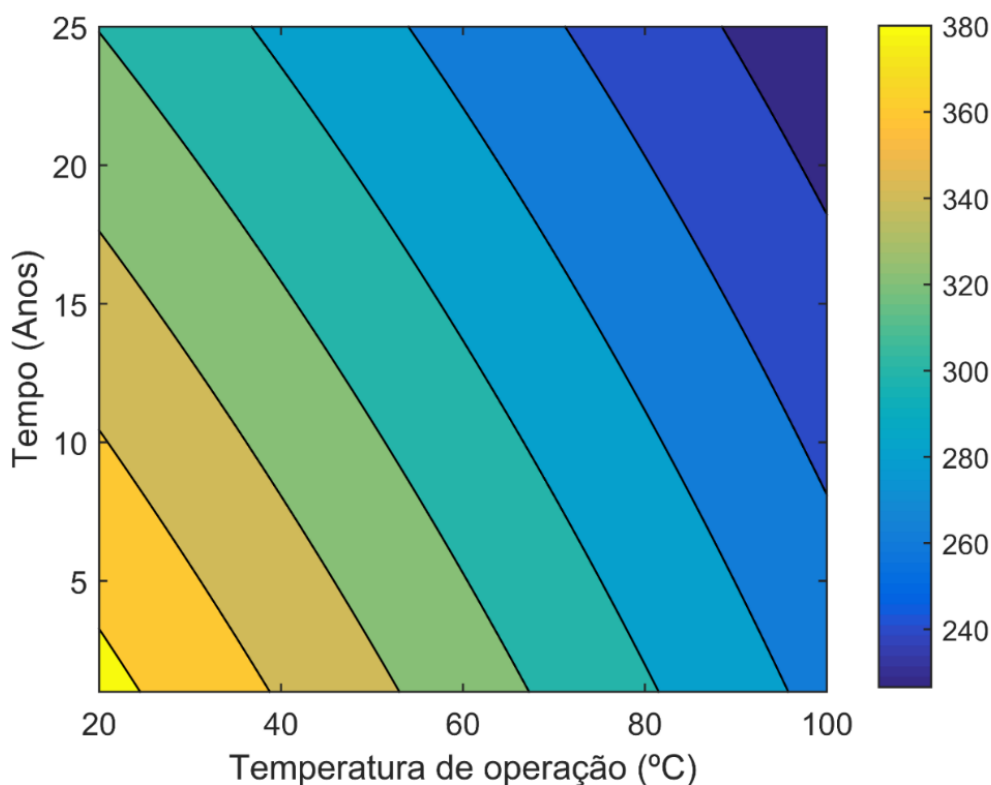


Figura 34 - Superfície da potência efetiva entregue em função da temperatura e do tempo de uso do módulo fotovoltaico JKM390M-72.

Fonte: (Acervo do autor; 2019)

Por fim, a Eq. (50) juntamente com a Figura 34 é uma excelente ferramenta para o projetista de sistemas fotovoltaicos que queira utilizar o painel JKM390M-72 da Jinko Solar para dimensionar corretamente a potência de operação do painel em função da temperatura de operação e do seu tempo de uso.

4.2.2 Exemplo de Aplicação 2: Simulação da quantidade de energia gerada pelos módulos instalados no IFMG *Campus Formiga*

Neste exemplo de aplicação é utilizado a metodologia desenvolvida para estimar a quantidade de energia gerada no sistema fotovoltaico instalado no IFMG Campus Formiga, composto por 110 módulos CS6K-260P da Canadian Solar. Os dados de fabricantes do módulo são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados de fábrica do módulo fotovoltaico CS6K-260P

Fabricante	Canadian Solar
Modelo	CS6K-260P
Tecnologia	Policristalino
Eficiência	15,88%
Potência nominal (P_{max})	260 W
Tensão para máxima potência (V_{mp})	30,4 V
Corrente para máxima potência (I_{mp})	8,56 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	37,5 V
Corrente de curto circuito (I_{SC})	9,12 A
Número de células (N)	60
Coefficiente de temperatura da potência (γ)	-0,41% / °C
Coefficiente de temperatura da tensão (βV_{OC})	-0,31% / °C
Coefficiente de temperatura da corrente (αI_{SC})	0,053% / °C

Fonte: Adaptado de (CANADIANSOLAR, 2019).

As características elétricas da Tabela 6 foram utilizadas para simulação do módulo em questão. Como a fabricante não apresenta as curvas de I-V em função da radiação e da temperatura, para validar a simulação foi considerado os dados de STC e de NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*), cujos valores são disponíveis no

datasheet do módulo. A comparação entre os valores fornecidos pelo fabricante e os simulados são mostrados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Comparação de dados simulados e dados do CS6K-260P em STC.

STC – T_{op} = 25°C e G = 1000 W/m²			
Parâmetros	<i>Datasheet</i>	Simulado	Concordância (%)
P _{mp}	260 W	260,224 W	99,92
V _{mp}	30,4 V	30,41 V	99,97
I _{mp}	8,56 A	8,557 A	99,96
V _{oc}	37,5 V	37,5 V	100
I _{sc}	9,12 A	9,12 A	100

Fonte: (Acervo do autor, 2019)

Tabela 8 - Comparação de dados simulados e dados do CS6K-260P em NOCT.

NOCT – T_{op} = 45°C e G = 800 W/m²			
Parâmetros	<i>Datasheet</i>	Simulado	Concordância (%)
P _{mp}	189 W	190,485 W	99,21
V _{mp}	27,7 V	27,78 V	99,71
I _{mp}	6,80 A	6,857 A	99,16
V _{oc}	34,5 V	34,7 V	99,42
I _{sc}	7,39 A	7,373 A	99,77

Fonte: (Acervo do autor, 2019).

Analisando as Tabelas 7 e 8, pôde-se verificar que a menor concordância entre os dados simulados e experimentais de fábrica foi de 99,16%. Assim foi possível concluir que a simulação pode ser utilizada para modelar o comportamento elétrico do módulo.

Então, da mesma forma que na subseção anterior, um intervalo de temperatura de operação de 20°C a 100°C foi estipulado, e por meio da simulação as potências de operação foram obtidas. Os valores são mostrados na Tabela 9 e o gráfico linear da

potência de operação em função da temperatura de operação é mostrado na Figura 35.

Tabela 9 - Valores da potência simulada obtida para cada valor de temperatura de operação.

Temperatura de operação (T_{op}) (°C)	Potência simulada (P_{op}) (W)
20	265,56
30	254,89
40	244,22
50	233,55
60	222,88
70	212,21
80	201,54
90	190,88
100	180,21

Fonte: (Acervo do autor, 2019).

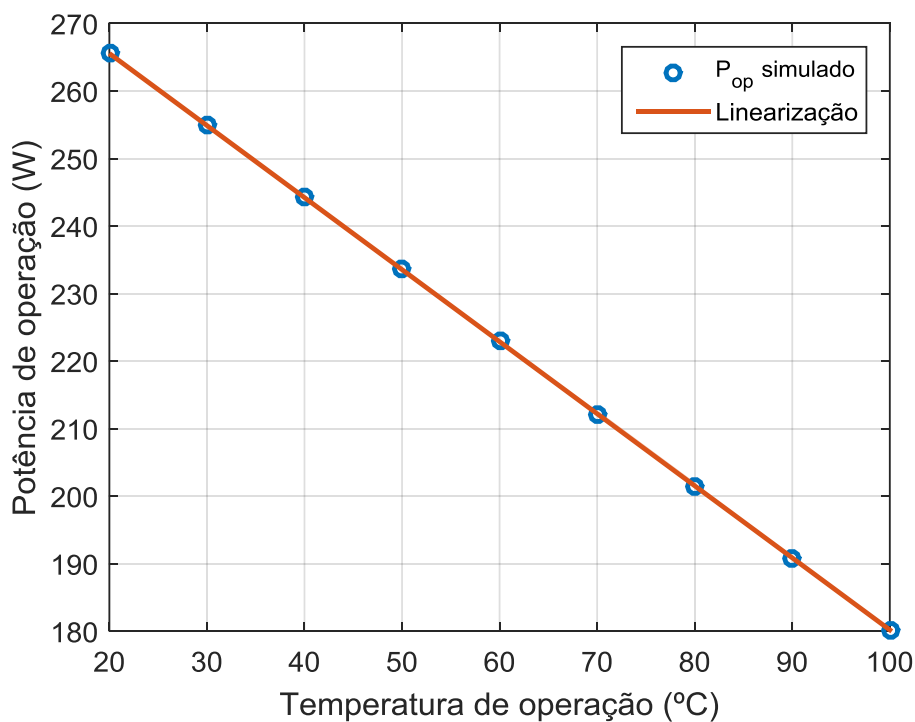


Figura 35 - Potência de operação em função da temperatura de operação obtido por meio de simulação.

Fonte: (Acervo do autor; 2019).

Novamente utilizando a função *polyfit* do MATLAB, uma expressão de $P_{op}(T_{op})$ foi obtida. Essa é mostrada na Eq. (51),

$$P_{op}(T_{op}) = -1.06688 * T_{op} + 286.89522 \quad (51)$$

Os módulos fotovoltaicos no seu 25º ano apresentam uma potência em torno de 80% da nominal (LOMBARDO, 2014). Sendo assim, utilizou-se novamente a Eq. (51) para se obter a porcentagem da potência de operação (P_{op}) em função do tempo de uso do painel em anos (t).

Então, uma nova expressão para a potência efetiva de operação ($P_{eff,op}$) do módulo analisado em função da temperatura de operação e do tempo de uso pôde ser obtida,

$$P_{eff,op}(T_{op}, t) = \frac{(0,74852T_{op}t - 104,50495T_{op} - 201,28568t + 28102,477)}{100} . \quad (52)$$

Sabendo que o sistema fotovoltaico do IFMG *Campus* Formiga possui 110 módulos com um tempo de uso de dois anos, instalado em 2016, e neste trabalho utilizou-se como referência o ano de 2018, calculou-se a partir das Eqs. (47) e (52) uma estimativa da quantidade de energia gerada durante o segundo ano de operação do sistema.

Os dados de hora de sol pleno diário (HSP) e velocidade do vento (WS) foram obtidos em (CRESESB, 2019). As temperaturas de operação média foram calculadas utilizando a Eq. (46) a partir os dados de velocidade do vento e temperatura ambiente média, obtidos de (CLIMATE, 2019).

Os valores dos resultados obtidos são mostrados nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 - Dados usados para o cálculo da energia gerada.

Dias	T_{med} (°C)	WS_{med} (m/s)	HSP	G (W/m²)	T_{op} (°C)
31	23,10	3,80	5,14	1000,00	48,28
28	23,10	3,80	5,60	1000,00	48,28
31	22,00	4,68	5,02	1000,00	45,89
30	20,00	4,68	5,35	1000,00	44,01
31	18,00	4,68	5,09	1000,00	42,12
30	17,00	5,09	5,07	1000,00	40,55
31	17,80	5,09	5,30	1000,00	41,31
31	19,30	5,09	6,05	1000,00	42,72
30	21,10	4,98	5,65	1000,00	44,59
31	22,00	4,98	5,36	1000,00	45,44
30	22,20	4,98	4,79	1000,00	45,63
31	21,60	3,80	5,08	1000,00	46,86

Fonte: (Acervo do autor; 2019)

Tabela 11 - Dados da energia gerada por um módulo CS6K-260P obtidos com a simulação.

Dias	P_{eff} (W)	E_g, dia por painel (kWh)	E_g, mês por painel (kWh)
31	227,27	0,93	28,97
28	227,27	1,02	28,51
31	229,72	0,92	28,60
30	231,67	0,99	29,75
31	233,61	0,95	29,49
30	235,23	0,95	28,62
31	234,45	0,99	30,82
31	232,99	1,13	34,96
30	231,07	1,04	31,33
31	230,20	0,99	30,60
30	230,00	0,88	26,44
31	228,73	0,93	28,82

Fonte: (Acervo do autor, 2019).

Tabela 12 - Resultado do total de energia gerada pelos 110 módulos do IFMG Campus Formiga, segundo a simulação.

Energia gerada por um painel no ano de 2018 (kWh)	356,90
Número de painéis	110
E _g , total, simulada (kWh)	39258,94

Fonte: (Acervo do autor; 2019).

Tabela 13 - Comparação entre os valores obtidos de energia gerada no ano de 2018 com a simulação e o valor medido no inversor.

Energia gerada no ano de 2018	kWh
Medição no inversor IFMG Formiga	37894,85
Simulação	39258,94
Concordância	96,40%

Fonte: (Acervo do autor, 2019).

O valor de energia gerada no sistema fotovoltaico do IFMG – Formiga no ano de 2018 foi disponibilizado pela CICE - Comissão Interna de Eficiência Energética do *campus*. Dessa forma, foi possível comparar o resultado experimental com o simulado pela metodologia desenvolvida neste trabalho. O resultado é mostrado na Tabela 13, e é possível verificar que a concordância entre os valores foi de 96,40%. Vale ressaltar que a abordagem implementada neste trabalho não levou em conta a existência de nuvens e/ou sujeira excessiva nos módulos. Como o valor obtido pela simulação foi superdimensionado, tem-se uma margem para desenvolver outros trabalhos considerando os efeitos de perdas na simulação, e assim tornar a ferramenta mais realista.

5 CONCLUSÕES

As células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores capazes de converter energia do Sol em um fluxo de elétrons, corrente elétrica. Sendo assim, é possível a caracterização do comportamento de uma célula fotovoltaica a partir de um circuito elétrico equivalente.

Neste trabalho foi desenvolvida a modelagem analítica do circuito elétrico equivalente do módulo fotovoltaico. O formalismo utilizado para simular o comportamento elétrico do módulo foi o modelo de cinco parâmetros, cuja equação principal de $I = f(V)$ foi implementada utilizando a função W de Lambert. Apresentou-se também as expressões de quatro parâmetros, I_{pv} , I_0 , R_s e R_{sh} , e o quinto parâmetro, a , foi considerado igual a 1,3 em todas simulações. Ressaltando que a implementação do modelo só foi possível devido os valores de parâmetros elétricos disponibilizados pelos fabricantes de módulos. Posteriormente, foi mostrado as equações dos parâmetros elétricos em função da temperatura de operação e da irradiação solar incidente no módulo.

Validou-se a metodologia desenvolvida comparando as curvas experimentais com as simuladas de I-V em função da temperatura e da irradiação solar do módulo CS6K-295MS. Com a comparação entre as curvas foi possível verificar uma concordância mínima de 94,32% para uma temperatura de operação de 5°C, isto é, a metodologia apresentada funciona melhor para temperaturas de operação acima de 25°C.

Posteriormente, aplicou-se a metodologia desenvolvida em dois exemplos de aplicação. No primeiro exemplo foi implementado uma expressão da potência de operação efetiva em função da temperatura de operação e do seu tempo de uso ao longo de 25 anos do módulo JKM390M-72. Com essa expressão um projetista pode utilizá-la para dimensionar sistemas fotovoltaicos sem desenvolver toda a metodologia apresentada.

No segundo exemplo, utilizou-se a metodologia para simular a quantidade de energia gerada pelo sistema fotovoltaico, composto por 110 módulos CS6K-260P, instalado no IFMG campus Formiga no ano de 2018. Aplicou-se a metodologia para obter a expressão da potência efetiva de operação em função da temperatura e do tempo de uso dos módulos. Dessa forma, foi possível obter uma concordância de 96,4% entre a quantidade de energia gerada pelo sistema real e simulado.

Ressaltando que a abordagem implementada neste trabalho não levou em consideração a existência de nuvens e/ou sujeira nos módulos. Como o valor simulado foi superdimensionado, tem-se uma margem para desenvolver outras abordagens para considerar as perdas, e assim tornar a ferramenta mais realista.

5.1 Trabalhos Futuros

Com o desenvolvimento do presente trabalho pode-se identificar as seguintes possibilidades de trabalhos futuros:

- Análise da variação do fator de idealidade a para diferentes valores de temperatura e radiação;
- A inclusão de mais fatores externos na modelagem do módulo fotovoltaico, tais como umidade, sombreamento e tempo de inatividade;
- A implementação de métodos numéricos em conjunto com o modelo analítico afim de melhorar a precisão e aumentar a versatilidade na gama de aplicações;
- Incluir um diodo a mais no circuito equivalente das células solares a fim de aumentar a precisão e a versatilidade do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2004.

CANADIAN SOLAR. **SUPERPOWER CS6K-290/295/300/305M**. Disponível em: <https://recursos.minhacasasolar.com.br/MediaCenter/Canadian_Solar-Datasheet-SuperPower_CS6K-MS_en.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2019.

CANADIAN SOLAR. **CS6K-260/265/270/275P**. Disponível em: <http://www.nanosun.cz/media/technicke-listy/Canadian_Solar-Datasheet-CS6K-P-v5.51en.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2019.

CANTOR, Guillermo Andrés Rodríguez. **Influência dos fatores climáticos no desempenho de módulos fotovoltaicos em regiões de clima tropical**. 2017. 177 p. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis), Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2017.

CASTRO, Rui M. G. **Introdução à Energia Fotovoltaica**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2002.

CHENNI, R. et al. A detailed modeling method for photovoltaic cells. **Energy**, v. 32, n. 9, p.1724-1730, set. 2007.

CLIMATE. **Dados Climáticos Para Cidades Mundiais**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/>>. Acesso em: 2 de maio de 2019.

Corless, R. M., Gonnet, G. H., Hare, D. E. G. **On the Lambert W function**, **Adv Comput Math** (1996) 5: 329.

CRESESB. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2019.

CRESESB. **Potencial Solar - SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

CRESESB. **Tutorial de energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_solar>. Acesso em: 30 abr. 2019.

CUBAS, J.; PINDADO, S.; MANUEL, C. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function. **Energies**, p. 4098-4115. 26 jun. 2014.

CUBAS, J.; PINDADO, S.; VICTORIA, M. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior. **Journal of Power Sources**. Madrid, p. 467-474. 01 fev. 2014

DEMÉTRIO, Gabriel. **Diodos: Materiais Semicondutores**. 2013. Disponível em: <<http://eletronicasemlimites.blogspot.com>>. Acesso em: 28 abr. 2019.

ECYCLE. **O que é energia solar, vantagens e desvantagens**. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/2890-energia-solar>>. Acesso em: 28 abr. de 2019.

GHENSEV, Almir. **Materiais e Processos De Fabricação De Células Fotovoltaicas**. 2006. 154 f. Monografia (Especialização) - Curso de Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

JINKO SOLAR. **Cheetah 72M 370-390Watt**. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.eu/en/download/datasheets.html?file=files/jinko/module/datasheets/en/Cheetah%20PERC%20HC%2072M%20380-400W-V.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2019.

LOMBARDO, Tom. **What Is the Lifespan of a Solar Panel?** 2014. Disponível em: <<https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/7475/What-Is-the-Lifespan-of-a-Solar-Panel.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

MACHADO, Karla Suzane Van-dall; CORREA, Nicoli. **Análise do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba**. 2015. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MEIRELLES, Bernardo Radefeld. **Fabricação de Células Solares**. Campinas: Unicamp, 2002.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim mensal de monitoramento do setor elétrico – março de 2019**. Brasília: MME, 2019.

MIRANDA, Arthur Biagio Canedo Miranda. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. 2014. 98 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

NIEDZIALKOSKI, Rosana Krauss. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. 2013. 57 p. Dissertação (Pós-Graduação em Energia da Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2013.

PORTAL SOLAR. **Energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br>>. Acesso em: 15 de abril de 2019.

PORTAL SOLAR. **Passo a passo da fabricação do painel solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em 15 abr. 2019.

PORTAL SOLAR. **Tipos de Painel Solar Fotovoltaico**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 15 de abril de 2019.

PINTO, Cláudia Sofia Benvindo Soares. **Validação Experimental do Modelo Cinco Parâmetros e Um Díodo de Painéis Fotovoltaicos**. 2016. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

REIS, L. R. D. Reis, J. R. Camacho, D. F. Novacki, **The Newton Raphson method in the extraction of parameters of PV modules**, In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality, <https://doi.org/10.24084/repqj15.41>, RE&PQJ, vol. 1, no. 15, pp. 634 - 639, (2017).

SILVA E CALDAS, H. H. **Geração Fotovoltaica Distribuída: Estudo de Caso para Consumidores Residenciais de Salvador –Ba**. 2016. 58 f. Artigo (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia-IFBA. Bahia, 2016.

SILVA, Jarlan Soares da. **Análise da influência da temperatura na geração de energia utilizando painéis fotovoltaicos monocristalino e policristalinos**. 2016.64 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2016.

SILVA, Rodrigo Guedes da. **Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico Para Atender Uma Demanda de Iluminação**. 2014. 104 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

OLIVEIRA, Luis Fernando Lamas de. **Estuda da Banda de Gap em Componentes Eletrônicos Semicondutores**. Campinas: Unicamp, 2019.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica - conceitos e aplicações. 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2013.

VIVACQUA, Daniel Nascimento. **Considerações Sobre a Fabricação Nacional de Módulos Fotovoltaicos**. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

WEB Plot Digitizer. Disponível em: <<https://apps.automeris.io/wpd/>>. Acesso em: 06 maio 2019.