



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL E DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**WYARA MARIA CARLOS SOUZA PONTES**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DE  
RESISTÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**ACARAPE  
2018**

**WYARA MARIA CARLOS SOUZA PONTES**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DE  
RESISTÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira-UNILAB como requisito parcial para obtenção do título de graduada em Engenharia de Energias.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro.

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Pontes, Wyara Maria Carlos Souza.

P811a

Avaliação de métodos de estimação dos parâmetros de resistência de módulos fotovoltaicos / Wyara Maria Carlos Souza Pontes. - Acarape, 2018.  
97f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

Orientador: Profa. Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro.

1. Energia solar. 2. Sistema de energia fotovoltaica. 3. Resistencia elétrica - Parâmetros. 4. Modelagem. I. Título

CE/UF/Biblioteca Setorial dos Palmares

CDD 621.473

---



Ministério da Educação  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB  
Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável

### ASSINATURA DOS MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Lígia M. Carvalho Sousa Cordeiro

Profa. Dra. Lígia Maria Carvalho Sousa Cordeiro (IEDS/UNILAB)  
Presidenta da Banca Examinadora

Gustavo Alves de Lima Henn

Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn (IEDS/UNILAB)  
Membro da Banca Examinadora

Hermínio Miguel de O. Silva

Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Silva (IEDS/UNILAB)  
Membro da Banca Examinadora

Acarape, 29 de maio de 2018

A Deus.

A minha mãe e meu marido, Vera e Werllen.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por tornar possível esta conquista.

A prof<sup>ª</sup>. Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro, pela ótima orientação e sugestões para o trabalho.

Aos professores participantes da Banca Examinadora pelas contribuições para o aprimoramento do trabalho.

A coordenação do IEDS na pessoa do prof. Antonio Alisson Pessoa Guimarães e da prof<sup>ª</sup>. Silvia Helena Lima Dos Santos pelo apoio e orientação ao longo do curso.

Aos meus colegas de curso em especial à Lívia Wana, André, Cláudio, Rayane, Carla Patrícia, Maise, Witalo, Gilmar, Isabela, Erick, Werley, pelo apoio no decorrer do curso.

A minha mãe, Vera, pelo amor, paciência e carinho a mim demonstrados e por ser um grande exemplo de perseverança e dedicação.

Ao meu marido, Werllen, pela compreensão, companheirismo, carinho e por sempre estar me apoiando em todos os momentos.

## RESUMO

O interesse pela diminuição da dependência de fontes fósseis para geração de energia e pela diversificação da matriz elétrica, associadas à crescente demanda resultante do consumo de novas tecnologias, tem impulsionado a utilização de fontes renováveis para geração de eletricidade. A energia elétrica gerada por conversão solar fotovoltaica tem representado uma alternativa conveniente à estes interesses. Entretanto, o desempenho de um gerador fotovoltaico é bastante influenciado pelas condições ambientais de temperatura e radiação, e pelas características dos materiais que compõem os módulos fotovoltaicos. Para analisar o comportamento dos módulos mediante estas influências, a literatura recorre ao uso de modelos matemáticos que requerem o conhecimento de parâmetros de resistência, as quais representam principalmente perdas provenientes dos materiais. O presente trabalho de conclusão de curso propõe estudar os métodos: simplificado; derivada; IEC 60891; Solver do Excel e Iterativo, para estimar estas resistências considerando dois modelos matemáticos de módulo fotovoltaico: o de uma resistência série e o de uma resistência série e paralelo. O objetivo de tal estudo é analisar qual o conjunto modelo/método que melhor descreve o comportamento elétrico de um módulo fotovoltaico de acordo com as especificações e dados experimentais disponibilizados pelo fabricante. Também utilizou-se o modelo ideal para complementar a análise. Para o estudo foi selecionado o módulo MaxPower CS6U da marca CanadianSolar, o qual será utilizado em uma usina de minigeração a ser instalada no Campus das Auroras da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

**Palavras-chave:** Energia solar Fotovoltaica, Módulos fotovoltaicos. Parametrização. Modelagem.

## **ABSTRACT**

The interest in reducing the dependence of fossil sources for power generation and the diversification of the electric matrix, coupled with the increasing demand resulting from the consumption of new technologies, has been driving the use of renewable sources for electricity generation. The electric energy generated by solar photovoltaic conversion has represented a convenient alternative to these interests. However, the performance of a photovoltaic generator is strongly influenced by the environmental conditions of temperature and radiation, and by the characteristics of the materials that make up the photovoltaic modules. To analyze the behavior of the modules through these influences, the literature uses the use of mathematical models that require the knowledge of resistance parameters, which represent mainly losses from the materials. The present work of conclusion of course proposes to study the methods: simplified; derivative; IEC 60891; Solver of Excel and Iterative, to estimate these resistances considering two mathematical models of photovoltaic module: that of a series resistance and that of a series and parallel resistance. The purpose of such a study is to analyze which model / method set best describes the electrical behavior of a photovoltaic module according to the specifications and experimental data provided by the manufacturer. We also used the ideal model to complement the analysis. For the study was selected the MaxPower CS6U module of the CanadianSolar brand, which will be used in a minigeration plant to be installed at the Auroras Campus of the University of International Integration of Afro-Brazilian Lusophony.

**Key words:** Photovoltaic solar energy, Photovoltaic modules. Parameterization. Modeling.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 - Matriz elétrica brasileira em maio de 20171
- Figura 1.2 - Média anual do total diário de irradiação no plano inclinado da latitude no Brasil2
- Figura 1.3 - Projeções da potência instalada (MW) de geração solar distribuída no Brasil 2017-20243
- Figura 1.4 - Central Solar de Nova Olinda.4
- Figura 1.5 - Célula de silício monocristalino.4
- Figura 2.1 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S.8
- Figura 2.2 - Fluxo de potência global ( $W/m^2$ ).9
- Figura 2.3 - Efeito fotovoltaico.10
- Figura 2.4 - Painel solar Monocristalino.11
- Figura 2.5 - Painel Solar Policristalino.11
- Figura 2.6 - Célula de Silício Amorfo (a-Si).12
- Figura 2.7- Módulo de TeCd, à esquerda. Módulo de CIS, à direita.13
- Figura 2.8. Estrutura de módulos e painéis fotovoltaicos.14
- Figura 2.9 - Associação em série e em paralelo de módulos fotovoltaicos.15
- Figura 2.10 - Curvas I-V e P-V de módulo fotovoltaico.16
- Figura 2.11 - Efeito de variação da irradiância solar.16
- Figura 2.12- Curva P-V para diferentes níveis de radiação17
- Figura 2.13 - Efeito de variação da temperatura.18
- Figura 2.14- Curva P-V para diferentes temperaturas.19
- Figura 2.15-Circuito equivalente do modelo ideal.19
- Figura 2.16 - Circuito equivalente do modelo de um diodo e  $R_s$ .20
- Figura 2.17 - Circuito equivalente do modelo de um diodo e duas resistências22
- Figura 2.18-Circuito equivalente do modelo de dois diodos e duas resistências.23
- Figura 2.19-Efeito da resistência série ( $R_s$ ) na curva I-V de uma célula fotovoltaica nas condições STC e considerando  $R_p \rightarrow \infty$ .23
- Figura 2.20- Efeito da resistência paralelo ( $R_p$ ) na curva I-V de uma célula fotovoltaica nas condições STC e considerando  $R_s$  nula.24
- Figura 3.1- Derivada da tensão em relação à corrente na condição  $V_{oc}$ 28
- Figura 3.2- Derivada da tensão em relação à corrente na condição  $V_{oc}$ .28
- Figura 3.3. Configurações do Solver.31
- Figura 3.4 Planilha com exemplo de parametrização utilizando Solver Excel.31
- Figura 3.5 – Extração dos parâmetros  $R_s$  e  $R_p$  pelo método da derivada através da curva experimental.32

Figura 3.6-Fluxograma do processo iterativo.34

Figura 3.7-Influência do fator de idealidade na curva característica I-V.36

Figura 3.8-Fluxograma Método de Newton-Raphson.38

Figura 3.9 – Fluxograma da metodologia simplificada utilizada no presente trabalho41

Figura 4.1 – (a) Imagem digitalizada das curvas considerando variação de temperatura. ( b) Curvas geradas em MATLAB considerando variação de temperatura.42

Figura 4.2 – (a) Curvas geradas em MATLAB considerando variação de temperatura. (b) Curvas geradas em MATLAB<sup>TM</sup> para radiações distintas.43

Figura 4.3- Curva P-V do módulo MAXPOWER (CS6U) da Canadian Solar para diferentes temperaturas.43

Figura 4.4 - Curva P-V do módulo MAXPOWER (CS6U) da Canadian Solar para diferentes radiações43

Figura 4.5- Curvas I-V ideal e fornecida pelo fabricante, considerando temperaturas distintas44

Figura 4.6- Curvas I-V ideal e fornecida pelo fabricante, considerando radiações distintas .45

Figur 4.7- Erro % da corrente gerada pelo modelo em relação corrente do fabricante para as condições STC.45

Figur 4.8- Erro % do modelo ideal no ponto de inflexão da curva para diferentes temperaturas e radiações.46

Figura 4.9 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação pelo método simplificado47

4.10. Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação simplificado.48

Figura 4.11 Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação pelo método da derivada.49

Figura 4.12. Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação derivada.50

Figura 4.13 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação pelo método da IEC(.60891).51

Figura 4.14 - Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação IEC60891.52

Figura 4.15 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação das resistências utilizando o Solver Excel.53

Figura 4.16 - Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação Solver Excel. .... 544

Figura 4.17 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação das resistências utilizando o método da derivada.55

Figura 4.18 - Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação Solver Excel.56

Figura 4.19 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação das resistências utilizando o método iterativo.56

Figura 4.20 - Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação Solver Excel.57

Figura 4.21 - Curvas I-V dos métodos do modelo de uma resistência e a curva característica do fabricante para as condições STC.58

Figura 4.22 - Curvas I-V dos métodos do modelo de duas resistências e a curva característica do fabricante para as condições STC.59

Figura 4.23- Erros dos métodos de estimação de resistência para diferentes temperaturas e radiação a  $1000 \text{ W/m}^2$ .60

Figura 4.24- Erros dos métodos de estimação de resistência para diferentes radiações e temperatura a  $25^\circ\text{C}$ .60

Figura 4.25- Erros dos métodos de estimação de resistência para diferentes temperaturas e radiação a  $1000 \text{ W/m}^2$ .60

Figura 4.26- Erros dos métodos de estimação de resistência para diferentes radiações e temperatura a  $25^\circ\text{C}$ .61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Eficiência e custo de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas.	13
Tabela 3.1- Características STC e NMOT do módulo CS6U-Canadian Solar.....	35
Tabela 3.2- Energia de banda de valência e fator de idealidade para diferentes tipos de células solares.	36
Tabela 3.3- Simbologia dos métodos nas curvas de comparação.	39
Tabela 4.1-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para as condições STC.	62
Tabela 4.2-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 5°C e radiação 1000 W/m <sup>2</sup> .	62
Tabela 4.3-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 45°C e radiação 1000 W/m <sup>2</sup> .	63
Tabela 4.4 - Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 65°C e radiação 1000 W/m <sup>2</sup> .	64
Tabela 4.5. Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 25°C e radiação 800 W/m <sup>2</sup> .....	64
Tabela 4.6. Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 25°C e radiação 600 W/m <sup>2</sup> .....	65
Tabela 4.7. Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 25°C e radiação 400 W/m <sup>2</sup> .....	64

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
WMO	World Meteorological Organization

## LISTA DE SÍMBOLOS

a-Si	Silício Amorfo
Ev	Eletrón-volt
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
TeCd	Telureto de Cádmio
AM	Massa de ar
FF	Fator de Forma
Wp	Watt-pico
I	Corrente gerada
V	Tensão
$\delta$	Declinação solar
Isc	Corrente de curto-circuito
Voc	Tensão de circuito aberto
Pmáx	Potência máxima
Imp	Corrente no ponto de máxima potência
Vmp	Tensão do ponto de máxima potência
Eg	Energia de Gap
n	Fator de idealidade do diodo
Id	Corrente que flui pelo diodo
Ki	Tensão térmica
q	Coeficiente de temperatura (Isc)
T	Contante de Boltzman
Rs	Temperatura
Rp	Resistência em série
G	Resistência em paralelo
	Radiação incidente de referência
	Radiação incidente

$K_0$

STC

Ish

Ipv

NMOT

$I_0$

$I_d$

# SUMÁRIO

1

## 1.1 INTRODUÇÃO1

7

## 2.1 Revisão Bibliográfica7

### 2.1.1 Energia Solar7

### 2.1.2 Efeito Fotovoltaico9

### 2.1.3 Módulos Fotovoltaicos11

### 2.1.4 Características dos módulos fotovoltaicos.14

## 2.2 Efeito da Temperatura e Irradiação nas curvas I-V e P-V16

### 2.2.1 Efeito da Radiação16

### 2.2.2 Efeito da Temperatura18

## 2.3 Modelos elétricos e matemáticos das células fotovoltaicas19

### 2.3.1 Modelo Ideal19

### 2.3.2 Modelo de um diodo e uma resistências $R_s$ 20

### 2.3.3 Modelo de um diodo e duas resistências21

### 2.3.4 Modelo de dois diodos e duas resistências.23

## 2.4 Influência de $R_s$ E $R_p$ na curva I-V23

26

## 3.1 Metodologia26

### 3.1.1 Métodos De Estimação das resistências26

#### 3.1.1.1 Métodos para o modelo de uma resistência26

#### 3.1.1.2 Método Simplificado26

#### 3.1.1.3 Método da derivada27

#### 3.1.1.4 Método IEC 6089128

### 3.1.2 Métodos para o modelo de duas resistências30

#### 3.1.2.1 Solver Excel30

#### 3.1.2.2 Método da derivada32



3.1.2.3	Método Iterativo	33
3.2	Características do módulo fotovoltaico	35
3.3	Considerações	35
3.4	Modelagem dos módulos	37
3.4.1	Implementação em MATLAB™	37
3.5	Análise dos resultados	40

42

4.1	Resultado e Discussão	42
4.1.1	Obtenção dos dados das curvas do datasheet	42
4.1.2	Análise do Modelo Ideal	44
4.1.3	Estimação de Resistências	47
4.1.3.1	Modelo de uma resistência	47
4.1.3.2	Método Simplificado	47
4.1.3.3	Método da Derivada	49
4.1.3.4	Método IEC 60891	51
4.1.4	Modelo de duas resistências	53
4.1.4.1	Solver Excel	53
4.1.4.2	Método da Derivada	55
4.1.4.3	Método Iterativo	56
4.1.5	Comparação entre os métodos e modelos	58

67

5.1	Conclusões	67
-----	------------	----

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69



## CAPÍTULO I

### 1.1 INTRODUÇÃO

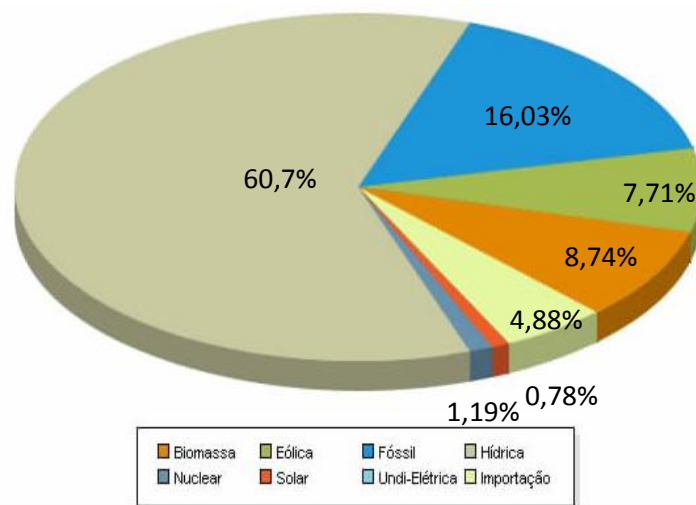
Nos últimos anos, a preocupação com a preservação do meio ambiente e a busca pela diversificação da matriz elétrica, aliada ao crescimento da demanda por energia e desenvolvimento do setor industrial, tem impulsionado a geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, entre elas a solar fotovoltaica.

Embora a geração de energia por fontes renováveis inicialmente apresente custo mais elevado, à medida em que se expande torna-se mais competitiva. Isso resulta de fatores como a redução dos custos devido ao ganho de escala e avanços tecnológicos. (NASCIMENTO, 2017)

As hidrelétricas têm uma considerável participação na matriz elétrica brasileira (Figura 1.1), proporcionando ao sistema elétrico do país características únicas quanto aos aspectos ambientais e à emissão de gases poluentes. Entretanto, a geração por fonte hidráulica, assim como outras fontes renováveis, é susceptível aos aspectos climáticos de forma que o recurso hídrico armazenado nos reservatórios, durante o período de estiagem, pode atingir níveis críticos sob o ponto de vista da segurança energética.

Desta forma, a utilização do recurso solar para geração de energia elétrica no Brasil representa uma excelente alternativa para complementar a geração por fontes já consolidadas como as hidrelétricas, uma vez que nos períodos de seca, onde a disponibilidade de recursos hídricos sofre redução, os níveis de irradiação solar são mais elevados, favorecendo a produção por fonte solar (INPE, 2017).

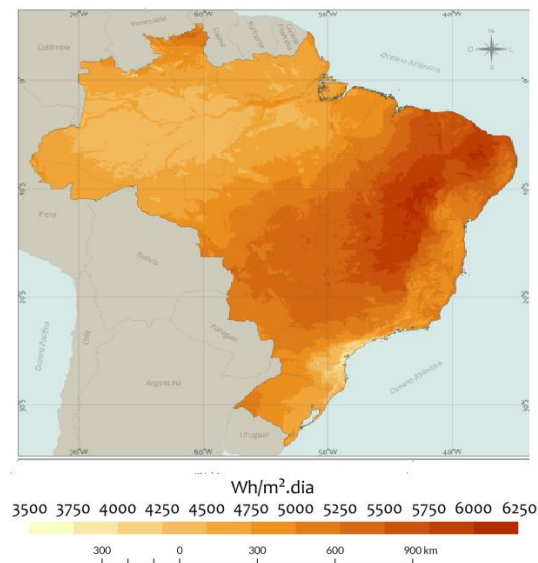
Figura 1.1 - Matriz elétrica brasileira.



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018.

Entretanto, embora o território brasileiro apresente um considerável potencial solar em termos de irradiação incidente, como mostrado na Figura 1.2, o uso dessa fonte no Brasil para geração de energia elétrica não tem a mesma relevância que possui em outros países como Alemanha, Espanha e França, onde as tecnologias de aproveitamento de energia solar são amplamente disseminadas (NASCIMENTO, 2017).

Figura 1.2 - Média anual do total diário de irradiação no plano inclinado da latitude no Brasil



Fonte: Adaptado de INPE, 2017.

Com o Acordo de Paris, na COP 21 em 2015, a atenção para a geração por fontes renováveis tornou-se ainda maior. O Brasil se comprometeu a reduzir a emissão de gases de efeito estufa em 37% no ano de 2025 e 43% em 2030, em relação aos níveis de 2005, o que consiste em um grande desafio embora cerca de 75% da matriz elétrica brasileira seja baseada em fontes renováveis. (MMA, 2015)

Para impulsionar o investimento em geração solar, o governo brasileiro tem recorrido à incentivos como a isenção de IPI (Imposto sobre produto industrializado) sobre a energia, Chamadas Públicas da ANEEL, isenção de ICMS para as operações com equipamentos e componentes relacionados com o aproveitamento das energias solar e eólica, isenção de ICMS, PIS e Cofins na geração distribuída, ou seja, sobre a energia que o consumidor gera, dentre outros incentivos (MME, 2017).

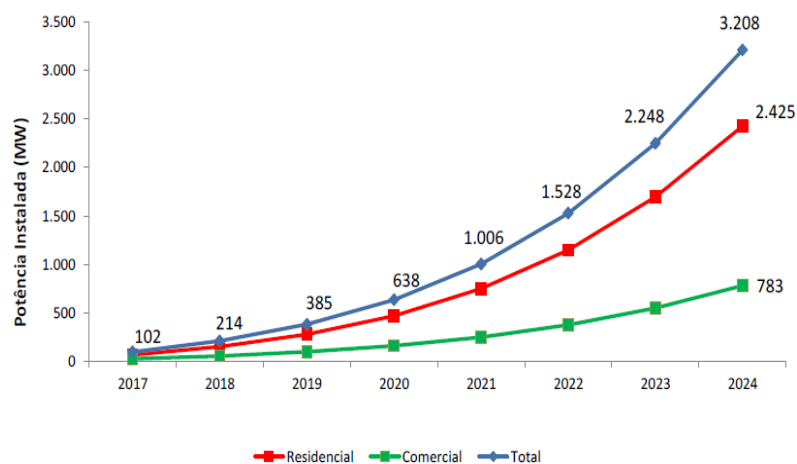
Outra estratégia desenvolvida pelo Ministério de Minas e Energia foi a criação do ProGD, Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica, o qual foi

lançado em 2015 com o objetivo de ampliar e aprofundar as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis de energia, especialmente a solar fotovoltaica (MME, 2015). As resoluções normativas 482/2012 e 687/2015 determinam as condições gerais para a conexão à rede da microgeração (potência instalada menor ou igual a 75kWp) e minigeração (potência instalada entre 75kWp e 5MWp) distribuída no Brasil e criou o Sistema de Compensação de Energia. O sistema de compensação possibilita que sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis, entre eles o fotovoltaico, com até 5MW de potência instalados em residências e empresas, se conectem a rede elétrica de forma simplificada, atendendo o consumo local e injetando o excedente na rede, gerando créditos de energia que podem ser consumidos em até 6 meses (ANEEL, 2015)

O Banco do Nordeste, em consonância com o ProGD, criou, em 2016, o FNE Sol, caracterizado por ser uma linha de financiamento à micro e minigeração distribuída de energia elétrica destinada às empresas de todos os portes e setores, produtores e empresas rurais, cooperativas e associações. O financiamento cobre todos os componentes dos sistemas de energia elétrica fotovoltaica, eólica, de biomassa ou pequenas centrais hidroelétricas (PCH), bem como sua instalação (Banco do Nordeste, 2016).

A Figura 1.3 mostra as projeções de crescimento na geração distribuída de energia solar fotovoltaica no Brasil em um horizonte de 8 anos. Atualmente o Brasil conta com mais de 20 mil instalações (ANEEL, 2018). Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia, estima-se que essa capacidade instalada alcance cerca de 13 GW em 2026, entre geração centralizada e distribuída, chegando a representar 5,7% da matriz elétrica brasileira (MME, 2017).

Figura 1.3 - Projeções da potência instalada (MW) de geração solar distribuída no Brasil 2017-2024



Fonte: ANEEL, 2017.

A primeira usina a operar comercialmente no estado do Ceará foi a Usina Solar de Tauá, com capacidade de 1MWp. Entre os maiores empreendimentos brasileiros de geração solar estão o Parque Solar Lapa (Bom Jesus da Lapa-BA) com capacidade de geração de 80 MW e a Central Solar de Nova Olinda (Figura 1.4), construída em 2017 no estado do Piauí, a qual atualmente é a maior usina solar fotovoltaica da América Latina, com capacidade instalada de 292 MW.

Figura 1.4 - Central Solar de Nova Olinda.

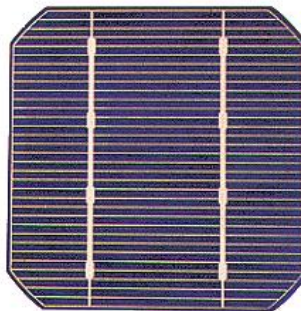


Fonte: WWW.portal-energia.com

A conversão solar fotovoltaica ocorre devido à um fenômeno elétrico chamado efeito fotovoltaico. Este efeito ocorre devido a excitação dos elétrons de materiais semicondutores quando estes absorvem luz solar, resultando em uma diferença de potencial na estrutura desses materiais. Os dispositivos responsáveis pela conversão de energia solar em elétrica são as células fotovoltaicas.

A maioria das células utilizadas na conversão tem como material principal o silício, como mostra a Figura 1.5. Entretanto existem outras tecnologias como Arseneto de Gálio (GaAs), Telureto de Cádmiio(CdTe) e Disselenato de Cobre e Índio(CIS) (LUNA, 2013).

Figura 1.5 - Célula de silício monocristalino.



Fonte: www.cresesb.cepel.br

As células fotovoltaicas ainda possuem uma eficiência relativamente baixa. Os modelos comerciais atuais só convertem eletricidade com uma eficiência máxima de cerca de 25%. No Brasil, a célula com maior eficiência foi desenvolvida em 2017 e conta com um aproveitamento de 17,3%. Nesse contexto, muitos países como China, Estados Unidos, Itália e Japão investem em pesquisas que visam aumentar a eficiência de conversão da luz solar em eletricidade (<http://www.pucrs.br>, 2017).

Embora ainda possuam uma baixa eficiência quando comparadas com outras fontes renováveis e tenha custo de aquisição elevado, a conversão solar fotovoltaica apresenta muitas vantagens em relação a outras fontes, como a eólica, por não possuírem grandes impactos sonoros, visuais e ambientais. Além disso, outra vantagem, é que os sistemas fotovoltaicos não requerem grandes manutenções, nem grandes construções.

A instalação de painéis fotovoltaicos requer alguns conhecimentos prévios que indicarão ou não a viabilidade de aplicação. É necessária portanto, a realização de estudo e simulação em diversas situações que considerem o comportamento do sol na região, uma vez que a conversão é função de aspectos climatológicos locais e que variações muito bruscas de algum parâmetro (tal como a radiação) podem resultar em redução da eficiência dos painéis.

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo avaliar diferentes modelos matemáticos equivalentes para um módulo fotovoltaico específico, analisando diferentes técnicas disponíveis na literatura para a estimação de perdas as quais são representadas por resistências pertinentes à alguns dos modelos matemáticos utilizados. Os modelos matemáticos a serem avaliados são:

- o modelo ideal; onde todas as perdas nos contatos elétricos ou inerentes à natureza do material dos módulos são desconsideradas;
- o modelo de um diodo e quatro parâmetros; o qual considera perdas representadas por uma resistência em série;
- o modelo de um diodo e cinco parâmetros; o qual considera além de uma resistência série, uma resistência em paralelo.

Inicialmente, as resistências dos modelos de um diodo de uma resistência e de duas resistências serão estimadas considerando três diferentes técnicas de estimação destes parâmetros. As técnicas serão aplicadas baseando-se nas informações disponibilizadas pelo fabricante do módulo. O módulo selecionado para o estudo é o MaxPower CS6U da marca CanadianSolar, o qual será utilizado em uma usina de minigeração a ser instalada no Campus

das Auroras da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira. De posse destes valores, os modelos serão implementados utilizando o software Matlab, plotando-se as curvas características I-V (corrente x tensão).

Em seguida, uma avaliação qualitativa e quantitativa das técnicas abordadas em relação às curvas e valores disponibilizados pelo fabricante será realizada de forma a avaliar e determinar que conjunto técnica/modelo melhor representará o comportamento do referido módulo segundo as informações do *datasheet*, ou seja, considerando a corrente e tensão de saída mediante diferentes níveis de radiação e temperatura.

Assim, este trabalho possui os seguintes objetivos:

- a) Obtenção das curvas I-V e P-V do módulo em estudo a partir das curvas e dados disponibilizados pelo fabricante;
- b) Determinação das resistências inerentes aos modelos matemáticos de um diodo de uma resistência e duas resistências ;
- c) Implementação dos modelos no software Matlab;
- d) Comparação das técnicas e modelos com as curvas do *datasheet*.



## CAPÍTULO II

### 2.1 Revisão Bibliográfica

O princípio de conversão das células fotovoltaicas é baseado no efeito fotovoltaico, o qual foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel. Becquerel verificou que placas metálicas, feitas de platina ou prata, imersas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz. Anos depois, por volta de 1877, W.G. Adams e R. E. Day, aplicaram as propriedades fotocondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz. Consistia em um filme de selênio depositado num substrato de ferro e com um segundo filme de ouro, semitransparente, que servia de contato frontal. Entretanto, a eficiência de conversão era muito baixa, da ordem de 0,5%. Anos mais tarde, por volta de 1953, nos Estados Unidos, foi criada a primeira célula capaz de produzir uma corrente mensurável (SANZIO E NASCIMENTO, 2016).

Na década de 60, a tecnologia fotovoltaica começou a ser utilizada em aplicações espaciais. Na época ocorria a “corrida espacial” a qual buscava desenvolver tecnologias espaciais, onde uma destas tecnologias consistia das fotocélulas para abastecimento energético dos astronautas no espaço. Outro fator que incentivou o investimento em tecnologia desse tipo foi a crise energética de 70. Entretanto o custo de fabricação desta tecnologia foi um obstáculo para maiores produções (CRESESB, 2010; CERQUEIRA e SOUZA, 2012).

#### 2.1.1 *Energia Solar*

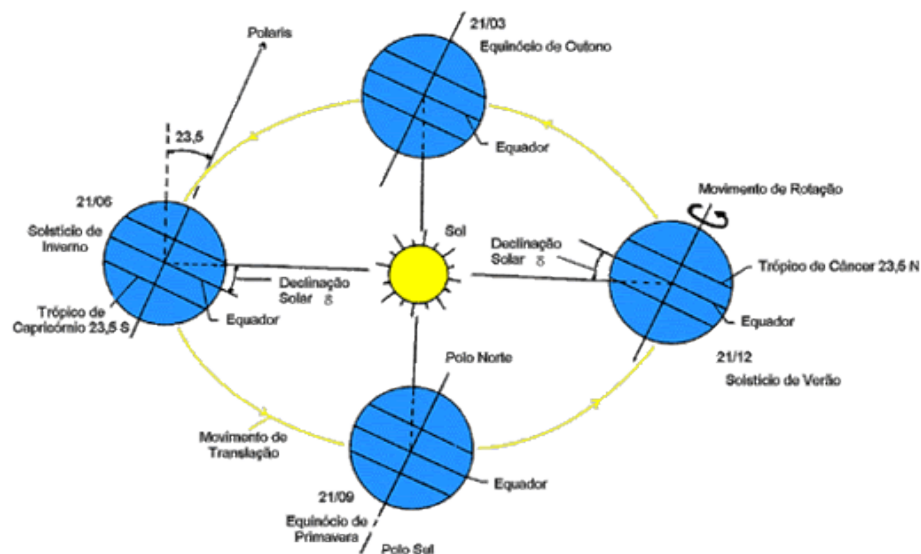
A energia solar pode ser compreendida como a energia obtida do Sol, gerada em seu núcleo, que chega à superfície terrestre como ondas eletromagnéticas (fótons) de forma direta ou difusa. Na superfície do sol, a temperatura pode atingir 15.000.000° C e a pressão cerca de 340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da Terra ao nível do mar. Nestas condições tão intensas, ocorrem reações nucleares que transformam prótons ou núcleos de átomos de hidrogênio em partículas alfa, que são núcleos de átomos de hélio. Durante este processo, milhões de toneladas de energia pura são liberadas. Desta forma, uma pequena fração da energia que o Sol irradia atinge a Terra, aquecendo-a e controlando o sistema climático global (HAMILTON, 1997 apud GOETZE, 2017).

Todas as formas de energia que existem na Terra, sendo renováveis ou não, são provenientes do sol em escalas de tempo distintas. A energia solar possibilita a evaporação, dando origem ao ciclo hidrológico, viabilizando o represamento e a geração de hidroeletricidade. Os ventos se originam através da conversão da radiação solar em energia

cinética, devido a distribuição não uniforme da energia no globo. Os combustíveis fósseis como petróleo, carvão e gás natural, resultam do acúmulo de energia solar ao longo de milhões de anos. Os resíduos de plantas e animais que originaram estes combustíveis absorveram energia proveniente do sol para que se desenvolvessem (BESSO, 2017).

A Terra, em seu movimento anual em torno do sol, descreve em trajetória elíptica um plano inclinado cerca de  $23,5^\circ$  em relação ao plano equatorial. Esta inclinação juntamente com o movimento de translação causam a variação da elevação do Sol no horizonte em relação ao mesmo horário, ao longo dos dias, originando as estações do ano. A Declinação Solar ( $\delta$ ), representada na Figura 2.1, corresponde a posição angular do Sol, ao meio dia, em relação ao plano do equador e varia entre  $-23,45^\circ$  e  $23,45^\circ$ , de acordo com o dia do ano (CRESESB, 2008).

Figura 2.1 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S.



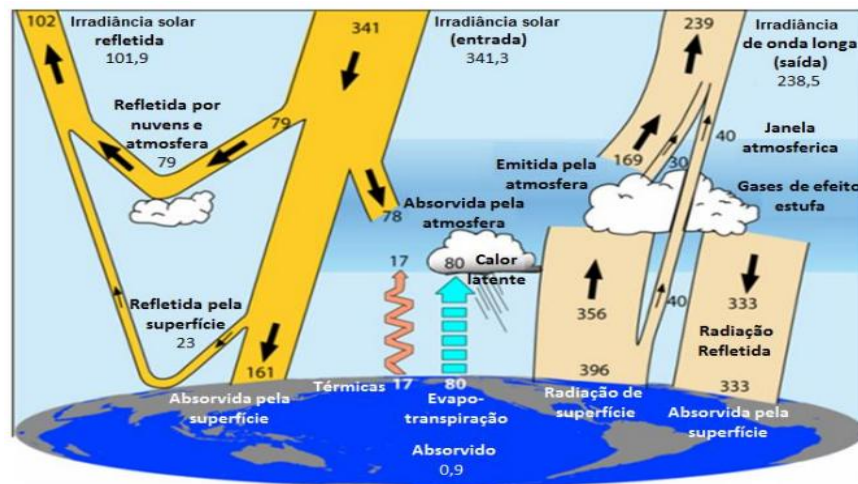
Fonte: CRESEB, 2008.

O termo radiação solar é utilizado de forma genérica para referir-se ao fluxo de potência por unidade de área, a irradiância solar. Quanto mais perpendiculares são os raios solares em relação a superfície terrestre, mais intensa é a insolação. Contudo, como a órbita terrestre é elíptica, a quantidade de insolação e portanto a irradiância solar, varia de acordo com a posição do planeta e o ângulo de incidência dos raios solares. O valor médio estimado pela WMO (World Meteorological Organization) para o nível de radiação solar que incide normalmente sobre uma superfície situada no topo da atmosfera é de  $1367 \text{ W/m}^2$ , também conhecido como constante solar (CRESESB, 2008).

A radiação solar é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética e se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s, podendo-se observar comportamento de caráter ondulatório e corpuscular. Em relação ao comprimento de onda, a radiação solar ocupa a faixa espectral de 0,1mm a 5 mm, tendo uma máxima densidade espectral em 0,5 mm, que é a luz verde. (CEPEL-CRESESB, 2014)

Da radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre devido aos processos de reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. A fração de radiação que atinge o solo é composta por uma componente direta e uma componente difusa. A Figura 2.2 apresenta um diagrama das interações entre a radiação solar e a atmosfera, baseado em medições de março de 2000 a novembro de 2005.

Figura 2.2 - Fluxo de potência global ( $W/m^2$ ).



Fonte: Manual CEPEL, 2014.

Estima-se que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera é de aproximadamente 174 mil TW (terawatts). Cerca de 54% desse valor sofre reflexão (7%) e absorção (47%) pela superfície terrestre, enquanto os 46% restantes são absorvidos ou refletidos diretamente pela atmosfera. Dessa forma, do valor total de potência disponibilizada pelo Sol à Terra, cerca de 94 mil TW chegam efetivamente à superfície terrestre (CEPEL-CRESESB, 2014).

### 2.1.2 *Efeito Fotovoltaico*

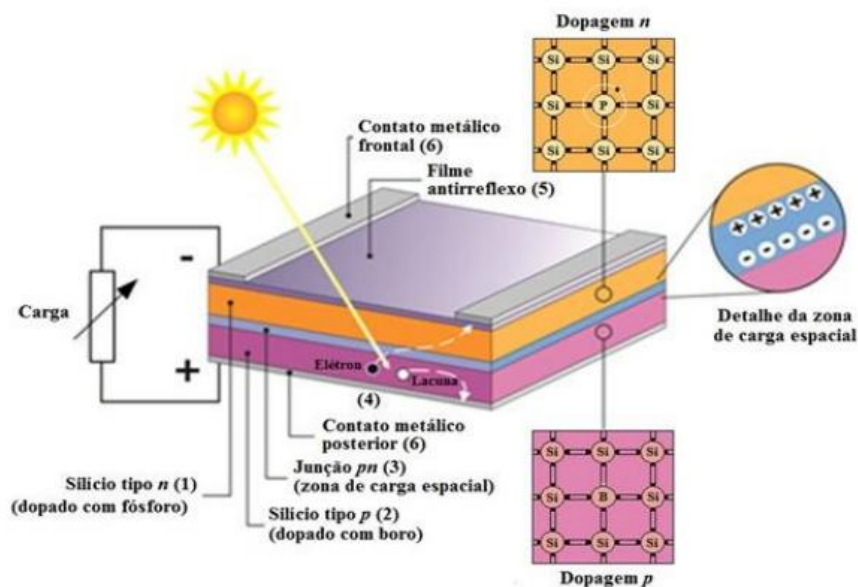
O princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico é baseado no efeito fotovoltaico, o qual é caracterizado pela conversão direta de energia solar em energia elétrica em materiais semicondutores (BESSO, 2017).

Os átomos possuem níveis de energia discretos os quais um elétron pode ocupar. Ao receber uma quantidade de energia suficiente, o elétron pode migrar de um nível para outro mais elevado. Ao serem aproximados, os átomos provocam o desdobramento dos níveis de energia, originando as bandas de energia, entre as quais podem haver faixas de valores proibidos de energia chamadas de *bandgap*. Para que um elétron salte de uma banda para outra, é necessário que ele adquira uma energia superior a da faixa (BUENO,2016).

As células fotovoltaicas são dispositivos formados de materiais semicondutores, principalmente silício e germânio, que consistem em materiais em que a banda de valência é separada por um *bandgap* da banda de condução. A banda de valência é a última banda onde os elétrons estão conectados ao átomo.

Na Figura 2.3 é mostrada a estrutura básica de uma célula de silício. Estes materiais são dopados de tal forma que um material passe a ter elétrons em excesso em suas ligações (material tipo N) enquanto o outro possua um acúmulo de lacunas (material tipo P). Na junção dos materiais tipo N e P é formada uma zona de depleção, região na qual se forma um campo elétrico, inibindo a difusão de cargas entre os dois materiais (CEPEL-CRESESB, 2014).

Figura 2.3 - Efeito fotovoltaico.



Fonte: Manual CEPEL, 2014.

Quando a junção P-N é exposta aos raios solares, os fótons absorvidos pela junção, que tenham energia maior que a do *bandgap*, provocarão o deslocamento de elétrons da banda de valência para a banda de condução, formando pares de elétrons-lacunas, também denominados fotoportadores. Se os fotoportadores são gerados na região de depleção, serão

então separados pelo campo elétrico resultante, que acelerará os elétrons e lacunas em direção oposta. Os elétrons são acelerados para o lado N e as lacunas para o lado P, gerando uma corrente através da junção (MENDONÇA, 2017).

### 2.1.3 *Módulos Fotovoltaicos*

Como foi abordado, o principal material que compõe as células fotovoltaicas é o silício. Os principais tipos de células fotovoltaicas de silício disponíveis no mercado são as de silício monocristalino e de silício policristalino, classificadas como células fotovoltaicas de primeira geração. As células de silício monocristalino são construídas a partir de um único cristal com orientação definida e imerso em silício fundido, produzindo lingotes de vários metros de comprimento. Quanto às células de silício policristalino, são produzidas a partir de um processo de fundição do silício em estado bruto e depois esfriado, ocorrendo a formação de vários cristais. As células de silício monocristalinas possuem uma eficiência na faixa de 13 a 18%, valor 2% maior que nas células policristalinas, porém seu custo é mais elevado pois exige um processo mais rigoroso de fabricação das células. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram painéis de silício monocristalino e policristalino, respectivamente (NAKANO, 2017; LUNA, 2013).

Figura 2.4 - Painel solar Monocristalino.



Fonte: [www.enelsolucoes.com.br](http://www.enelsolucoes.com.br) (2016)

Figura 2.5 - Painel Solar Policristalino.



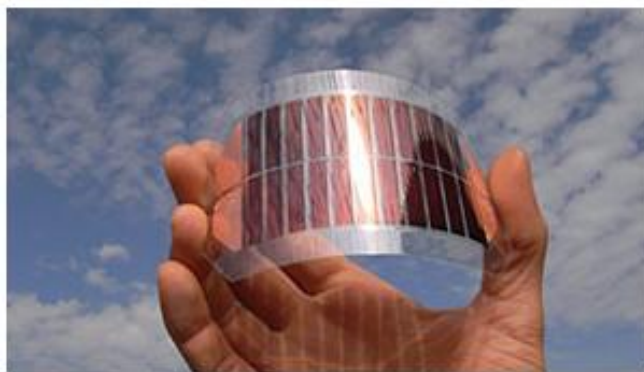


Fonte: [www.ensolucoes.com.br](http://www.ensolucoes.com.br) (2016)

As células fotovoltaicas de segunda geração, ou tecnologia de filme fino, são células flexíveis, menos sensíveis a maiores temperaturas e cuja eficiência de conversão sofre menos influência do efeito de sombreamento. As células de Silício Amorfo (a-Si) são um exemplo dessa tecnologia. Diferente da tecnologia de silício cristalino, os átomos de silício estão localizados de forma aleatória em relação aos outros, resultando no aumento da energia do GAP (1,7 eV) em comparação à célula de primeira geração (ORTEGA, 2013).

As células de a-Si apresentam melhor funcionamento com radiação difusa, devido ter sua resposta espectral mais voltada para a região azul do espectro de frequência. Sua eficiência está entre 6 e 9%, valor que vai diminuindo com o tempo devido à degradação pela luz, limitando a vida útil do painel em cerca 10 anos. Uma vantagem dessa tecnologia está na maior possibilidade de aplicação devido a sua estrutura flexível (NAKANO, 2017).

Figura 2.6 - Célula de Silício Amorfo (a-Si).



Fonte: <http://www.strombrasil.com.br>

Desta forma, a principal distinção entre as diferentes tecnologias baseadas no uso de silício está relacionada às características de rendimento e custo, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Eficiência e custo de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas.

Tipo de célula	Eficiência			Custo (\$/Wp)
	Teórico	Laboratório	Comercial	
Silício de cristal simples	30,0	24,7	12 a 14	1 a 2
Silício policristalino	25,0	19,8	11 a 13	0,6 a 1,2
Silício amorfo	17,0	4 a 7	3 a 5	-

Fonte: adaptado de GREEN et al, 2000 apud ALBUQUERQUE(01), 2017.

Uma tecnologia de segunda geração bastante promissora, que oferece uma maior eficiência e menor custo, são as células de Telureto de Cádmio (TeCd). Células de TeCd com uma pequena área apresentam eficiência de cerca de 15% e os módulos fotovoltaicos dessa tecnologia já apresentaram eficiências superiores a 9%. Entretanto, as células de TeCd apresentam desvantagens quanto aos aspectos ambientais relacionados ao seu processo de fabricação e reciclagem, devido a toxicidade do Cádmio. As células de Disseleneto de Cobre e Índio (CIS), outra tecnologia de filmes finos, também apresentam boa eficiência de conversão e não têm problemas de toxicidade em sua fabricação, porém uma desvantagem dessa tecnologia é o alto custo associado a raridade do Índio. A Figura 2.7 apresenta imagens de módulos de TeCd e CIS (ORTEGA, 2013; NOVAK, 2016; PEROZA, 2015).

Figura 2.7- Módulo de TeCd, à esquerda. Módulo de CIS, à direita.

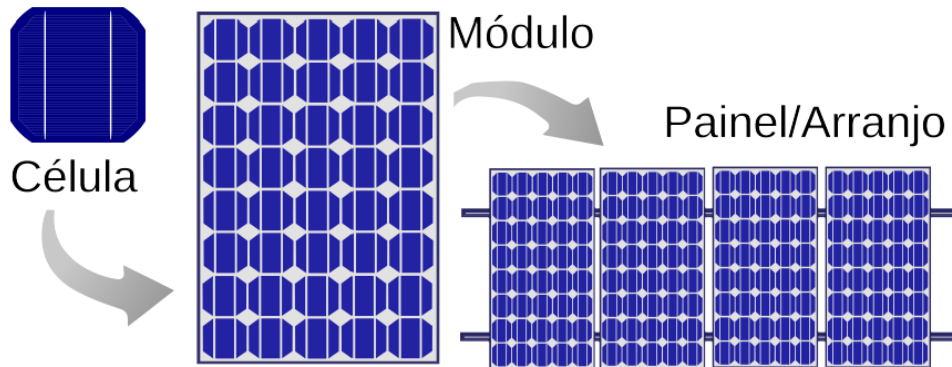


Fonte: NOVAK, 2016.

#### 2.1.4 Características dos módulos fotovoltaicos.

As células fotovoltaicas são os elementos mais básicos na construção dos módulos, sendo interligadas para se obter tensões apropriadas de acordo com aplicações distintas. Os módulos, por sua vez, são interligados na construção de painéis fotovoltaicos, como representado na Figura 2.8.

Figura 2.8. Estrutura de módulos e painéis fotovoltaicos.



Fonte: (ALBUQUERQUE(01), 2017)

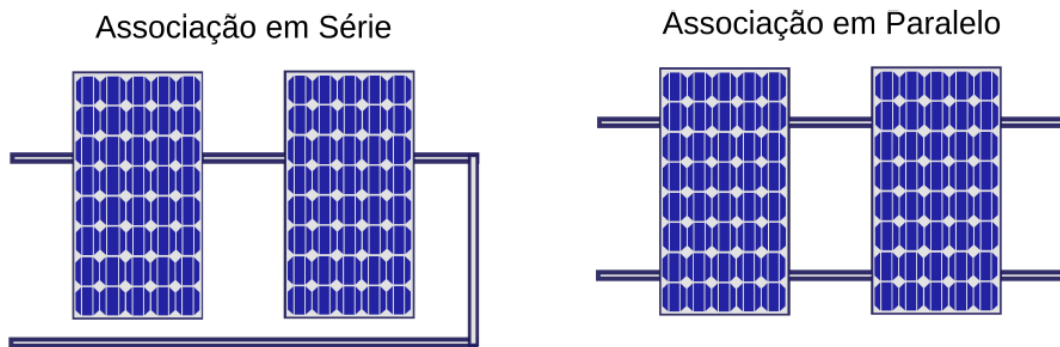
Para proporcionar a tensão e corrente necessária, os módulos podem ser conectados em série ou paralelo, como representado na Figura 2.9, ou ainda em conexão mista dentro dos painéis. Quando se deseja uma tensão mais elevada, agrupam-se os módulos em série e quando se deseja uma corrente elevada, os módulos são conectados em paralelo. (VALENTE, 2011)

Quando um dos módulos de uma conexão em série destes dispositivos for encoberto por uma sombra, a potência do sistema será reduzida devido a diminuição da tensão gerada no módulo sombreado. Uma forma de solucionar esse problema é utilizando um diodo de bypass em cada módulo, fazendo com que a corrente do sistema não seja limitada pela corrente do módulo encoberto. O diodo tem a função de caminho para a corrente, limitando a dissipação de calor no módulo.

O módulo fotovoltaico é normalmente identificado pela sua potência de pico (Wp). Entretanto alguns cuidados devem ser tomados com relação a aplicação e condições ambientais do local de instalação módulo, uma vez que a potência de pico é determinada sob condições-padrão de ensaio (STC-Standard Test Conditions), as quais considera a temperatura da célula de 25°C e irradiância solar de 1000 W/m<sup>2</sup> numa distribuição espectral padrão para AM 1,5. (SOUZA, 2017; ALBUQUERQUE, 2017).



Figura 2.9 - Associação em série e em paralelo de módulos fotovoltaicos.



Fonte: ALBUQUERQUE, 2017.

A potência máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) é o fator determinante na escolha do módulo. Porém existem outros aspectos importantes que caracterizam um módulo, entre eles (LUNA, 2013):

a) Corrente de curto circuito ( $I_{\text{sc}}$ ): corrente máxima que um dispositivo fotovoltaico pode fornecer sob determinadas condições de temperatura e radiação quando a tensão é nula. Portanto, sendo nesse caso a potência nula;

b) Tensão de circuito aberto ( $V_{\text{oc}}$ ): é a máxima tensão que o dispositivo fotovoltaico pode entregar sob determinadas condições de temperatura e radiação, sendo a corrente nula. Logo, a potência é nula;

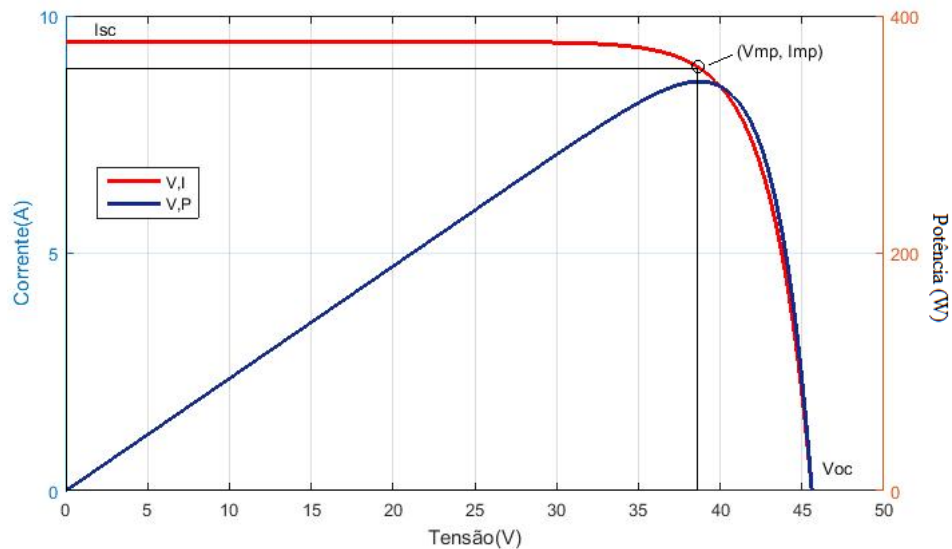
c) Fator de Forma (FF): razão entre a máxima potência da célula ( $P_{\text{máx}}$ ) e o produto da tensão de circuito aberto pela corrente de curto circuito. O fator de forma depende da tecnologia usada, por exemplo para as células de Silício encontram-se FF entre 80,9% e 82,8% (CEPEL-CRESESB, 2014);

d) Eficiência ( $\eta$ ): parâmetro que indica quão efetivo é o processo de conversão fotovoltaica. É dada pela relação entre a potência ( $W_p$ ) produzida pela célula nas condições STC e potência da energia solar incidente.

Apesar de importantes, as informações de  $I_{\text{sc}}$  e  $V_{\text{oc}}$  pouco contribuem em relação ao comportamento real do módulo, principalmente sobre sua potência real. Dessa forma, é traçada uma curva I-V que fornece um ensaio mais completo para determinar as características do módulo. Para a obtenção da curva, o módulo é submetido às condições- padrão de ensaio e uma fonte de tensão variável que faz uma varredura variando de uma tensão negativa de poucos Volts até superar a tensão  $V_{\text{oc}}$  do módulo, quando a corrente fica negativa. Nesse processo, registram-se pares ordenados de tensão e corrente que são utilizados para a obtenção da curva característica I-V do módulo. Uma curva I-V desse tipo está representada na Figura 2.10.

Outra curva que fornece dados importantes é a curva P-V de potência em função da tensão, onde se identifica o ponto com o valor máximo de potência. O ponto de máxima potência corresponde a um ponto da curva I-V, onde estão os valores de tensão e corrente de máxima potência,  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$ , respectivamente. As curvas I-V e P-V para um módulo com potência nominal de 100 Wp estão representadas na Figura 2.10 (CEPEL-CRESESB, 2014; BESSO, 2017; PEROZA, 2015).

Figura 2.10 - Curvas I-V e P-V de módulo fotovoltaico.



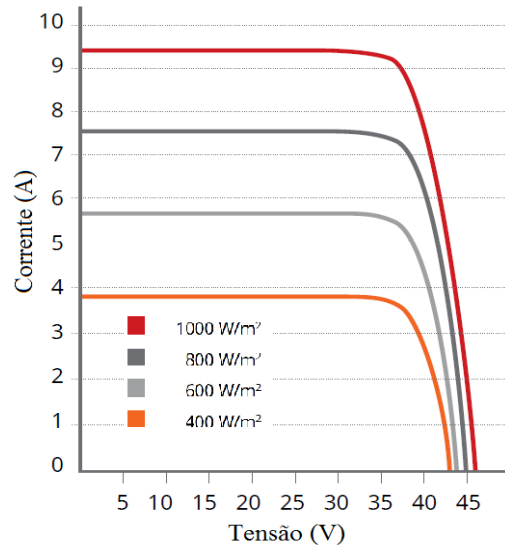
Fonte: Adaptado de CEPEL,2014.

## 2.2 Efeito da Temperatura e Irradiação nas curvas I-V e P-V

### 2.2.1 Efeito da Radiação

O funcionamento dos módulos fotovoltaicos é influenciado pela irradiância solar, sendo a corrente fotogerada proporcional à radiação absorvida pelas células. A corrente de curto-circuito cresce linearmente em função da irradiância, enquanto a corrente de diodo não é afetada (BESSO, 2017). Em relação a tensão, esta sofre variação com a irradiância de forma logarítmica. A Figura 2.11 mostra as curvas características I-V geradas para um módulo fotovoltaico de 72 células de silício cristalino, variando-se a irradiância e mantendo a temperatura de célula constante em 25°C (LOPES, 2013).

Figura 2.11 - Efeito de variação da irradiância solar.



Fonte: Folha de dados do módulo CS6U da Canadian Solar.

A relação entre a corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) de um módulo e a irradiação incidente está representada na equação abaixo:

$$I_{sc} = I_{sc,STC} \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.1)$$

Onde:

$I_{sc,STC}$  (A): corrente de curto-circuito do módulo a 25° e irradiação  $G(W/m^2)$ ;

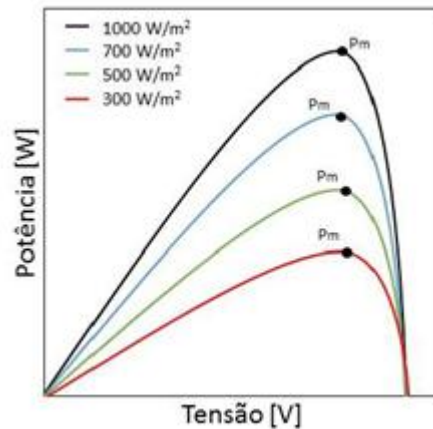
$I_{sc}$  (A): corrente de curto-circuito do módulo nas STC;

$G_{ref}$  ( $W/m^2$ ): radiação incidente sobre o módulo a 1000 ( $W/m^2$ )- STC;

$G(W/m^2)$ : radiação sobre o módulo.

Desta forma, sendo a potência máxima o produto da tensão e da respectiva corrente gerada, o desempenho do módulo é diretamente proporcional à irradiação incidente. A Figura 2.12 representa a variação da potência do módulo para diferentes níveis de radiação.

Figura 2.12- Curva P-V para diferentes níveis de radiação

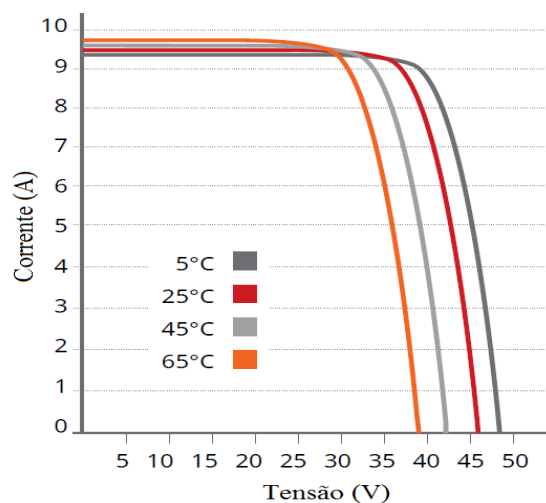


Fonte: LIMA, 2014

### 2.2.2 *Efeito da Temperatura*

Além da irradiância solar, as características elétricas dos módulos também são influenciadas pela temperatura. A elevação da temperatura à que as células são submetidas causa uma significativa queda de tensão. Já a corrente apresenta um pequeno aumento que não supre a perda causada pela redução da tensão, consequentemente reduzindo a potência máxima fornecida pelo sistema. A Figura 2.13 mostra as curvas I-V para um módulo de 72 células de silício cristalino, mantendo-se a irradiância constante a  $1000\text{W/m}^2$  e variando a temperatura. (BESSO, 2017; LIMA, 2014; PEROZA, 2015).

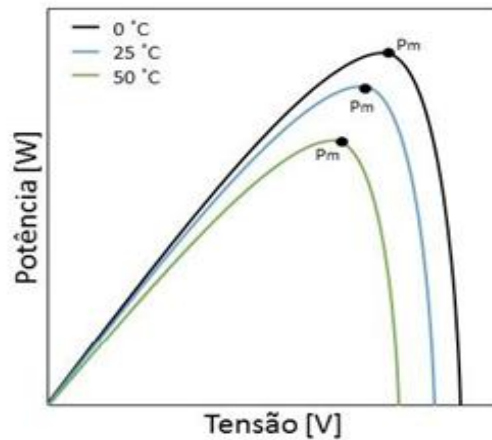
Figura 2.13 - Efeito de variação da temperatura.



Fonte: Folha de dados CS6U da Canadian Solar.

A Figura 2.14 representa a variação da potência gerada de acordo com a temperatura.

Figura 2.14- Curva P-V para diferentes temperaturas.



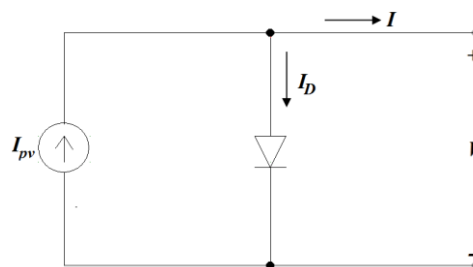
Fonte : LIMA, 2014.

## 2.3 Modelos elétricos e matemáticos das células fotovoltaicas

### 2.3.1 Modelo Ideal

O modelo matemático ideal de um diodo para uma célula fotovoltaica, pode ser representado por um modelo elétrico equivalente, como mostrado na Figura 2.15, representado pela fonte de corrente, que representa a corrente gerada pela incidência de luz na célula ligada a um condutor externo. A fonte de corrente fica em paralelo com um diodo de junção P-N, onde  $I_D$  é a corrente que flui pelo diodo (MELO et al, 2016).

Figura 2.15-Circuito equivalente do modelo ideal.



Fonte: Autora.

Aplicando a lei de Kirchoff ao circuito, conclui-se que a corrente entregue à carga corresponde a diferença entre a corrente gerada e a corrente do diodo, como expresso na equação abaixo:

$$I = I_{pv} - I_d \quad (2.2)$$

A corrente que flui através do diodo pode ser expressa em função da tensão como mostra a equação abaixo:

$$I_d = I_0 \left[ e^{\left(\frac{V}{nV_t}\right)} - 1 \right] \quad (2.3)$$

Onde:

$I_0$ (A): corrente de saturação do diodo;

V (V): tensão nos terminais da célula;

n: fator de idealidade do diodo (ideal  $n=1$ , real  $n>1$ );

$V_t$ : denominador de potencial térmico é dado por  $\frac{kT}{q}$ , onde:

k: constante de Boltzmann ( $1,3806503 \times 10^{-23}$ );

q: carga elementar do elétron ( $1,60217646 \times 10^{-19}$ );

T: temperatura da junção P-N em Kelvin;

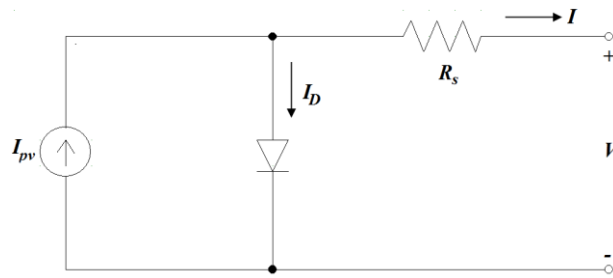
Desta forma, a corrente entregue a carga descrita pela equação 2.2 torna-se equação abaixo:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ e^{\left(\frac{V}{nV_t}\right)} - 1 \right] \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Modelo de um diodo e uma resistência $R_s$

Para representar de forma mais abrangente o comportamento elétrico de célula fotovoltaica, é adicionado ao modelo ideal uma resistência  $R_s$  que se refere à resistência interna do próprio material semicondutor e à resistência devido ao contato entre este e os contatos metálicos. O valor de  $R_s$  é da ordem de milésimos a dezenas de ohms e depende da qualidade do material de fabricação da célula. No circuito equivalente estas perdas são representadas através de uma resistência em série, como na Figura 2.16. (ALVES, 2018; ROGANI, 2013).

Figura 2.16 - Circuito equivalente do modelo de um diodo e  $R_s$ .



Fonte: Autora.

Este modelo considera o conhecimento dos quatro parâmetros  $I_{pv}$ ,  $I_0$ ,  $n$  e  $R_s$ . A corrente de saída é determinada pela equação abaixo:

$$I = I_{pv} - I_0 \left( e^{\frac{(V+R_s I)}{nV_t}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Onde:

$$I_{pv} = \left( I_{sc} + k_0(T - T_{ref}) \frac{Ga}{G_{ref}} \right) \quad (2.6)$$

$$I_0 = I_{0,STC} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left( \frac{-qE_g}{nk} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (2.7)$$

$$I_{0,STC} = \frac{I_{sc}}{\left[ \exp \left( \frac{qV_{oc}}{nkT_{ref}} \right) - 1 \right]} \quad (2.8)$$

Onde:

$G_{ref}$  : irradiação de 1000 (W/m<sup>2</sup>);

$T_{ref}$  é a temperatura ambiente;

$K_0$ : coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito, fornecida pelo datasheet.

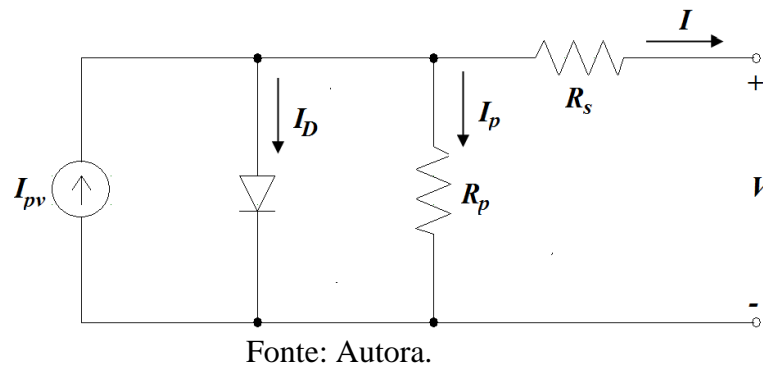
A corrente  $I_{sh}$  é a corrente que flui através da resistência  $R_p$ .

### 2.3.3 Modelo de um diodo e resistência em série e paralelo

A partir do modelo mais simplificado é possível acrescentar parâmetros que aproximem o modelo da realidade para melhor explicar o comportamento das células. O modelo de um diodo e duas resistências considera, além da resistência do material semiconductor e dos contatos elétricos ( $R_s$ ), um outro parâmetro que representa as perdas

originadas por impurezas e defeitos na estrutura, produzindo um caminho interno para uma corrente de fuga e provocando a redução da corrente gerada pelo dispositivo. Essas perdas são representadas por uma resistência em paralelo (LOPES, 2013; HANSEN, 2015). O modelo da célula fotovoltaica considerando as duas resistências é mostrado na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Circuito equivalente do modelo de um diodo e duas resistências



O modelo de um diodo e duas resistências é conhecido por explicar com mais proximidade o comportamento das perdas ôhmicas. Esse modelo também é conhecido como modelo de 5 parâmetros pois considera as duas resistências,  $R_s$  e  $R_p$ , o fator de idealidade do diodo  $n$ , a corrente  $I_{ph}$  e a corrente inversa de saturação do diodo  $I_0$  (PINTO, 2016).

Aplicando a Lei de Kirchoff dos nós, tem-se:

$$I = I_{pv} - I_d - I_{sh} \quad (2.9)$$

A fotocorrente  $I_{pv}$  depende diretamente da irradiação solar  $G$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), da temperatura e do coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito dado pelo fabricante, podendo ser expressa pela equação abaixo.

$$I_{pv} = I_0 + K_0 (T_c - T_{ref}) \quad (2.10)$$

$$I_0 = I_{scSTC} \times \frac{G_a}{G_{ref}} \quad (2.11)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{cel} + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.12)$$

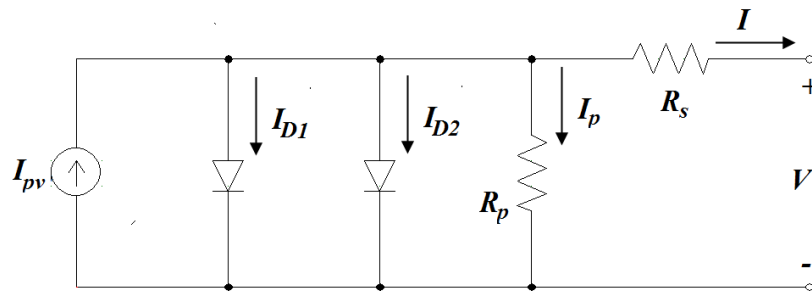
A equação (2.11) mostra a relação entre a corrente  $I_0$  e a irradiação, já a equação 2.12 representa a corrente que flui pela resistência em paralelo do modelo.



### 2.3.4 Modelo de dois diodos e duas resistências.

O modelo de um diodo e duas resistências mostrado anteriormente não considera as perdas de corrente que ocorrem na região de depleção na junção p-n. O modelo de dois diodos e duas resistências, representado na Figura 2.18, considera essas perdas, sendo introduzidos dois novos parâmetros: a corrente  $I_{D2}$ , que flui no segundo diodo e o fator de idealidade  $n_2$  do segundo diodo (ALVES, 2018).

Figura 2.18-Circuito equivalente do modelo de dois diodos e duas resistências.



Fonte: Autora.

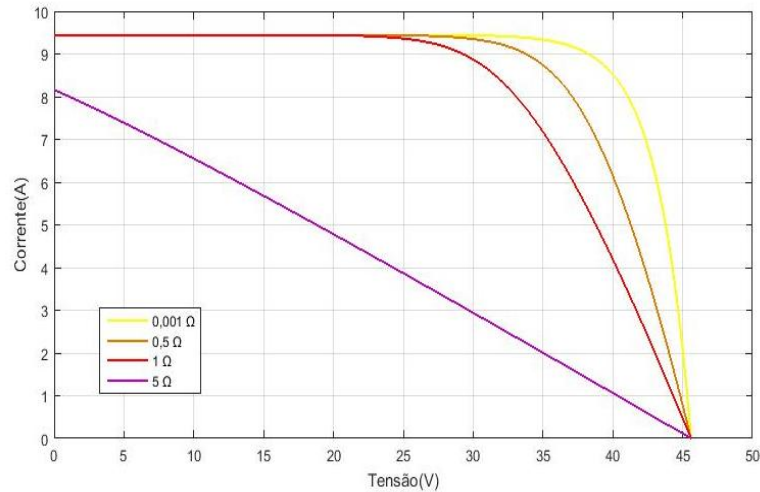
Desta forma, sete parâmetros são considerados neste modelo:  $I_{pv}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $R_s$  e  $R_p$ . A relação entre a corrente e a tensão no modelo de dois diodos é dada pela equação a seguir:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\frac{(V+IR_s)}{n_1 V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{(V+IR_s)}{n_2 V_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2.13)$$

## 2.4 Influência de $R_s$ e $R_p$ na curva I-V

As resistências série ( $R_s$ ) e paralelo ( $R_p$ ), representadas nos modelos da seção 2.5, têm influência importante no comportamento da curva I-V da célula. Conforme mostra a Figura 2.19, quanto menores as perdas resistivas mais próxima da forma retangular é a curva I-V. O fator de forma (FF) da célula é diretamente afetado pela perdas resistivas, pois à medida em que  $R_s$  e  $R_p$  aumentam, o FF da célula sofre redução e consequentemente sua eficiência também (CARVALHO,2014; CRESESB,2014).

Figura 2.19-Efeito da resistência série ( $R_s$ ) na curva I-V de uma célula fotovoltaica nas condições STC e considerando  $R_p \rightarrow \infty$ .

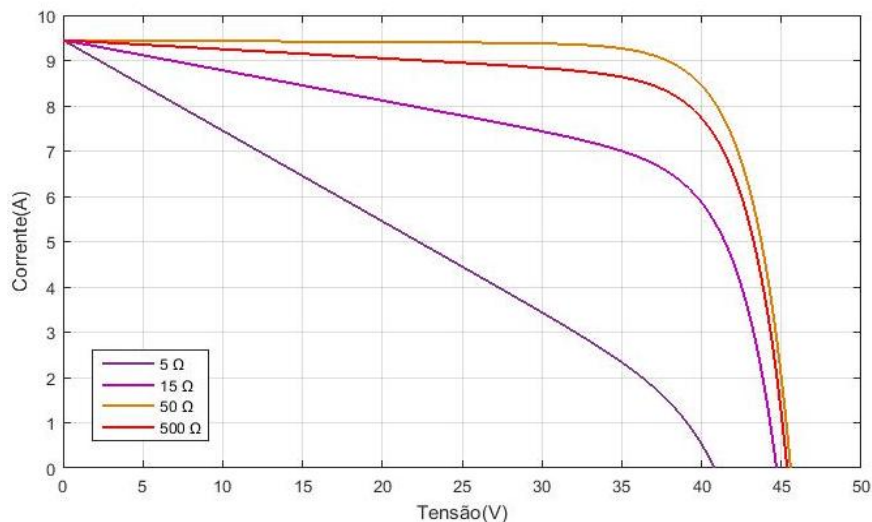


Fonte: Adaptado de Bueno (2016)

Através da Figura 2.19, observa-se que a resistência série contribui para a redução da  $I_{sc}$ , logo reduz o FF, entretanto não afeta a  $V_{oc}$ . À medida que o valor de  $R_s$  é aumentado, a curva I-V perde seu formato característico e se apresenta como uma reta de inclinação  $1/R_s$ .

Quanto ao efeito de  $R_p$ , conforme mostrado na figura 2.20, o mesmo provoca a redução de  $V_{oc}$ , e portanto do FF, mas não influencia na  $I_{sc}$ . Para valores mais baixos de  $R_p$ , nota-se a perda do formato curvo e a curva característica se torna uma reta de inclinação  $1/R_p$ .

Figura 2.20- Efeito da resistência paralelo ( $R_p$ ) na curva I-V de uma célula fotovoltaica nas condições STC e considerando  $R_s$  nula.



Fonte: Adaptado de Adaptado de Bueno (2016)

Analisando-se a influência de cada resistência, no que tange ao FF e à  $P_{mp}$ , a célula apresenta maior sensibilidade para variações de  $R_s$  do que para variações de  $R_p$ . Desta forma,

manter o valor de  $R_s$  em um valor baixo através de projeto e fabricação adequados, contribui decisivamente para a eficiência da célula (CRESESB,2014).

Desta forma, analisando as Figuras 2.19 e 2.20, percebe-se a importância de estimar estes parâmetros, uma vez que os mesmos apresentam uma notável influência nos parâmetros de eficiência do módulo fotovoltaico.

## CAPÍTULO III

### 3.1 Metodologia

#### 3.1.1 *Métodos De Estimação das resistências*

##### 3.1.1.1 *Métodos para o modelo de uma resistência*

Segundo Albuquerque (2017), o modelo de uma resistência apresenta uma boa precisão e simplicidade. Os parâmetros podem ser encontrados utilizando pontos-chave da curva I-V ou informações do *datasheet* do módulo para estabelecer um conjunto de equações que tenham uma solução, seja de forma analítica ou numérica. Nesse caso, os parâmetros encontrados serão para um módulo novo operando sob condições STC.

Ao determinar os parâmetros algumas simplificações devem ser consideradas, uma delas é que a diferença entre a corrente  $I_{ph}$  e  $I_{sc}$  é desprezível para células de silício cristalino. Desta forma, a equação 2.5 se torna a equação 3.1.

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{(V+IR_s)}{nVt}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

##### 3.1.1.2 *Método Simplificado*

Este método é implementado aplicando os pontos  $(0, I_{sc})$ ,  $(V_{oc}, 0)$  e  $(V_{mp}, I_{mp})$  da curva I-V e derivando a potência em relação a tensão no ponto de máxima potência, conforme a equação 3.2.

$$\frac{dP}{dV} \Big|_{P=P_{mp}} = V_{mp} \frac{dI}{dV} + I_{mp} \quad (3.2)$$

Como a equação característica trata-se de uma função transcendente, ou seja,  $I = f(I, V)$ , a equação 3.2 torna-se a equação 3.3.

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\partial f(I,V)}{\partial V} V + \frac{\partial f(I,V)}{\partial I} \cdot \frac{dI}{dV} = \frac{df(I,V)}{dV} \cdot \left( 1 - \frac{\partial f(I,V)}{\partial I} \right)^{-1} \quad (3.3)$$

Aplicando as equações 3.2 e 3.3 à equação 3.1 obtêm-se a equação 3.4.

$$\frac{I_{mp}}{V_{mp}} = \frac{I_0 e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{V_t}}}{V_t \left( 1 - \frac{R_s I_0 e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{V_t}}}{V_t} \right)} \quad (3.4)$$

Considerando que a corrente de saturação é muito pequena em relação à exponencial, pode-se desconsiderar o termo “-1”, no ponto  $(0, V_{oc}$  e  $(I_{mp}, V_{mp})$  de operação a equação característica do modelo torna-se a equação 3.5 e 3.6, respectivamente.

$$0 = I_{sc} - I_0 \cdot e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} \quad (3.5)$$

$$I_{mp} = I_{sc} - I_0 \cdot e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{V_t}} \quad (3.6)$$

Considerando as equações 3.4, 3.5 e 3.6, pode-se chegar as soluções para os parâmetros  $V_t$  e  $R_s$ .

$$V_t = \frac{(I_{sc} - I_{mp})(2V_{mp} - V_{oc})}{I_{mp} - \left( I_{sc} - I_{mp} \ln \left( \frac{I_{sc} - I_{mp}}{I_{sc}} \right) \right)} \quad (3.7)$$

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{mp} + V_t \ln \left( \frac{I_{sc} - I_{mp}}{I_{sc}} \right)}{I_{mp}} \quad (3.8)$$

A partir das equações 3.7 e 3.8 pode-se calcular os principais parâmetros simplesmente usando os dados fornecidos pelo fabricante, entretanto deve-se notar que estes representam parâmetros de ajuste, não fornecendo os reais parâmetros físicos do módulo. (KHEZZAR, ZEREG e KHEZZAR, 2009; ALBUQUERQUE, 2017).

No trabalho desenvolvido por Hashim & Khazaal (2017) esse método apresentou bons resultados, fornecendo uma boa aproximação aos valores experimentais medidos.

### 3.1.1.3 *Método da derivada*

Sabe-se da seção 2.6 que a resistência série influencia na inclinação da curva entre o ponto de máxima potência e o de  $V_{oc}$ . Através do cálculo da inclinação da reta, pode encontrar um valor médio de  $R_s$ . Esse método não é tão confiável pois depende de pontos escolhidos na curva, porém trata-se de uma metodologia simples que estima valores preliminares. A equação 3.9 representa a equação característica em relação a tensão (BUENO, 2016; EICKER, 2001)

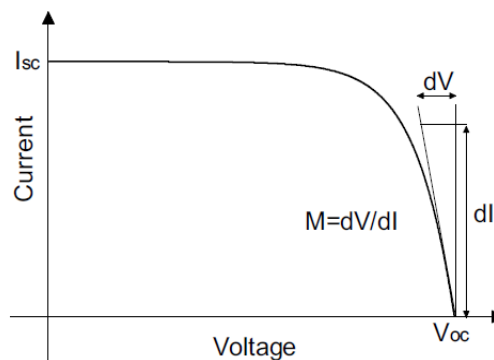
$$\frac{dI}{dV} = -I_0 \left[ e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} - 1 \right] V_t \left( 1 + R_s \frac{dI}{dV} \right) \quad (3.9)$$

Derivando a equação 3.9 no ponto de tensão Voc:

$$R_s = \frac{-dV}{dI_{Voc}} = \frac{-V_t}{I_0 e^{\frac{V_{oc}}{nV_t}}} \quad (3.10)$$

A resistência série pode ser determinada geometricamente pela curva experimental através da inclinação  $\frac{dV}{dI}$  em  $I \approx 0$  no ponto  $(0, V_{oc})$  conforme a figura 3.1. (COFTAS et Al, 2008).

Figura 3.1- Derivada da tensão em relação à corrente na condição Voc

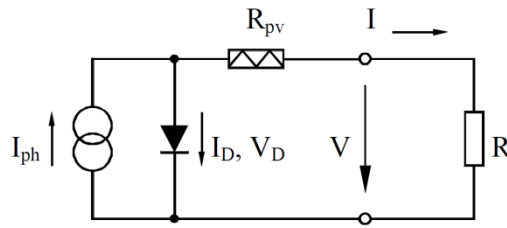


Fonte: Adaptado de Carvalho (2014) e COFTAS (2008).

#### 3.1.1.4 Método IEC 60891

Este método considera que o modelo de uma resistência possui um dispositivo fotoelétrico fictício cujas características correspondem aproximadamente à de uma resistência positiva ou negativa. No modelo elétrico da figura 3.2 o dispositivo foi substituído por Rpv (resistor fotovoltaico) e não deve ser confundido com a resistência série Rs. (WAGNER, 2001; ALBUQUERQUE, 2017; KUNS e WAGNER, 2004).

Figura 3.2- Derivada da tensão em relação à corrente na condição Voc.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2014) e COFTAS (2008).

Desta forma, a equação característica torna-se a equação 3.11.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V + I_{cell} R_{pv}}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

A tensão  $V$  é determinada pela equação 3.12.

$$V = V_t \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{cell} + I_0}{I_0} \right) - I_{cell} R_{pv} \quad (3.12)$$

Para determinar a resistência série por este método são necessárias duas curvas de radiações diferentes, mas com mesmo espectro e mesma temperatura. As correntes  $I_{sc1}$  e  $I_{sc2}$  se referem às correntes de curto circuito obtidas para a maior e menor radiação, respectivamente. Para aplicar o método deve-se seguir o seguinte procedimento:

- a) Definir a variação  $\Delta I$  pela corrente de curto circuito  $I_{sc2}$  da curva de menor radiação, através da equação 3.13.

$$\Delta I_{sc} = 0,5 I_{sc2} \quad (3.13)$$

- b) Determinar as correntes  $I_{r1}$  e  $I_{r2}$  através das equações:

$$I_{r1} = I_{sc1} - \Delta I_{sc} \quad (3.14)$$

$$I_{r2} = I_{sc2} - \Delta I_{sc} \quad (3.15)$$

- c) Calcular os parâmetros  $M$ ,  $R_{pv}$ ,  $V_t$ ,  $I_0$ ,  $I_{ph}$  para as características das duas curvas através das equações 3.16 à 3.20.

$$M = \frac{dV}{dI_{cell}} (I=0) = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \left( k_1 \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} + k_2 \frac{V_{mp}}{V_{oc}} + k_3 \frac{I_{mp}}{I_{sc}} + k_4 \right) \quad (3.16)$$

Onde :

$$k_1 = -5,411;$$

$$k_2 = 6,450;$$

$$k_3 = 3,417;$$

$$k_4 = -4,422;$$

$$R_{pv} = -M \left[ \frac{I_{sc}}{I_{mp}} + \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \left( 1 - \frac{I_{sc}}{I_{mp}} \right) \right] \quad (3.17)$$

$$V_t = -(M + R_{pv}) I_{sc} \quad (3.18)$$

$$I_0 = I_{sc} e^{\frac{-V_{oc}}{V_t}} \quad (3.19)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \quad (3.20)$$

d) Determinar os pontos de operação V1 e V2, das funções 3.21 e 3.22, graficamente.

$$V_1 = V(I_{sc1} - \Delta I_{sc}, R_{pv1}, V_{t1}, I_{01}, I_{ph1}) \quad (3.21)$$

$$V_2 = V(I_{sc2} - \Delta I_{sc}, R_{pv2}, V_{t2}, I_{02}, I_{ph2}) \quad (3.22)$$

e) Finalmente, a resistência série é dada pela equação 3.23.

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_{sc1} - I_{sc2}} \quad (3.23)$$

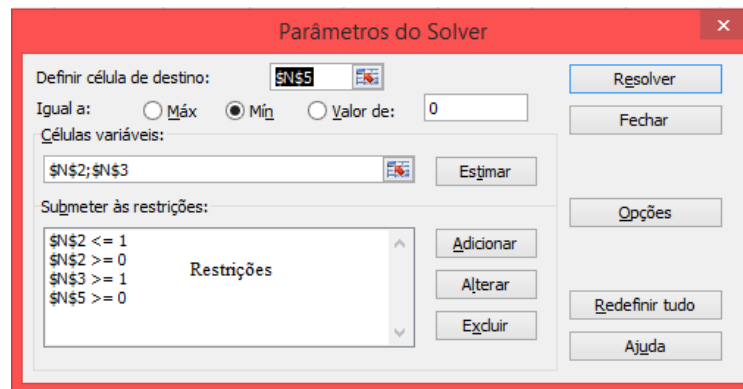
### 3.1.2 Métodos para o modelo de duas resistências

#### 3.1.2.1 Solver Excel



O Solver é um suplemento do Microsoft Excel utilizado para teste de hipóteses e pode ser utilizado para encontrar um valor ideal para a fórmula de uma célula através do ajuste de outras células, chamadas de variáveis de decisão ou células variáveis, em uma planilha, conforme restrições pré-estabelecidas. O Solver realiza o ajuste dos valores das células variáveis de forma a satisfazer os limites impostos sobre células de restrição gerando o resultado desejável para a célula destino. (MICROSOFT, 2016).

Figura 3.3. Configurações do Solver.



Fonte: Autora.

A vantagem do Solver é que ele vem juntamente com o Software Excel que é de grande conhecimento popular. Outra vantagem é que o método usado pelo suplemento Solver não necessita manipular as equações do módulo fotovoltaico nem realizar a normalização dos dados para variações de temperatura e irradiância, referente ao levantamento da curva característica do módulo. (COSTA, 2010)

Para realizar a parametrização através do solver Excel é necessário obter os dados da curva digitalizada. Em seguida são calculados analiticamente os valores da corrente fotogerada e a corrente de saturação reversa e então apenas as resistências série e paralelo ficam por se conhecer. Posteriormente a corrente de saída é calculada em função das variáveis ausentes, possibilitando estabelecer um erro absoluto para cada ponto da curva. Assim, a célula de destino é a que contém a média dos erros. Os valores de corrente calculada, os valores de parâmetros utilizados, as células variáveis e os erros e o erro médio calculado encontram-se na figura 3.4.

Figura 3.4 Planilha com exemplo de parametrização utilizando Solver Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	V	I	I_calc	Erro										
2	0,000	9,446	9,445414272	0,000			k	1,38E-23					Rs	0,485463
3	1,011	9,446	9,444402755	0,001			q	1,60E-19					Rsh	1000,00
4	3,063	9,446	9,442350999	0,003			n	1,3						
5	5,228	9,446	9,440184551	0,006			Eg	1,14					Erro méd	0,000
6	8,191	9,446	9,437216657											
7	10,812	9,446	9,434581839											
8	13,319	9,446	9,432036731											
9	16,054	9,446	9,429177453											
10	18,447	9,446	9,426472581											
11	20,613	9,446	9,423585347											
12	23,006	9,446	9,419118951											
13	25,399	9,446	9,411119577											
14	26,425	9,446	9,405364578											
15	27,963	9,446	9,391624297											
16	28,875	9,446	9,378812393											
17	29,615	9,446	9,364468258											
18	30,413	9,426	9,343788359											
19	31,211	9,415	9,315193758	0,100										
20	31,895	9,405	9,282230477	0,123										

Fonte: Autora.

Este método foi utilizado por Chenche (2015) para obter os parâmetros de um módulo fotovoltaico apresentando os melhores resultados dentre os métodos analisados pelo autor. Costa (2010) também utilizou o Solver Excel para a parametrização de módulos fotovoltaicos.

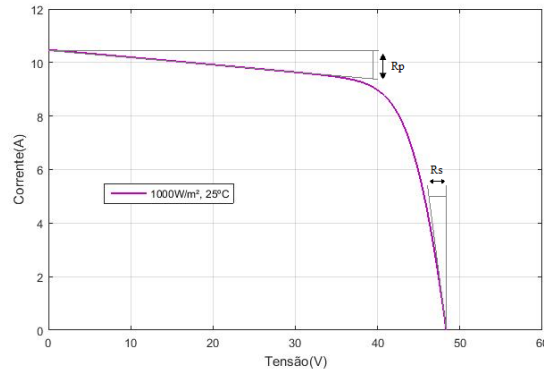
### 3.1.2.2 Método da derivada

A extração dos parâmetros  $R_s$  e  $R_p$  pode ser feita através da inclinação da curva disponibilizada pelos fabricantes como visto na seção 2.7.1.2. a resistência paralela  $R_p$  é dada pela equação 3.24.

Entretanto, dificilmente esses dados são disponibilizados em formato *xls* ou similar, sendo necessário recorrer a técnicas de processamento de imagens para possibilitar a extração destes dados de uma imagem digitalizada das curvas I-V. A figura 3.5 mostra como é possível estimar  $R_s$  por este método. (VIDAL, 2013; BUHLLER, 2011).

$$R_p = \frac{-dV}{dI_{cellsc}} - \frac{V_T}{I_{sc}} \quad (3.24)$$

Figura 3.5 – Extração dos parâmetros  $R_s$  e  $R_s$  pelo método da derivada através da curva experimental.



Fonte: Adaptado de COFTAS, 2008.

Segundo Carvalho (2014), este método possui uma precisão razoável, fornecendo uma aproximação de  $R_s$  melhor que alguns métodos disponíveis na literatura. Vidal et al.(2013) e Siddique(2017) utilizaram o método da derivada obtendo uma excelente correspondência com a curva disponibilizada pelo fabricante. Já Bueno (2016) não conseguiu bons resultados estimando a resistência série por este método, obtendo resultados consideravelmente divergentes ao esperado.

### 3.1.2.3 Método Iterativo

Como já foi abordado, o ponto de operação  $I_{sc}$ , a corrente  $I_{pv}$  é bem próxima de  $I_{sc}$ . Desta forma:

$$I_{pv} = I_{sc} \quad (3.25)$$

As correntes  $I_{pv}$  para uma determinada temperatura( $T$ ), de saturação  $I_0$  e de saturação nominal  $I_{0STC}$  são dadas pelas equações 2.6, 2.7 e 2.8 respectivamente.

A corrente  $I_{sc}$  e a tensão  $V_{oc}$ , correspondem aos valores nominais e podem ser obtidas através do *datasheet* fornecido pelo fabricante. O valor da energia de GAP  $E_g$  e o fator de idealidade do diodo ( $n$ ) podem ser obtidos consultando à literatura para células de silício policristalino. A corrente  $I_{0STC}$  pode ser calculada utilizando os parâmetros STC disponibilizados pelo fabricante.

Após realizar as considerações sobre  $E_g$  e  $n$  e calcular os demais parâmetros para as condições STC, resta determinar  $R_s$  e  $R_p$ . Uma primeira observação que deve ser considerada para determinar estes parâmetros é o fato de que só existe um par de  $R_s$  e  $R_p$  que fazem com que a  $P_{máx,m}$  calculada seja igual a  $P_{máx,e}$  obtida no ponto  $(V_{mp}, I_{mp})$  da curva I-V, dada pelo

produto  $V_{mp}I_{mp}$ . Desta forma, este método propõe corresponder o valor da potência calculada  $P_{máx,m}$  com a potência experimental  $P_{máx,e}$  por meio do aumento iterativo de  $R_s$  e calculando simultaneamente o valor de  $R_p$ . (SANTOS, 2011; NASSAR-EDDINE et al, 2016; LEAL NETO, 2016).

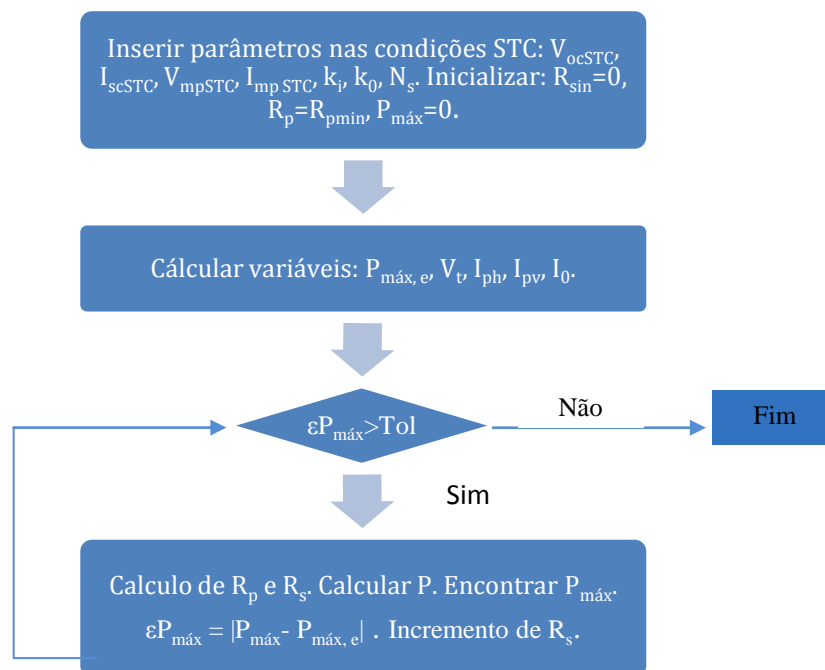
$$P_{máx,m} = P_{máx,e} = V_{mp} \left( I_{pv} - I_0 \left( e^{\frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{nN_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{R_p} \right) \quad (3.26)$$

Onde  $R_p$  é dada pela equação (3.27):

$$R_p = \frac{(V_{mp}+R_s I_{mp})V_{mp}}{V_{mp}I_{pv} - V_{mp}I_{0STC} \left( e^{\frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{nN_s V_t}} \right) + V_{mp}I_{0STC} - P_{máx,e}} \quad (3.27)$$

Desta forma, para cada valor de  $R_s$  existe um  $R_p$  que faça com que as curvas I-V se cruzem no ponto  $P_{máx,e}$ . Assim o método consiste em encontrar valores de  $R_s$  e  $R_p$  que satisfaçam essa coincidência. O processo iterativo termina quando o valor de  $P_{máx,m}$  se aproxima ao  $P_{máx,e}$ , considerando um erro previamente definido. O fluxograma do processo está representado na figura 3.6.

Figura 3.6-Fluxograma do processo iterativo.



Fonte: Adaptado de Nassar-Eddine et al (2016).

Este método foi utilizado nos trabalhos desenvolvidos por Santos (2011) e Yusuf e Ali (2017) e forneceu uma excelente correspondência com as curvas do fabricante.

### 3.2 Características do módulo fotovoltaico

Para realizar a avaliação foi escolhido o módulo de modelo MAXPOWER (CS6U) do fabricante Canadian Solar, composto por 72 células de silício policristalino conectadas em série. Pelas informações do *datasheet* disponibilizado pela fabricante, o módulo apresenta uma potência máxima para as condições padrão de teste (STC) de 330 W e uma eficiência de 17,23%. A temperatura nominal de operação do módulo é 43°C variando  $\pm 2^\circ$ . O fabricante também fornece as características sob temperatura nominal de operação do módulo (NMOT), com radiação de 800W/m<sup>2</sup> e temperatura ambiente de 20°C. A tabela 3.1 contém as especificações do módulo.

Tabela 3.1- Características STC e NMOT do módulo CS6U-Canadian Solar.

Parâmetro	Variável	Grandeza STC	Grandeza NMOT
Potência máxima	$P_{m\acute{a}x}$ (W)	330	243
Tensão em MP	$V_{mp}$ (V)	37,20	34,20
Corrente em MP	$I_{mp}$ (A)	8.88	7,10
Tensão de circuito aberto	$V_{oc}$ (V)	45,60	42,50
Corrente de curto circuito	$I_{sc}$ (A)	9,45	7,63
Coeficiente de temperatura de $I_{sc}$	$k_i$ (A/°C)	0,0005	0,0005
Coeficiente de temperatura de $V_{oc}$	$k_v$ (V/°C)	-0,0031	-0,0031
Fator de forma (calculado)	FF(%)	76,66	74,88

Fonte: *Datasheet* do fabricante.

### 3.3 Considerações

Geralmente os fabricantes de módulos fotovoltaicos não fornecem todos os parâmetros do equipamento necessários para o desenvolvimento de modelagem dos módulos, sendo preciso realizar algumas considerações baseadas na literatura com o objetivo de simplificação de cálculo.

O fator de idealização do diodo ( $n$ ) apresenta valores maiores que 1 para modelos de um diodo, sendo  $n=1$  o valor desse parâmetro para um diodo ideal (Bueno, 2016). Roy (2014) estimou que para as tecnologias de silício monocristalino e policristalino, o fator  $n$  é

1,25 e 1,71, respectivamente. Na literatura foram encontrados outros valores para este parâmetro e para o parâmetro  $E_g$ , conforme consta na Tabela 3.2.

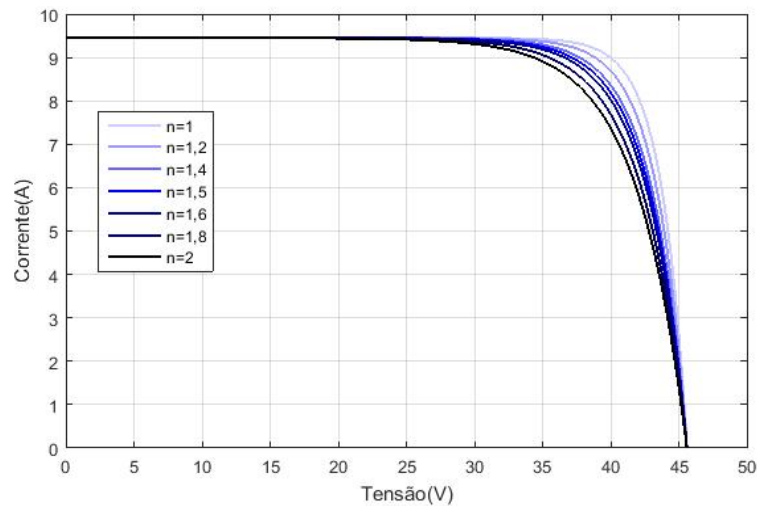
Tabela 3.2- Energia de banda de valência e fator de idealidade para diferentes tipos de células solares.

<b>Tipo de célula Solar</b>	<b><math>E_g</math>(eV)</b>	<b>n (TSAI, 2008)</b>	<b>n (MEYER, 2017)</b>	<b>Partain (1995) apud Albuquerque(2017)</b>
Mono-Si	1,12	1,2	1,19	1,026
Poly-Si	1,14	1,3	1,15	1,025
a-Si:H	1,65	1,8	1,71	1,8
a-Si:H tandem	2,9	3,3	-	3,3
a-Si:H triple	1,6	5	-	3,09
CdTe	1,48	1,5	-	1,5
CIS	1	1,5	1,38	1,5
AsGa	1,43	1,3	-	1,3

Fonte: adaptado de Tsai (2008), Hsiao et al. (2010) apud Santos (2011), Meyer (2017), Albuquerque (2017).

Embora a literatura apresente alguns valores para o fator de idealidade, segundo Hashim e Khazaal (2017) para módulos de silício assume-se geralmente um valor médio de 1,3 para esse parâmetro, que é o mesmo valor fornecido por Tsai (2008) para células de silício policristalino, mesma tecnologia do módulo em estudo. A figura 3.7 mostra como a curva I-V e consequentemente o desempenho de um módulo são afetados pelo fator de idealidade do diodo. (CHENCHE, 2015). Desta forma, considerou-se que esse valor para implementar os modelos no *software* Matlab.

Figura 3.7-Influência do fator de idealidade na curva característica I-V.



Fonte: Autora.

### 3.4 Modelagem dos módulos.

Foram selecionados dois modelos elétricos, o de uma resistência e o de duas resistências, ambos considerando uma resistência em série que representa a resistência interna do próprio material semiconductor e perdas devido ao contato entre o material e os contatos metálicos. Foi utilizado ainda o modelo ideal, que desconsidera as perdas para fins de comparação.

Costa (2010) realizou uma comparação entre o modelo de dois diodos e o modelo de 5 parâmetros, encontrando erros da ordem de 0,03%, ou seja, os resultados obtidos utilizando estes dois modelos apresentam erros que podem ser considerados desprezíveis. Além disso, a implementação do método implica um maior esforço computacional. Desta forma, optou-se por não utilizar o modelo de dois diodos e duas resistências na análise.

#### 3.4.1 Implementação em MATLAB

Os modelos elétricos ideais, de um diodo e uma resistência série e de um diodo e uma resistência série e paralelo foram implementados no software MATLAB<sup>TM</sup>, baseando-se nas equações mostradas na seção 2.5. A equação característica destes modelos é transcendente, ou seja, da forma:  $I = f(I, V)$ , sendo necessário recorrer à métodos numéricos para sua solução. Desta forma, para ajustar a curva a partir dos parâmetros considerados e extraídos, foi utilizado o método de Newton-Raphson, cuja implementação é baseada na equação 3.28.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I_n)}{f'(I_n)} \quad (3.28)$$

Onde:

$f'(I_n)$ : é a derivada da função  $f(I_n)$ ;

$I_{n+1}$ : valor de corrente a ser encontrado;

$I_n$ : valor atual da corrente.

$f(I_n)$  : equação do modelo

- Para o modelo ideal:

$$f(I_n) = I_{ph} - I - I_0 \left( e^{\frac{V}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.29)$$

- Para o modelo de uma resistência série:

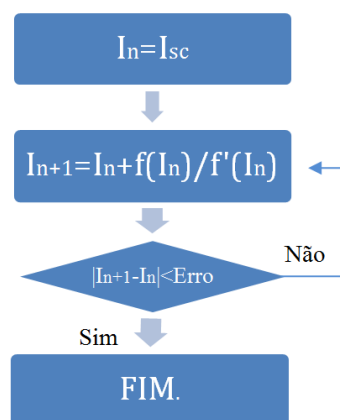
$$f(I_n) = I_{ph} - I - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.30)$$

- Para o modelo de um diodo e uma resistência série e paralelo:

$$f(I_n) = I_{ph} - I - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right) - \left( V + \frac{IR_s}{R_p} \right) \quad (3.31)$$

Inicialmente estima-se que  $I_{sc}$  seja a raiz. O valor encontrado será o valor inicial da próxima iteração e assim sucessivamente, até que a tangente que corta o eixo X esteja bem próximo de I calculado, considerando um erro escolhido arbitrariamente. Um fluxograma resumido do processo é mostrado na figura 3.8.

Figura 3.8-Fluxograma Método de Newton-Raphson.



Fonte: Adaptado de Santos, 2011.



O programa calcula a respectiva corrente  $I$ , de acordo com o modelo, utilizando as informações da tabela 3.1 para as condições STC de temperatura ( $25^{\circ}\text{C}$ ) e irradiação ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ). Foram ainda consideradas outras condições de temperatura e radiação, levando em conta a devida influência que estes fatores têm sobre os parâmetros de resistência com a finalidade de reduzir os erros. Foi utilizado o método que apresentou os melhores resultados dentre os métodos analisados por Hibrahim e Anani (2017). Os autores concluíram que as variações da resistência série com a temperatura e radiação são desprezíveis, enquanto considera-se que a resistência paralela sofre influência significativa apenas pela radiação solar conforme a equação 3.32.

$$R_{p(G)} = \frac{G_{ref}}{G} R_{pSTC} \quad (3.32)$$

Onde:

$R_{p(G)}$ : resistência de acordo com a radiação;

$G$ : radiação solar incidente;

$R_{pSTC}$ : resistência paralelo calculada para as condições STC.

Desta forma, foram plotadas as curvas:

- I-V para o modelo ideal, considerando  $n = 1,3$ , para temperaturas e radiações distintas;
- P-V para o modelo ideal, considerando  $n = 1,3$ , para temperaturas e radiações distintas;
- I-V para cada método/modelo, considerando as temperaturas  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$ ,  $65^{\circ}\text{C}$  e mantendo-se constante a radiação em  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ;
- I-V para cada método/modelo, considerando as radiações  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $800\text{W}/\text{m}^2$ ,  $600\text{W}/\text{m}^2$  e  $400\text{W}/\text{m}^2$  e mantendo-se constante a temperatura em  $25^{\circ}\text{C}$ ;

Com o objetivo de facilitar a visualização dos gráficos de comparação dos métodos, será utilizada a simbologia conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Simbologia dos métodos nas curvas e tabelas de comparação.

Modelo	Método	Método
--------	--------	--------

Modelo de uma resistência	Método Simp.	Simplificado
	Método Der.	Derivada
	Método Num.	Numérico
Modelo de duas resistência	Método Sol.	Solver do Excel
	Método Der.	Derivada
	Método Iter.	Iterativo

Fonte: Autora.

### 3.5 Análise dos resultados

As curvas I-V obtidas na caracterização podem ser comparadas com a curva experimental tanto qualitativamente (graficamente) quanto quantitativamente. O Matlab pode ser utilizado para realizar tais análises a fim de verificar quais métodos e modelos fornecem um melhor ajuste da curva.

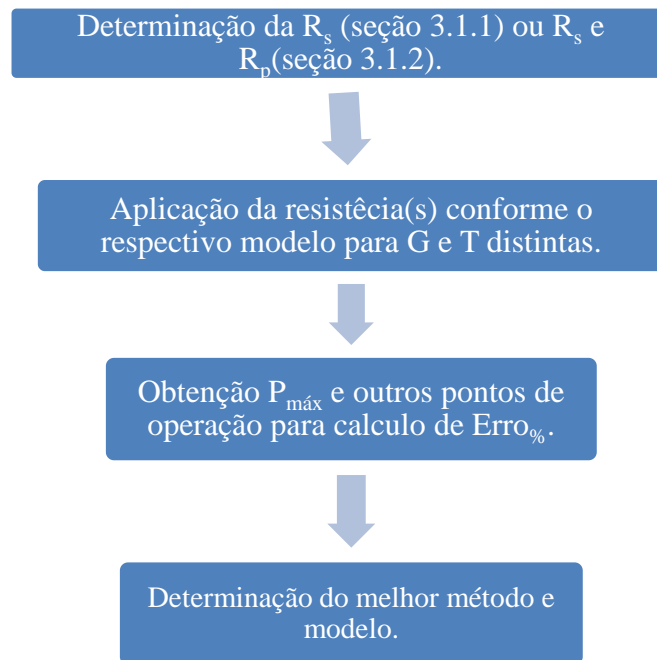
- Análise gráfica ou qualitativa: é feita uma comparação entre as curvas de forma a verificar as divergências uma em relação à outra, graficamente; trata-se de uma metodologia de análise mais abrangente e menos precisa, porém tem sua importância quanto à visualização das diferenças de comportamento entre a célula/módulo real e simulada, possibilitando a identificação de discrepâncias de modelagem, como as resistências.
- Análise quantitativa: verifica os desvios entre os valores experimentais e os obtidos pelos modelos matemáticos para pontos da curva I-V. Através desse método é possível verificar se a curva I-V foi bem simulada e com que grau de precisão. Para isso, são plotadas as curvas de erro da corrente gerada pelo modelo em relação à fornecida pelo fabricante. Os pontos principais da curva característica como  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{máx}$ ,  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$ , também são analisados sob este aspecto.

$$|Erro_{abs}| = |experimental - teórico| \quad (3.33)$$

$$Erro_{\%} = \frac{Erro_{abs}}{experimental} \times 100 \quad (3.34)$$

A figura 3.9 mostra o fluxograma da metodologia utilizada no presente trabalho.

Figura 3.9 – Fluxograma simplificado da metodologia utilizada no presente trabalho,



Fonte: própria.

## CAPÍTULO IV

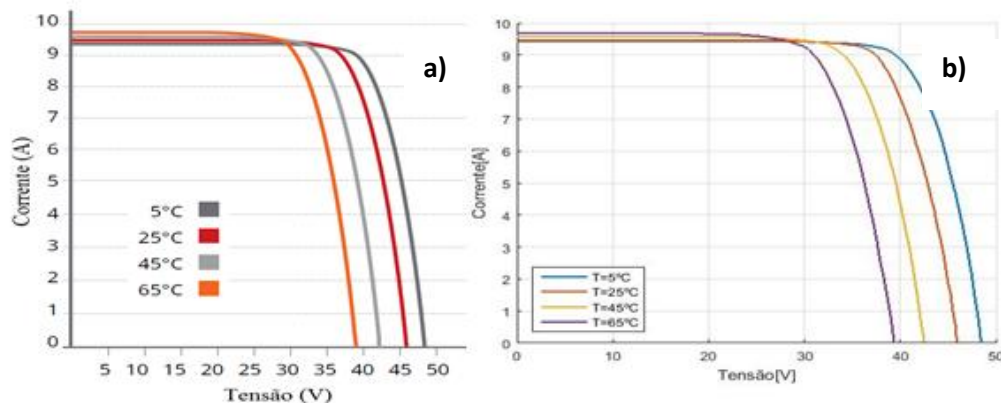
### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Resultado e Discussão

##### 4.1.1 Obtenção dos dados das curvas do datasheet

Para verificar qual dos métodos analisados representa melhor as perdas nos módulos, é necessário primeiramente obter os dados experimentais de tensão e corrente do equipamento. Os fabricantes geralmente fornecem esses dados por meio das curvas I-V do módulo para diferentes temperaturas e radiações, porém alguns os disponibilizam em formato *xls*. No *datasheet* do módulo em estudo, estas informações foram dadas através das curvas I-V gráficas, sendo necessário recorrer à técnicas de processamento de imagens para extrair os dados de corrente e tensão da imagem digitalizada fornecida pelo fabricante. Para este procedimento utilizou-se o *software* Automeris, no qual são inseridos os valores máximos dos eixos, criando uma relação entre estes valores e os pixels da imagem digitalizada, possibilitando obter valores amostrados da mesma. A Figura 4.1 mostra a imagem digitalizada do *datasheet* e a Figura 4.2 mostra as curvas plotadas em MATLAB<sup>TM</sup> obtidas a partir do Automeris, ambas para condições distintas de temperatura e radiação constante de 1000W/m<sup>2</sup>.

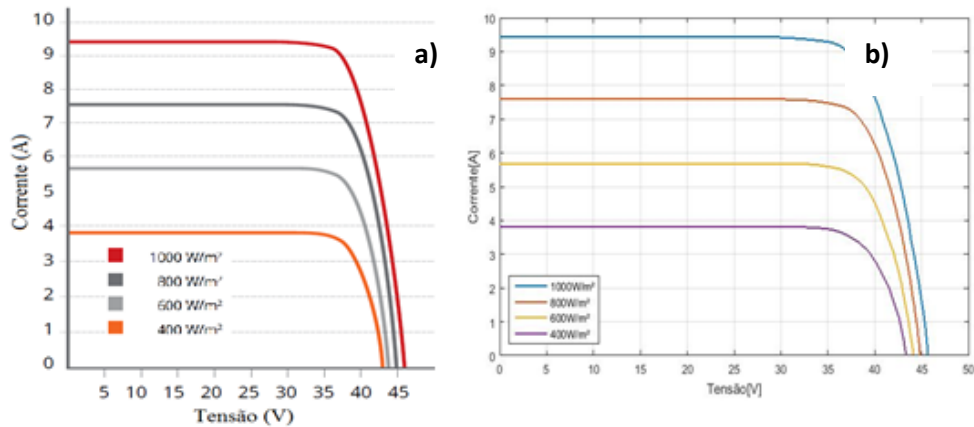
Figura 4.1 – (a) Imagem digitalizada das curvas considerando variação de temperatura. ( b) Curvas geradas em MATLAB considerando variação de temperatura.



Fonte: Autora.

O mesmo procedimento foi feito para as imagens das curvas de diferentes radiações, mantendo-se a temperatura constante a 25°C. A Figura 4.2 (b) mostra as curvas plotadas em MATLAB a partir dos dados extraídos pelo software.

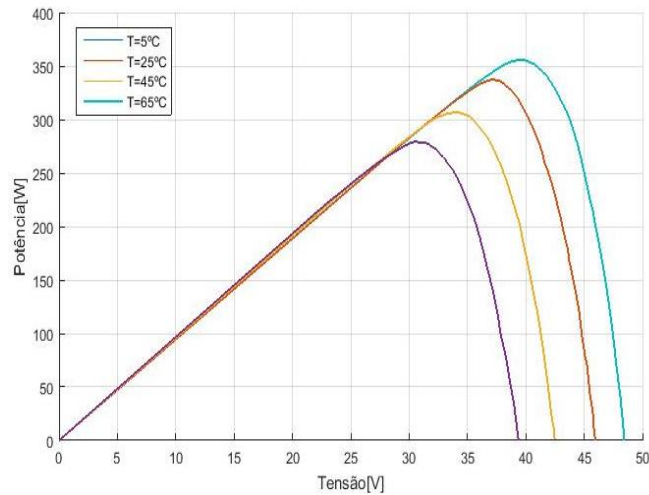
Figura 4.2 – (a) Curvas geradas em MATLAB considerando variação de temperatura. (b) Curvas geradas em MATLAB™ para radiações distintas.



Fonte: Autora.

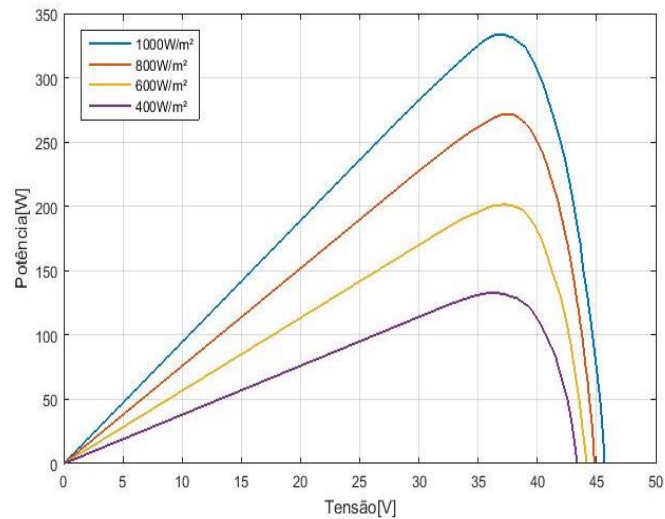
A partir dos dados extraídos com o Automeris, foram plotadas as curvas P-V para diferentes temperaturas e radiação constante em 1000 W/m<sup>2</sup>, mostrada na figura 4.5, e as curvas P-V para diferentes radiações e temperatura fixa em 25°C, mostradas na figura 4.4.

Figura 4.3- Curva P-V do módulo MAXPOWER (CS6U) da Canadian Solar para diferentes temperaturas.



Fonte: Autora.

Figura 4.4 - Curva P-V do módulo MAXPOWER (CS6U) da Canadian Solar para diferentes radiações

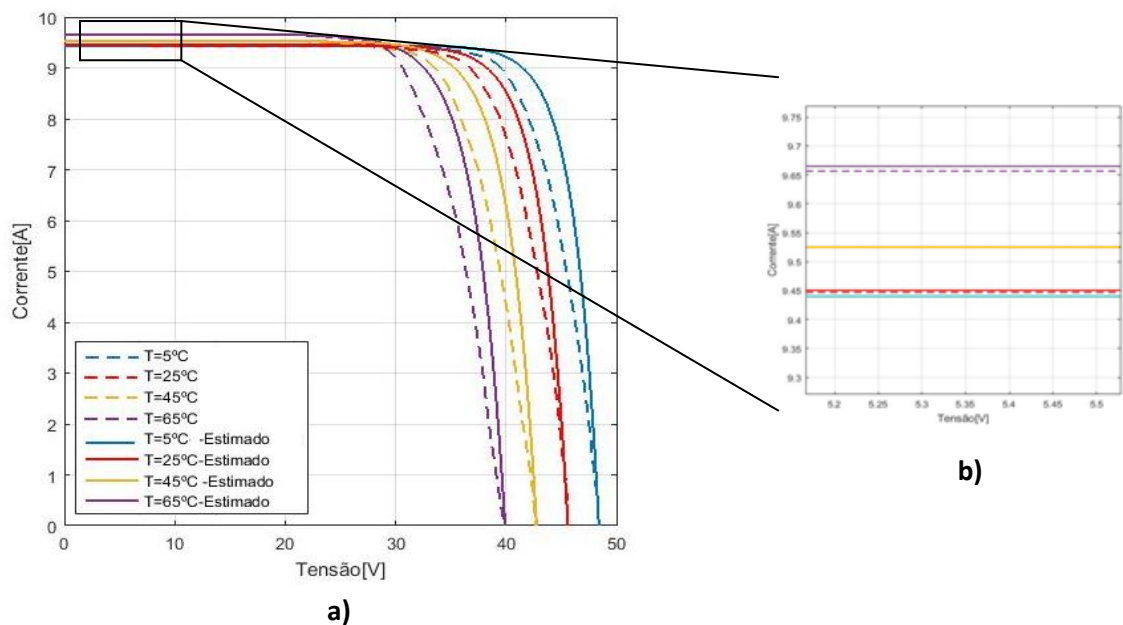


Fonte: Autora.

#### 4.1.2 *Análise do Modelo Ideal*

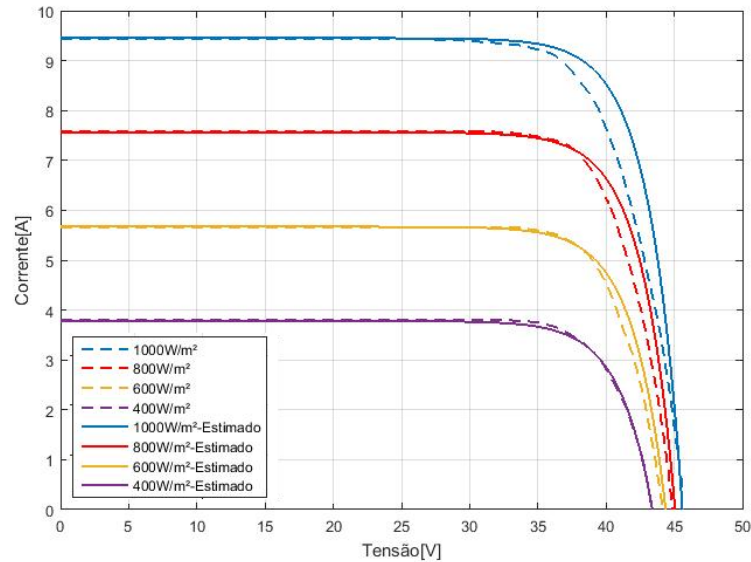
As perdas representadas pela resistência série  $R_s$  afetam a eficiência de conversão e o fator de forma dos módulos, pois tais características de desempenho dependem diretamente da corrente de curto circuito e esta por sua vez é influenciada pela magnitude da resistência série. Quanto maior a resistência série  $R_s$ , menor é a corrente  $I_{sc}$ , logo menor será a eficiência do módulo. Desta forma, é importante o conhecimento de  $R_s$ . Foram plotadas as curvas I-V ideais, considerando um fator de idealidade do diodo de 1,3 e desconsiderando-se as perdas ( $R_s$  e  $R_p$ ), juntamente com as curvas do fabricante obtidas na seção anterior para distintas temperaturas e radiações. Os gráficos estão representados nas figuras 4.5 e 4.6.

Figura 4.5- Curvas I-V ideal e fornecida pelo fabricante, considerando temperaturas distintas



Fonte: Autora.

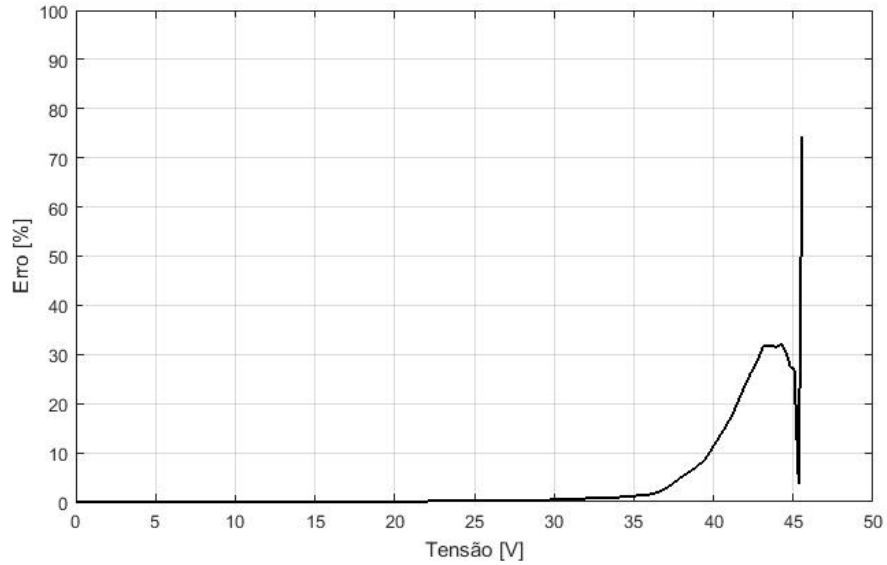
Figura 4.6- Curvas I-V ideal e fornecida pelo fabricante, considerando radiações distintas .



Fonte: Autora.

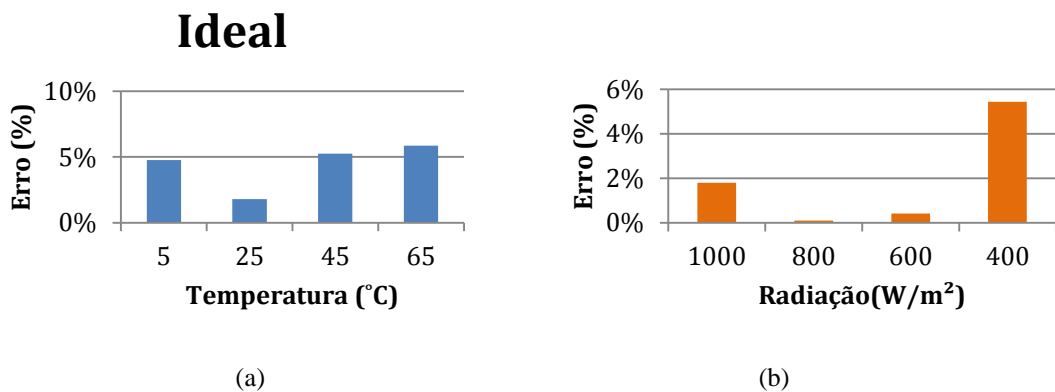
As divergências entre as correntes de curto circuito  $I_{sc}$  geradas pelo modelo ideal e pelos dados do fabricante podem ser observadas de forma mais detalhada na Figura 4.5 b), para diferentes temperaturas. Essa desigualdade deve-se a ausência de perdas representadas pela resistência série no modelo ideal. Também nota-se na Figura 4.5 a) a discrepância entre a tensão de circuito aberto fornecida pelo modelo ideal e a tensão do fornecedor, essa desigualdade deve-se à ausência da resistência série no modelo. Já na Figura 4.6 nota-se uma boa correspondência de  $I_{sc}$  para diferentes níveis de radiação, entretanto observam-se diferenças na região onde a tensão tende a  $V_{oc}$ . As figuras 4.7 e 4.8 mostram o erro relativo da corrente gerada pelo modelo em relação aos valores do fabricante e os erros relativos no ponto de inflexão da curva I-V para temperaturas e radiações distintas, respectivamente.

Figur 4.7- Erro relativo da corrente gerada pelo modelo em relação corrente do fabricante para as condições STC.



Fonte: Autora.

Figur 4.8- Erro % do modelo ideal no ponto de inflexão da curva para diferentes temperaturas e radiações.



Fonte: Autora.

É possível perceber que o modelo ideal tem maior erro no ponto de inflexão da curva em 65°C e 400 W/m<sup>2</sup> de radiação.

A seguir uma análise dos métodos de obtenção de resistências será realizada considerando o modelo de um diodo e uma resistência e o modelo de um diodo e duas resistências. Vale salientar que os métodos diferem para cada módulo.



### 4.1.3 *Estimação de Resistências*

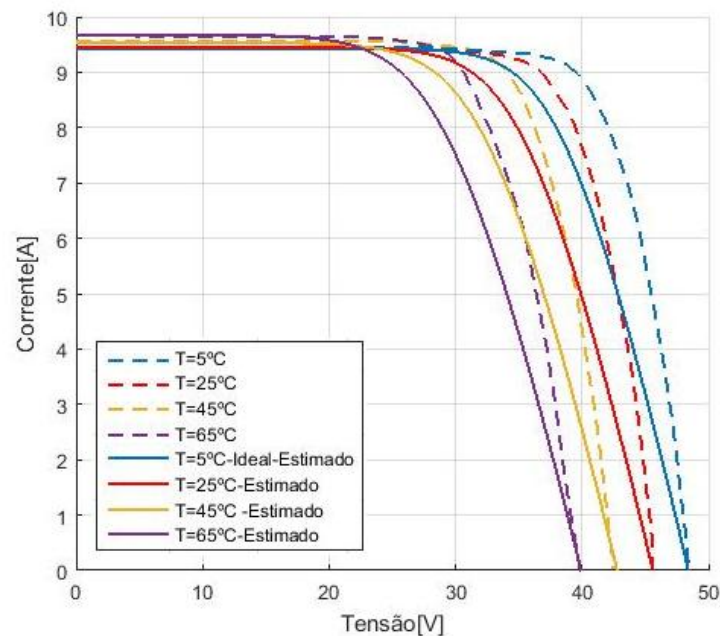
#### 4.1.3.1 *Modelo de uma resistência*

Entre os métodos de obtenção da resistência série  $R_s$  encontradas na literatura, foram escolhidos três dos métodos mais utilizados para calcular  $R_s$  para o modelo de um diodo e uma resistência. Os métodos escolhidos foram o Método simplificado, o Método Numérico e o Método da derivada, sendo este último também aplicável para determinar a resistência em paralelo no modelo de um diodo e duas resistências.

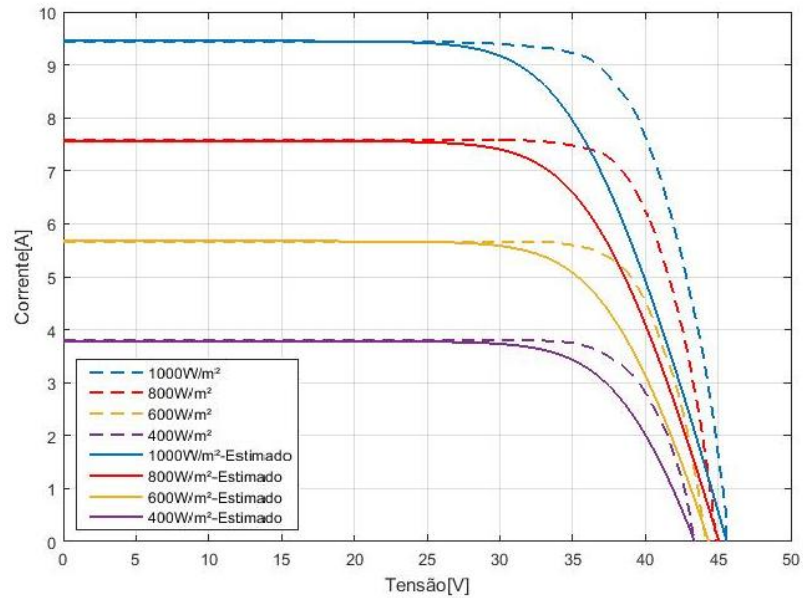
#### 4.1.3.2 *Método Simplificado*

Para estimar os parâmetros de resistência pelo método analítico, foram utilizadas as equações (3.2) a (3.8), utilizando apenas os dados dos pontos principais de operação do módulo. A partir disso, foi obtida uma resistência série  $R_s$  de  $0,777 \Omega$ . Foram plotadas as curvas I-V para distintas temperaturas e radiações e a curva de erro relativo entre a curva obtida pelo conjunto modelo/método e a curva do fabricante, mostradas as Figuras 4.09 e 4.10, respectivamente.

Figura 4.9 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação pelo método simplificado



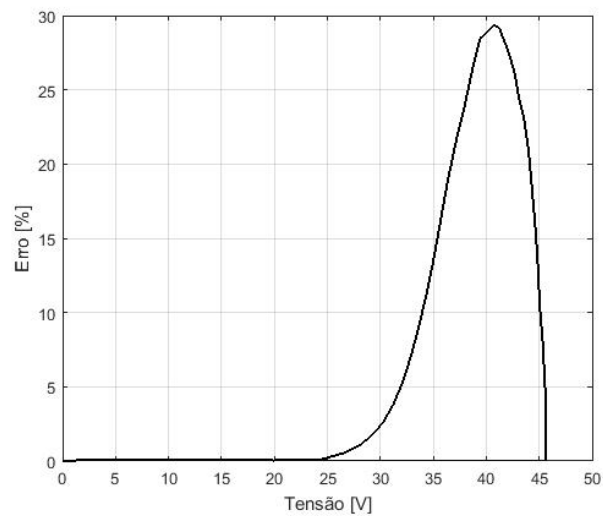
(a)



(b)

Fonte: Autora.

4.10. Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação simplificado.



Fonte: Autora.

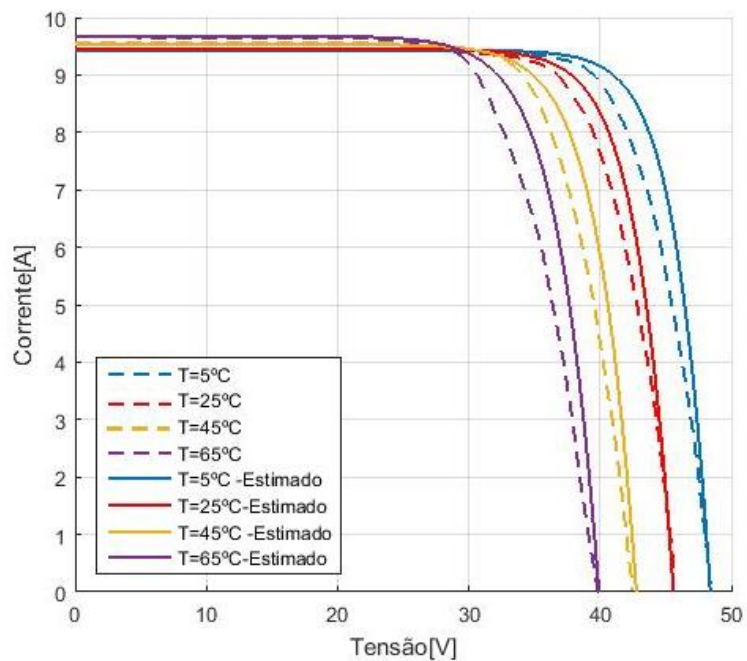
Analisando as curvas da Figura 4.10 nota-se que este método apresenta uma discrepância bastante significativa das curvas características do datasheet. Na seção 2.6, foi explicada a influência de uma maior resistência série na curva característica do módulo, tal influência pode ser verificada na Figura 2.19. Desta forma, conclui-se que a representação significativamente discrepante que este método reproduziu deve-se ao fato de que o valor da

resistência que fornecerá uma melhor correspondência com a curva real tem um valor menor do que a estimada por este método.

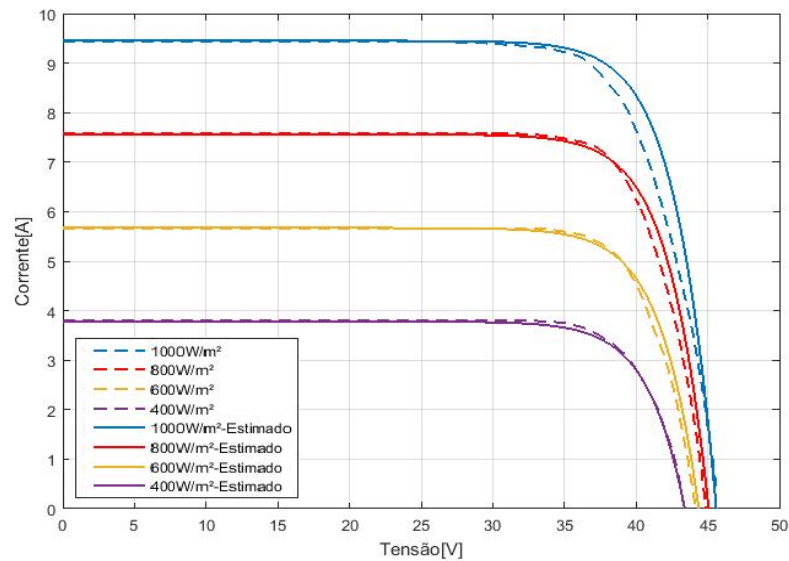
#### 4.1.3.3 Método da Derivada

Para estimar os parâmetros de resistência pelo método da derivada, foram utilizadas a curva característica nas condições STC e as equações (3.9) e (3.10), obtendo uma resistência série de  $0,053 \Omega$ . Foram plotadas as curvas I-V para este conjunto modelo/método para distintas temperaturas e radiações em comparação com as curvas disponibilizadas pelo fabricante e a curva de erro relativo da curva do fabricante com a curva obtida pelo conjunto modelo/método conforme as Figura 4.11 e 4.12, respectivamente.

Figura 4.11 Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimacão pelo método da derivada.



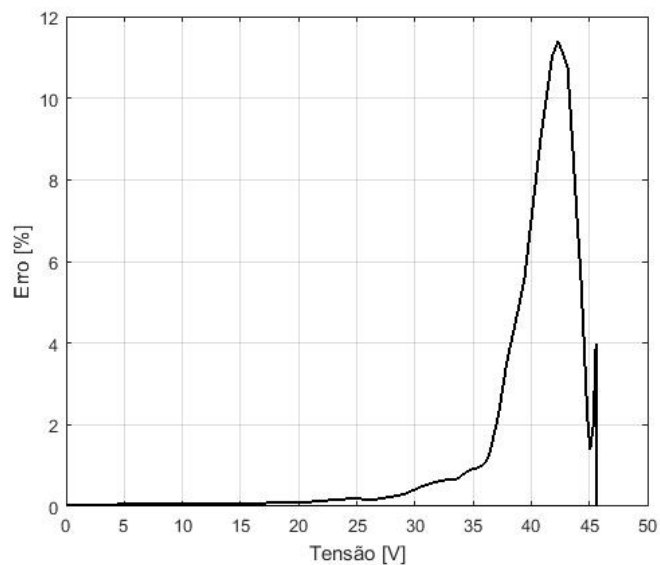
(a)



(b)

Fonte: Autora.

Figura 4.12. Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação derivada.



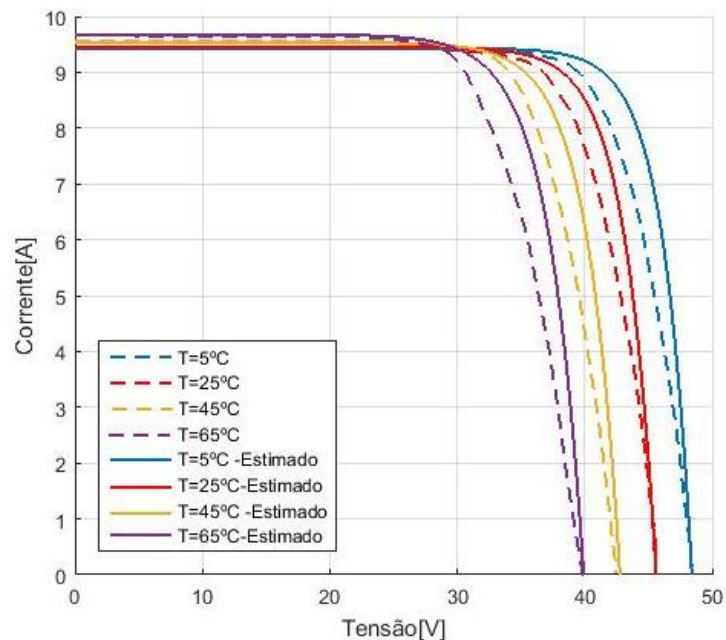
Fonte: Autora.

Observando as Figura 4.11 a) e b), pode-se constatar que o método resultou em uma melhor representação em comparação ao método simplificado para níveis de temperatura e radiação distintos. Entretanto, nota-se uma desigualdade para ambas as condições, principalmente na região onde a tensão tende a  $V_{oc}$ . Além disso nota-se que o valor da resistência estimada por este método, diferentemente do método anterior, está aquém do valor real desse parâmetro e por isso as curvas geradas pelo modelo mostram tal discrepância.

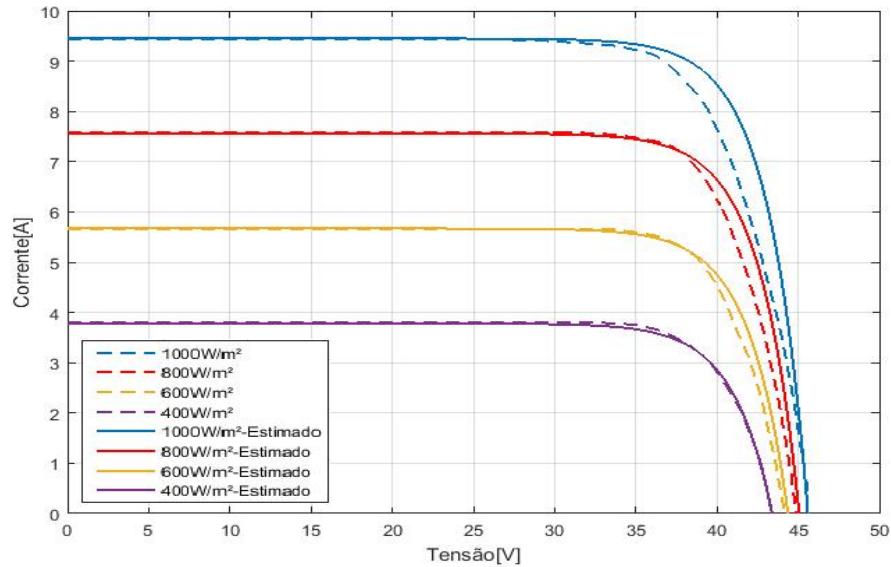
#### 4.1.3.4 Método IEC 60891

Utilizando o método da IEC 60892 estimou-se uma resistência série  $R_s$  de  $0,0043\Omega$ . Para a estimação foram utilizadas duas das curvas do fabricante, de radiações distintas e as equações (3.11) a (3.23). As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram a comparação entre as curvas obtidas utilizando o conjunto modelo/método com as curvas digitalizadas do fabricante e a curva de erro relativo da curva do fabricante com a curva obtida pelo método, respectivamente.

Figura 4.13- Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação pelo método da IEC(.60891).



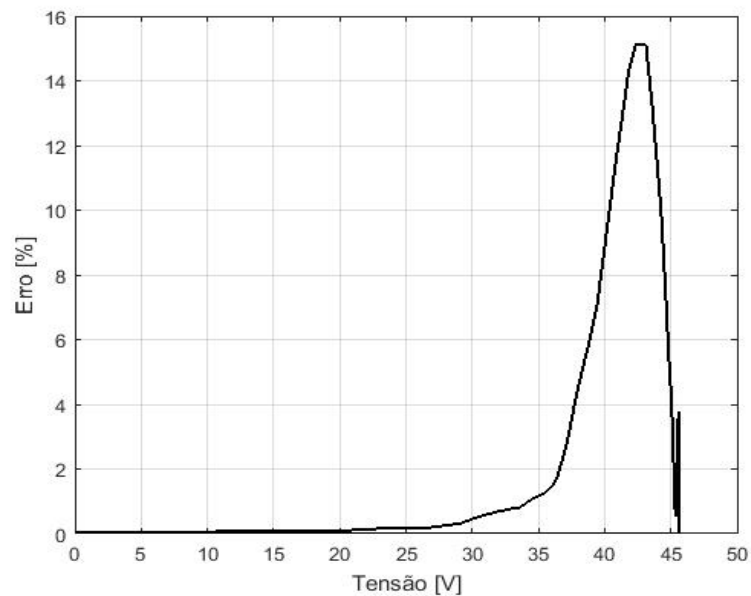
a)



b)

Fonte: Autora.

Figura 4.14 - Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação IEC60891.



Fonte: Autora.

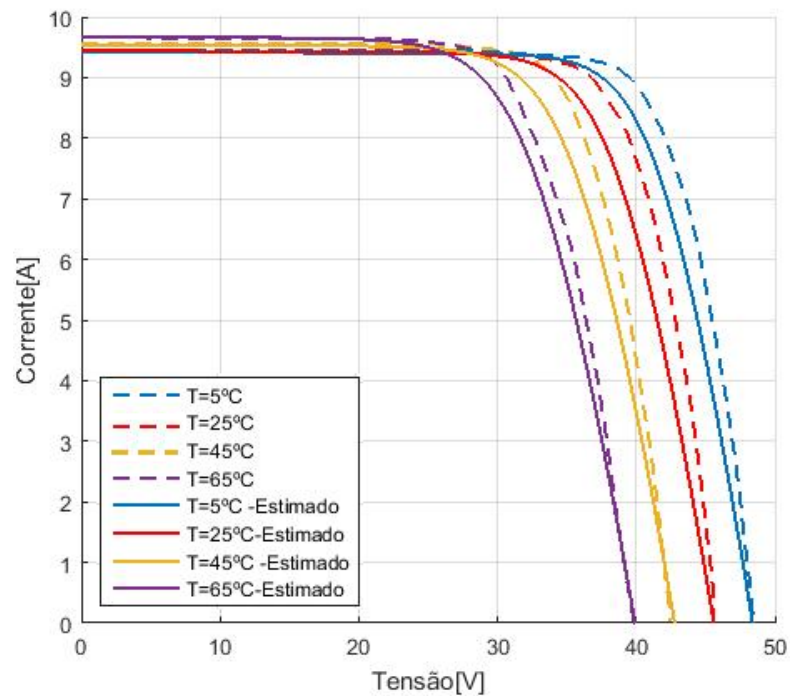
Na Figura 4.13 b) nota-se uma boa correspondência da região de  $I_{sc}$  com a curva do fabricante, principalmente para as menores radiações. Já para temperaturas distintas, conforme observado na Figura 4.13 a), ocorre discrepância na região de  $V_{oc}$ . Semelhantemente ao que foi constatado analisando qualitativamente (graficamente) o método da derivada, a resistência estimada pelo método da IEC 60891 fornece um valor de resistência inferior ao mais apropriado para o modelo matemático implementado.

#### 4.1.4 *Modelo de duas resistências*

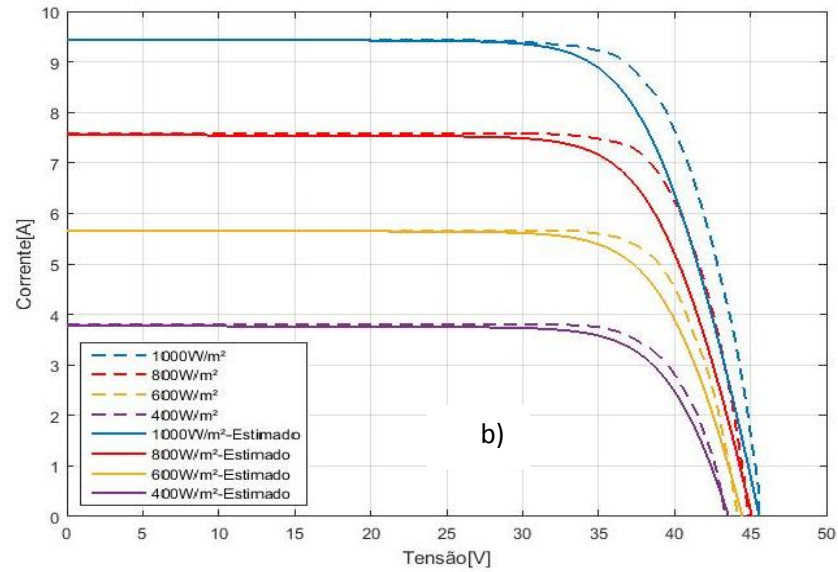
##### 4.1.4.1 *Solver Excel*

Para estimar os parâmetros de resistência utilizando o Solver do Excel não foram necessárias manipulações nas equações do modelo. Assim, foi utilizado apenas os dados das curvas do *datasheet* e os dados dos pontos principais de operação para aplicar nas equações (2.9) à (2.12). Estimou-se uma resistência série de  $0,48\Omega$  e uma resistência paralelo de  $1000\Omega$ . A Figura 4.15 compara as curvas obtidas utilizando o conjunto modelo/método com as curvas digitalizadas do fabricante. A Figura 4.16 mostra a curva de erro relativo da curva do fabricante com a curva obtida pelo conjunto modelo/método.

Figura 4.15 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimativa das resistências utilizando o Solver Excel.

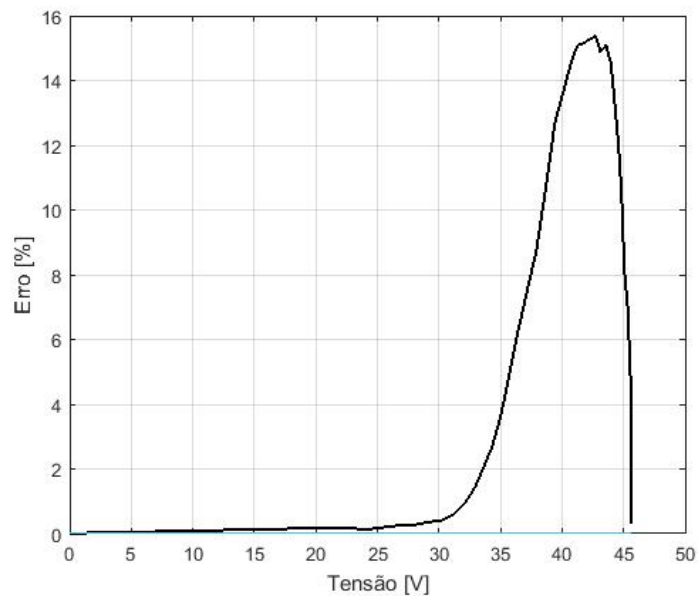


a)



Fonte: Autora.

Figura 4.16 - Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação Solver Excel.



Fonte: Autora.

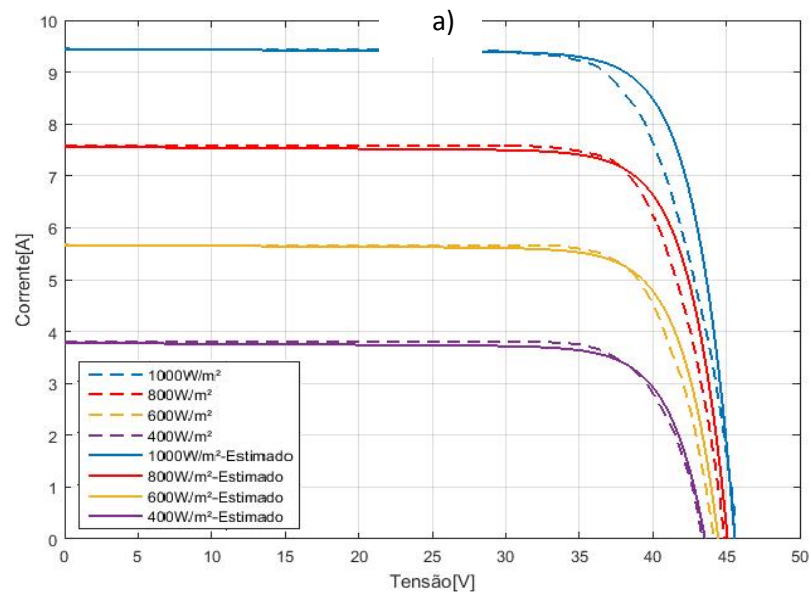
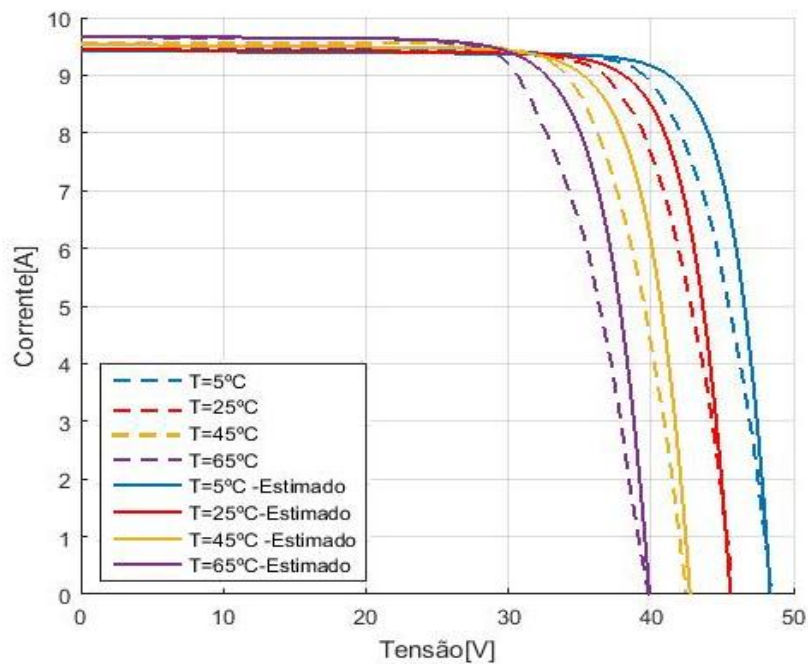
Nota-se, da Figura 4.15, que o método fornece uma boa correspondência com as curvas do fabricante para temperaturas distintas. Entretanto, observa-se uma discrepância mais acentuada na região do joelho da curva. Um fator que pode ter colaborado para a discrepância nessa região da curva é o fator de idealidade do diodo. Conforme a Figura 3.7 da seção 3.1., nota-se que este parâmetro influencia no ponto de inflexão da curva I-V, o que pode indicar que para este método apresentar êxito, o fator de idealidade deve ser inferior ao utilizado no modelo



#### 4.1.4.2 Método da Derivada

Utilizou-se os dados da curva do *datasheet* e a equação (2.42) para estimar a resistência paralela, obtendo um valor de resistência de  $558,82\Omega$ , enquanto a resistência série obtida foi de  $0,053\Omega$ . A Figura 4.17 compara as curvas obtidas utilizando o conjunto modelo/método com as curvas digitalizadas do fabricante. A Figura 4.18 mostra a curva de erro relativo entre a corrente gerada pelo conjunto modelo/método e corrente fornecida pelo fabricante.

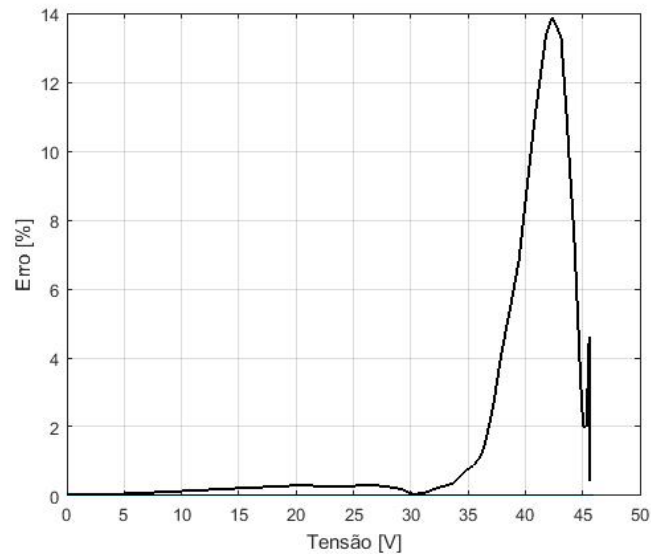
Figura 4.17 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação das resistências utilizando o método da derivada.



b)

Fonte: Autora.

Figura 4.18 - Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação da Derivada.



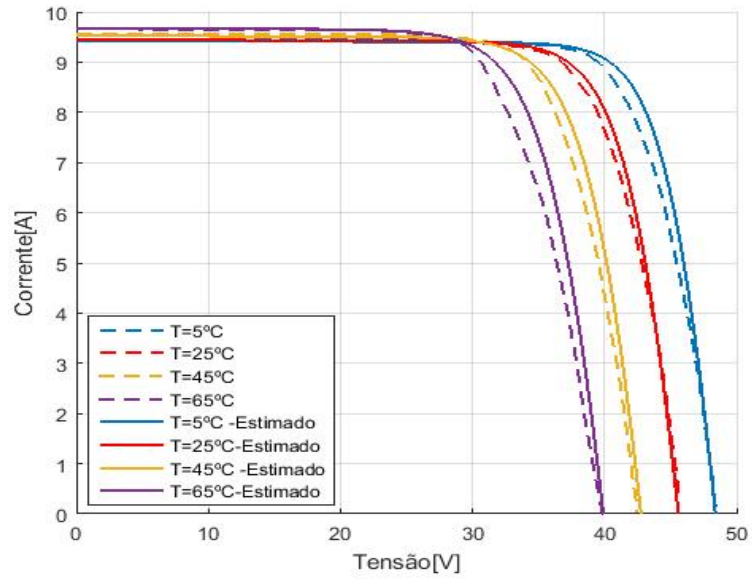
Fonte: Autora.

Através da Figura 4.17 b) nota-se que o método da derivada apresentou uma melhor aproximação para condições de variação de radiação que o método de estimação Solver Excel. Observa-se na Figura 4.17 a) a existência de discrepâncias na região em que a tensão tende a Voc em relação a curva do fabricante. Na figura 4.18 observa-se que o erro máximo da corrente foi de 14%.

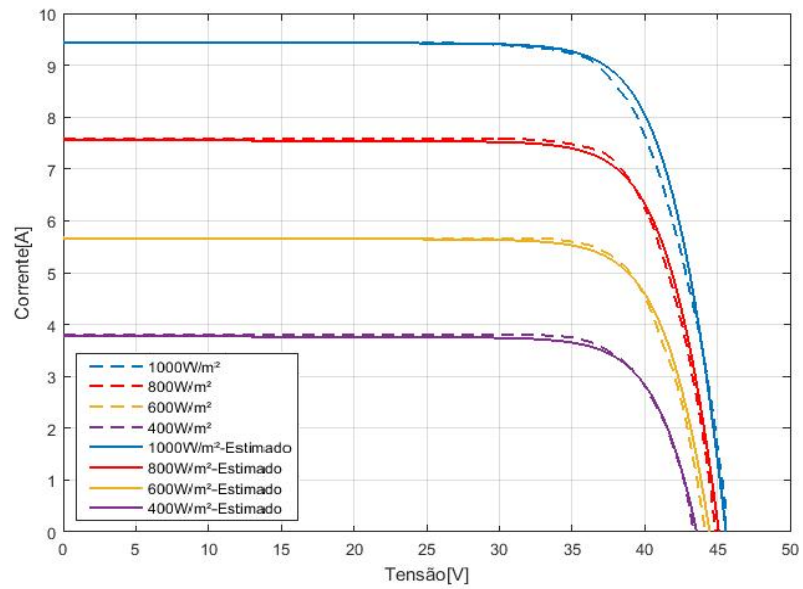
#### 4.1.4.3 Método Iterativo

Para estimar as resistências utilizando o método iterativo, utilizou-se o *software* Matlab para implementar a metodologia do fluxograma da figura 3.6. Obteve-se uma resistência série de  $0,17\Omega$  e uma resistência em paralelo de  $1101,915\Omega$ . A figura 4.19 compara as curvas obtidas utilizando o método com as curvas digitalizadas do MAXPOWER (CS6U). A figura 4.20 mostra o erro entre a corrente gerada pelo modelo e a da curva real do módulo.

Figura 4.19 - Comparação das curvas do módulo MAXPOWER (CS6U) com a estimação das resistências utilizando o método iterativo.



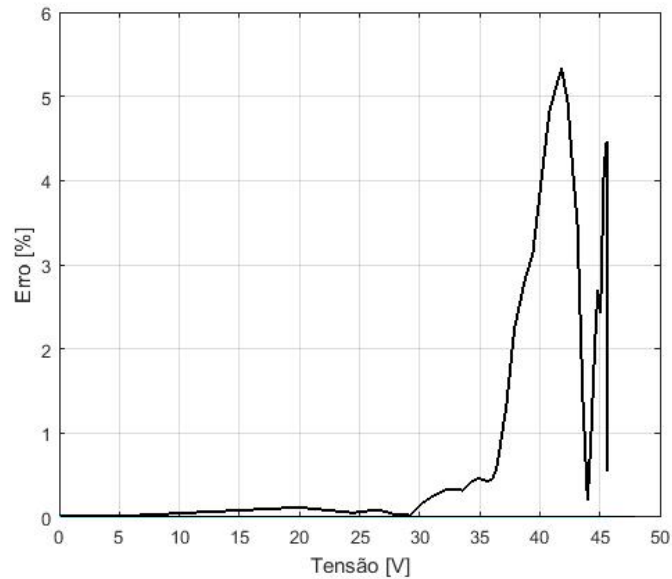
a)



b)

Fonte: Autora.

Figura 4.20 - Gráfico do erro relativo entre o a curva do módulo em estudo e o método de estimação Iterativo.



Fonte: Autora.

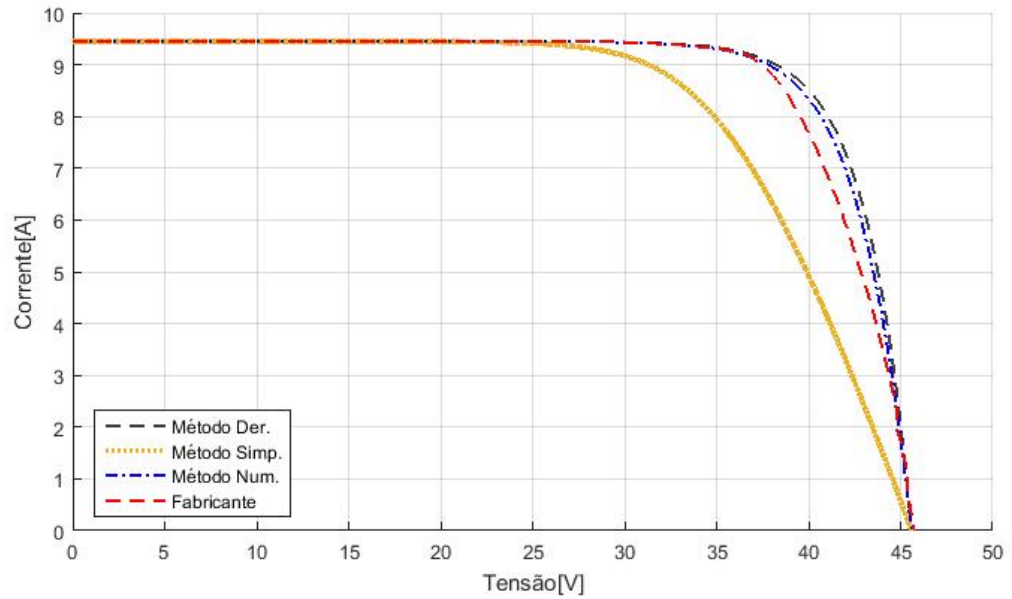
Percebe-se da Figura 4.19 que o método de estimação iterativo apresentou uma correspondência bastante satisfatória com as curvas do fabricante, principalmente para condições distintas de radiação, apresentado um erro máximo para as condições STC de menos de 6% com a curva real, conforme a Figura 4.20.

Em todos os métodos, o erro sofre um aumento considerável quando a tensão tende a Voc. Isso ocorre devido ao baixo valor da corrente fazendo com que qualquer variação nessa região resulte em um erro mais elevado.

#### 4.1.5 *Comparação entre os métodos e modelos*

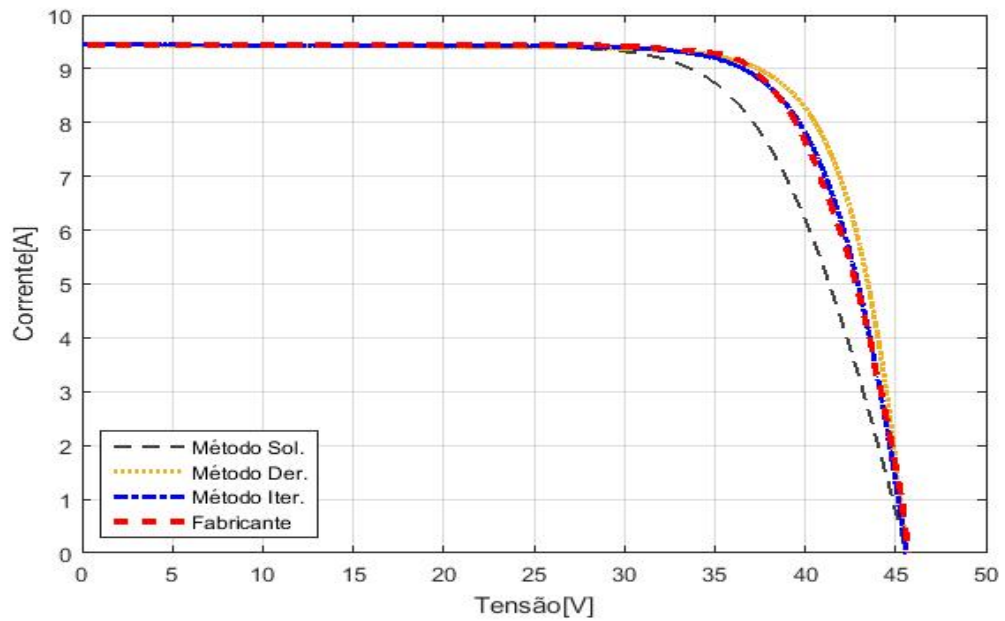
A figura 4.21 mostra uma comparação dos métodos de estimação de resistência para o modelo de um diodo e uma resistência série. Na figura 4.22 a comparação se dá entre os métodos do modelo de um diodo e uma resistência série e paralelo.

Figura 4.21 - Curvas I-V dos métodos do modelo de uma resistência e a curva característica do fabricante para as condições STC.



Fonte: Autora.

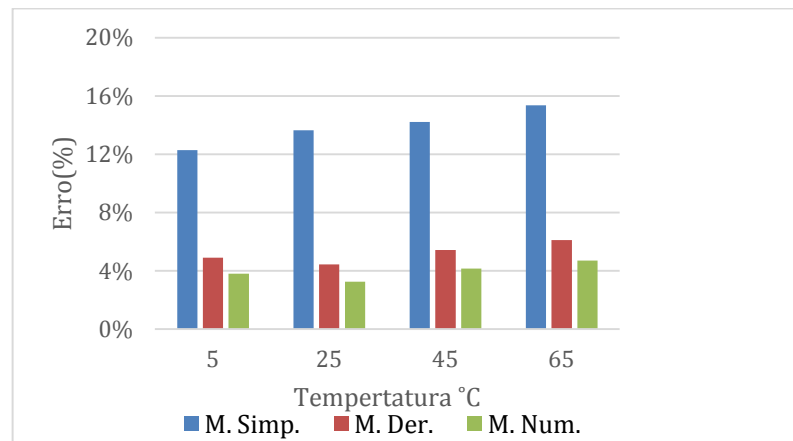
Figura 4.22 - Curvas I-V dos métodos do modelo de duas resistências e a curva característica do fabricante para as condições STC.



Fonte: Autora.

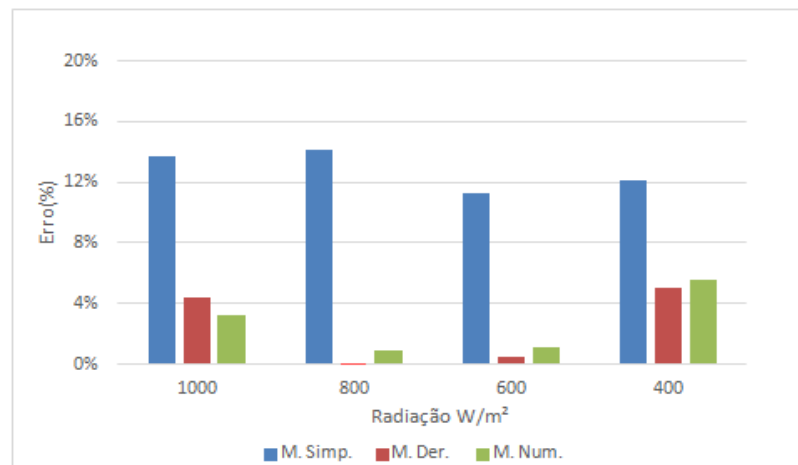
A figura 4.23 e 4.24 mostram os erros relativos referentes ao ponto de inflexão da curva característica I-V, correspondente a cada método aplicável ao modelo de uma resistência, para diferentes níveis de temperatura e radiação, respectivamente.

Figura 4.23- Erros dos métodos de estimação de resistência para diferentes temperaturas e radiação a 1000 W/m<sup>2</sup>.



Fonte: Autora.

Figura 4.24- Erros dos métodos de estimação de resistência para diferentes radiações e temperatura a 25°C

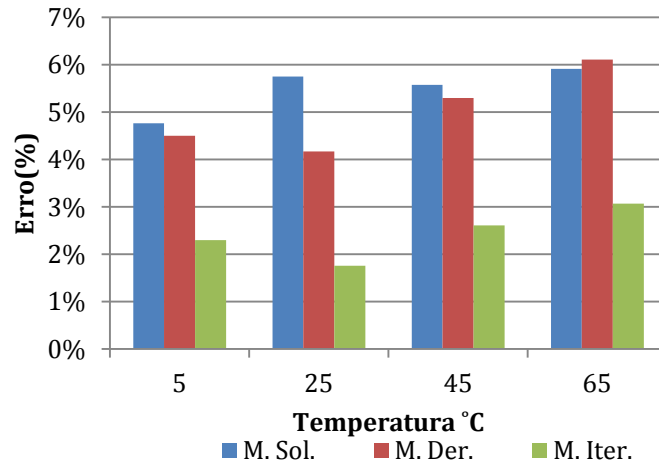


. Fonte: Autora.

Das Figuras 4.21, 4.23 e 4.24, observa-se que o método simplificado apresentou os erros mais elevados dentre os métodos aplicados ao modelo de uma resistência e portanto, para o módulo em estudo, não apresentou uma boa aproximação. Quanto aos outros métodos, da derivada e numérico, os erros ficaram abaixo de 8%.

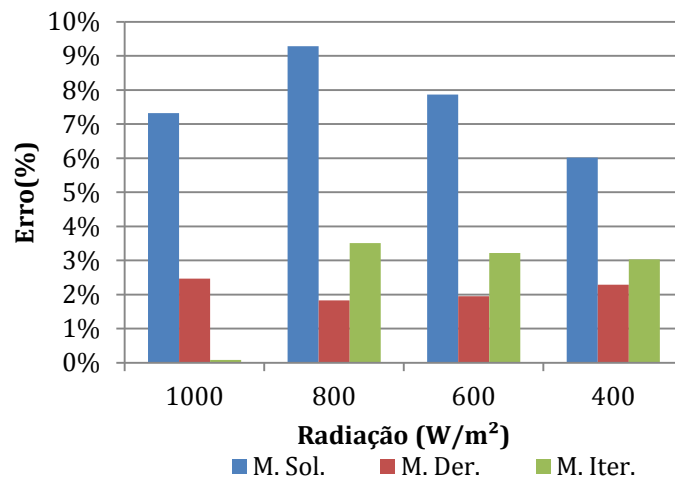
O mesmo procedimento foi feito para os métodos do modelo de um diodo e duas resistências. Os resultados são mostrados nas Figuras 4.25 e 4.26.

Figura 4.25- Erros dos métodos de estimação de resistência para diferentes temperaturas e radiação a 1000 W/m<sup>2</sup>.



. Fonte: Autora.

Figura 4.26- Erros dos métodos de estimação de resistência para diferentes radiações e temperatura a 25°C.



Fonte: Autora.

Das Figuras 4.22, 4.25 e 4.26 nota-se que os métodos do modelo de um diodo e duas resistências apresentaram um erro médio inferior aos métodos utilizados para o modelo de um diodo e uma resistência. Isso indica que este modelo descreve melhor o comportamento do módulo para as condições analisadas. O método da derivada demonstrou o menor erro para radiações distintas. Entretanto, o método que apresentou o menor erro médio para este modelo, foi o método iterativo, representando com mais precisão as características do módulo.

As tabelas 4.1 a 4.7 mostram os erros para os principais pontos da curva característica de cada conjunto método/modelo utilizado em relação a corrente do fabricante.

Tabela 4.1-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para as condições STC.

<b>Parâmetros</b>							
	Isc	Voc	P <sub>máx</sub>	V <sub>mp</sub>	Imp	FF	Erro
	[A]	[V]	[W]	[V]	[A]	%	médio
							[%]
<b>Fabricante</b>	9,45	45,60	330,00	37,20	8,88	76,58%	-
<b>Ideal</b>	9,45	44,60	336,06	38,00	8,84	79,73%	-
<b>Erro</b>	0,00%	2,19%	1,84%	2,15%	0,41%	4,12%	1,65%
<b>M. Simp.</b>	9,45	45,60	285,00	33,00	8,64	66,14%	-
<b>Erro</b>	0,00%	0,00%	13,64%	11,29%	2,74%	13,64%	6,88%
<b>M. Der.</b>	9,45	42,76	344,61	38,90	8,86	85,28%	-
<b>Erro</b>	0,00%	6,23%	4,43%	4,57%	0,24%	11,36%	4,47%
<b>M. Num.</b>	9,45	45,60	340,75	38,40	8,87	79,08%	-
<b>Erro</b>	0,00%	0,00%	3,26%	3,23%	0,07%	3,26%	1,64%
<b>M. Solver</b>	9,45	45,58	311,03	35,50	8,76	72,21%	-
<b>Erro</b>	0,00%	0,04%	5,75%	4,57%	1,34%	5,71%	2,90%
<b>M. Der.</b>	9,45	45,58	343,75	38,90	8,84	79,81%	-
<b>Erro</b>	0,01%	0,04%	4,17%	4,57%	0,49%	4,22%	2,25%
<b>M. Iter.</b>	9,45	45,59	335,81	37,90	8,86	77,95%	-
<b>Erro</b>	0,01%	0,02%	1,76%	1,88%	0,22%	1,79%	0,95%

Fonte: Autora.

Tabela 4.2-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 5°C e radiação 1000 W/m<sup>2</sup>.

<b>Parâmetros</b>							
	Isc	Voc	P <sub>máx</sub>	V <sub>mp</sub>	Imp [A]	FF [%]	Erro
	[A]	[V]	[W]	[V]			Médio
							[%]
<b>Fabricante</b>	9,44	48,42	355,6441	39,67	8,97	77,82%	-
<b>Ideal</b>	9,43	48,4	373,41	41,80	8,93	81,81%	-
<b>Erro</b>	0,10%	0,04%	5,00%	5,37%	0,36%	5,14%	2,67%
<b>M. Simp.</b>	9,43	48,40	312,00	35,90	8,69	68,36%	-
<b>Erro</b>	0,10%	0,04%	12,27%	9,50%	3,06%	12,15%	6,19%



<b>M. Der.</b>	9,43	48,40	373,07	41,70	8,95	81,74%	-
<b>Erro</b>	0,10%	0,04%	4,90%	5,12%	0,21%	5,04%	2,57%
<b>M. Num.</b>	9,43	48,40	369,18	41,40	8,92	80,89%	-
<b>Erro</b>	0,10%	0,04%	3,81%	4,36%	0,53%	3,95%	2,13%
<b>M. Solver</b>	9,43	48,39	338,70	38,30	8,84	74,22%	-
<b>Erro</b>	0,10%	0,06%	4,76%	3,45%	1,36%	4,61%	2,39%
<b>M. Der.</b>	9,43	48,35	371,65	41,80	8,89	81,52%	-
<b>Erro</b>	0,11%	0,14%	4,50%	5,37%	0,83%	4,76%	2,62%
<b>M. Iter.</b>	9,43	45,39	363,82	40,90	8,90	85,02%	-
<b>Erro</b>	0,12%	6,26%	2,30%	3,10%	0,78%	9,26%	3,63%

Fonte: Autora.

Tabela 4.3-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 45°C e radiação 1000 W/m<sup>2</sup>.

<b>Parâmetros</b>							
	Isc [A]	Voc [V]	Pmáx [W]	Vmp [V]	Imp [A]	FF [%]	Erro Médio [%]
<b>Fabricante</b>	9,53	42,72	301,87	33,98	8,88	74,18%	
<b>Ideal</b>	9,53	42,76	318,58	35,90	8,87	78,18%	
<b>Erro</b>	0,04%	0,10%	5,54%	5,64%	0,09%	5,39%	2,80%
<b>M. Simp.</b>	9,53	42,75	258,97	30,20	8,58	63,57%	-
<b>Erro</b>	0,04%	0,08%	14,21%	11,14%	3,46%	14,31%	7,21%
<b>M. Der.</b>	9,53	42,76	318,24	36,00	8,84	78,10%	-
<b>Erro</b>	0,04%	0,10%	5,42%	5,93%	0,48%	5,28%	2,87%
<b>M. Num.</b>	9,53	42,77	314,40	35,50	8,86	77,13%	-
<b>Erro</b>	0,04%	0,13%	4,15%	4,46%	0,30%	3,98%	2,17%
<b>M. Solver</b>	9,53	42,78	285,05	32,50	8,77	69,92%	-
<b>Erro</b>	0,04%	0,15%	5,57%	4,37%	1,26%	5,75%	2,86%
<b>M. Der.</b>	9,53	42,75	317,87	35,80	8,88	78,03%	-
<b>Erro</b>	0,03%	0,08%	5,30%	5,34%	0,04%	5,19%	2,66%
<b>M. Iter.</b>	9,53	42,74	309,74	35,00	8,85	76,05%	-
<b>Erro</b>	0,03%	0,06%	2,61%	2,99%	0,37%	2,52%	1,43%

Fonte: Autora.

Tabela 4.4 - Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação conforme o modelo utilizado para temperatura de 65°C e radiação 1000 W/m<sup>2</sup>.

Parâmetro							
	Isc [A]	Voc [V]	P <sub>máx</sub> [W]	V <sub>mp</sub> [V]	Imp [A]	FF [%]	Erro Médio [%]
<b>Fabricante</b>	9,66	39,42	276,85	30,43	9,17	72,71%	
<b>Ideal</b>	9,68	39,92	294,07	32,90	8,94	76,12%	
<b>Erro</b>	0,21%	1,26%	6,22%	8,10%	2,57%	4,68%	3,84%
<b>M. Simp.</b>	9,68	39,42	234,33	27,60	8,49	61,42%	-
<b>Erro</b>	0,21%	0,00%	15,36%	9,31%	7,45%	21,07%	8,90%
<b>M. Der.</b>	9,68	39,91	293,72	33,00	8,90	76,04%	-
<b>Erro</b>	0,21%	1,23%	6,09%	8,43%	2,98%	4,59%	3,92%
<b>M. Num.</b>	9,68	39,91	289,84	32,70	8,86	75,04%	-
<b>Erro</b>	0,21%	1,23%	4,69%	7,44%	3,38%	3,20%	3,36%
<b>M. Solver</b>	9,67	39,89	260,49	29,80	8,74	67,51%	-
<b>Erro</b>	0,15%	1,18%	5,91%	2,09%	4,71%	7,15%	3,53%
<b>M. Der.</b>	9,68	39,89	293,75	32,90	8,93	76,10%	-
<b>Erro</b>	0,20%	1,18%	6,10%	8,10%	2,67%	4,66%	3,82%
<b>M. Iter.</b>	9,68	39,90	285,34	32,10	8,89	73,90%	-
<b>Erro</b>	0,20%	1,21%	3,07%	5,47%	3,10%	1,64%	2,45%

Fonte: Autora.

Tabela 4.5-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação, conforme o modelo, utilizado para temperatura de 25°C e radiação 800 W/m<sup>2</sup>.

	Isc [A]	Voc [V]	P <sub>máx</sub> [W]	V <sub>mp</sub> [V]	Imp [A]	FF [%]	Erro Médio [%]
<b>Fabricante</b>	7,59	44,86	271,85	37,49	7,25	79,84%	-
<b>Ideal</b>	7,560	45	272,138	38,40	7,09	79,99%	-
<b>Erro</b>	0,40%	0,31%	0,10%	2,43%	2,27%	0,19%	0,95%
<b>M. Simp.</b>	7,56	45,06	271,92	34,80	7,81	79,82%	-

<b>Erro</b>	0,40%	0,45%	0,02%	7,18%	7,76%	0,02%	2,64%
<b>M. Der.</b>	7,56	45,06	233,57	33,60	6,95	68,57%	-
<b>Erro</b>	0,40%	0,45%	14,08%	10,38%	4,13%	14,12%	7,26%
<b>M. Num.</b>	7,56	45,06	269,46	38,00	7,09	79,10%	-
<b>Erro</b>	0,40%	0,45%	0,88%	1,36%	2,21%	0,93%	1,04%
<b>M. Solver</b>	7,56	45,05	246,62	35,40	6,97	72,45%	-
<b>Erro</b>	0,44%	0,42%	9,28%	5,57%	3,93%	9,26%	4,82%
<b>M. Der.</b>	7,56	45,05	266,89	38,00	7,02	78,40%	-
<b>Erro</b>	0,44%	0,42%	1,83%	1,36%	3,14%	1,80%	1,50%
<b>M. Iter.</b>	7,56	45,05	262,32	37,30	7,03	77,06%	-
<b>Erro</b>	0,44%	0,42%	3,51%	0,51%	3,02%	3,49%	1,90%

Fonte: Autora.

Tabela 4.6-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação, conforme o modelo, utilizado para temperatura de 25°C e radiação 600 W/m<sup>2</sup>.

	<b>Parâmetros</b>						<b>Erro Médio [%]</b>
	<b>Isc [A]</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Pmáx [W]</b>	<b>Vmp [V]</b>	<b>Imp [A]</b>	<b>FF [%]</b>	
<b>Fabricante</b>	5,67	44,15	201,26	37,10	5,42	80,45%	-
<b>Ideal</b>	5,67	44,370	200,415	37,8	5,301984	79,66%	-
<b>Erro</b>	0,07%	0,50%	0,42%	1,88%	2,26%	0,98%	1,02%
<b>M. Simp.</b>	5,67	44,36	200,29	37,70	5,31	79,63%	-
<b>Erro</b>	0,07%	0,48%	0,48%	1,61%	2,06%	1,02%	0,95%
<b>M. Der.</b>	5,67	44,36	178,66	34,30	5,21	71,03%	-
<b>Erro</b>	0,07%	0,48%	11,23%	7,55%	3,98%	11,71%	5,84%
<b>M. Num.</b>	5,67	44,36	198,91	37,50	5,30	79,08%	-
<b>Erro</b>	0,07%	0,48%	1,17%	1,07%	2,22%	1,70%	1,12%
<b>M. Solver</b>	5,67	44,35	185,50	35,50	5,23	73,80%	-
<b>Erro</b>	0,02%	0,46%	7,83%	4,32%	3,67%	8,27%	4,09%
<b>M. Der.</b>	5,67	44,35	197,41	37,50	5,26	78,54%	-
<b>Erro</b>	0,02%	0,46%	1,91%	1,07%	2,95%	2,37%	1,46%

<b>M. Iter.</b>	5,67	44,35	194,86	36,90	5,28	77,50%	-
<b>Erro</b>	0,06%	0,46%	3,18%	0,55%	2,65%	3,67%	1,76%

Fonte: Autora.

Tabela 4.7-Propriedades do módulo obtidas através de cada método de estimação, conforme o modelo, utilizado para temperatura de 25°C e radiação 400 W/m<sup>2</sup>.

	Parâmetros						
	Isc [A]	Voc [V]	Pmáx [W]	Vmp [V]	Imp [A]	FF [%]	Erro Médio [%]
<b>Fabricante</b>	3,80	43,35	137,06	36,93	3,71	83,16%	-
<b>Ideal</b>	3,780	43,390	130,000	37,000	3,513514	79,26%	-
<b>Erro</b>	0,57%	0,09%	5,15%	0,18%	5,32%	4,69%	2,67%
<b>M. Simp.</b>	3,78	43,39	130,09	37,00	3,52	79,32%	-
<b>Erro</b>	0,57%	0,09%	5,08%	0,18%	5,26%	4,62%	2,63%
<b>M. Der.</b>	3,78	43,39	120,46	34,40	3,50	73,45%	-
<b>Erro</b>	0,57%	0,09%	12,11%	6,86%	5,64%	11,68%	6,16%
<b>M. Num.</b>	3,78	43,39	129,48	36,70	3,53	78,94%	-
<b>Erro</b>	0,57%	0,09%	5,53%	0,63%	4,93%	5,07%	2,80%
<b>M. Solver</b>	3,78	43,35	126,45	36,00	3,51	77,17%	-
<b>Erro</b>	0,57%	0,01%	7,74%	2,52%	5,35%	7,20%	3,90%
<b>M. Der.</b>	3,78	43,35	131,46	37,10	3,54	80,22%	-
<b>Erro</b>	0,57%	0,01%	4,09%	0,46%	4,52%	3,53%	2,20%
<b>M. Iter.</b>	3,78	43,35	130,46	36,80	3,55	79,62%	-
<b>Erro</b>	0,57%	0,01%	4,81%	0,36%	4,47%	4,26%	2,41%

Fonte: Autora.

Através das Tabelas 4.1 à 4.7 constatasse o que já foi observado graficamente na seção 4.3, que para o modelo de um diodo e duas resistências o método que possui o menor erro médio é o método iterativo.

## CAPÍTULO V

### 5.1 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

A modelagem de módulos fotovoltaicos é um importante recurso para o entendimento do comportamento elétrico destes dispositivos, principalmente quando submetidos a variações de fatores externos de temperatura e radiação. Para isso é necessário obter os parâmetros destes modelos que resultem em uma melhor representação do comportamento real. Desta forma, o presente trabalho objetivou realizar o estudo de métodos de estimação dos parâmetros de resistência em modelos matemáticos de um módulo fotovoltaico.

Inicialmente, foi feito um levantamento das curvas características disponibilizadas pelo fabricante e sua digitalização de modo a obter dados de pontos das mesmas. Uma comparação das curvas V-I do módulo MAXPOWER CS6U da Canadian Solar com as curvas geradas pelo modelo ideal, considerando diferentes índices de radiação e temperatura foi realizada. A diferença entre as duas ficou mais evidente para diferentes níveis de temperatura como explicado anteriormente. Essa discrepância deve-se a ausência de resistências no modelo ideal.

Ao implementar as curvas V-I para o modelo de um diodo e duas resistências, foi considerada a variação da resistência paralelo com a radiação. Verificou-se que a variação desse parâmetro com a radiação não gera grandes influências nas curvas geradas.

Em seguida, foi realizada uma comparação para cada nível de radiação e temperatura, conforme os dados disponibilizados pelo fabricante, de forma a analisar método(s) e modelo(s) que fornecessem uma melhor correspondência com as curvas do fabricante. Para o modelo de um diodo e uma resistência, o método que apresentou os melhores resultados foi o método numérico. O método simplificado foi o método que mais distou dos valores desejados, obtendo erros superiores aos estimados para o modelo ideal.

Quando comparado ao modelo de um diodo e duas resistências, o modelo de um diodo e uma resistência não apresentou uma correspondência tão satisfatória. Desta forma, o modelo mais apropriado entre os analisados, para descrever as características do módulo MAXPOWER CS6U da Canadian Solar é o de um diodo e duas resistências.

Dentre os métodos analisados para este modelo, o que melhor representou a curva característica foi o método iterativo, fornecendo uma excelente aproximação com a curva real, apresentando um erro médio de 1% para os principais pontos de operação do módulo nas condições STC e um erro médio de cerca de 2% considerando todas as condições analisadas.

Desta forma, conclui-se que o conjunto método iterativo/ modelo de um diodo e duas resistências é o que melhor descreve o módulo, dentre as metodologias analisadas.

Considerando que o módulo em estudo será o mesmo utilizado em uma usina de minigeração a ser instalada no campus das Auroras da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, o presente trabalho teve a importância de estimar dois dos principais parâmetros e analisar qual modelo matemático mais apropriado para o módulo, podendo desta forma ser utilizado em pesquisas futuras relacionadas a estes equipamentos.

Para trabalhos futuros, sugerem-se as considerações a seguir:

- Implementação de equipamentos de aquisição e armazenamento de dados de temperatura, radiação, corrente e tensão geradas pelo equipamento, bem como a potência produzida pelo dispositivo com a finalidade de validar experimentalmente as características estimadas no presente trabalho, possibilitando ajustes ao modelo.

- Análise detalhada e implementação de técnicas para a estimação do parâmetro de idealidade do diodo, uma vez que este parâmetro influi diretamente no joelho da curva I-V do módulo. A partir dessa sugestão, pode-se também verificar como os parâmetros de resistência variam ao longo do tempo e como essa variação afeta a eficiência do módulo MAXPOWER CS6U da Canadian Solar.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABSOLAR. Energia Solar Fotovoltaica: panorama, oportunidades e desafios. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/10184/15266087/painel+3+ap+7+2017.10.19+ABSOLAR+-+Energia+Solar+Fotovoltaica+-+Dr.+Rodrigo+Lopes+Sauaia.pdf/54f8b161-751b-0639-bd04-77a60cac45c3>
- ALBUQUERQUE, L. D. **Sistema de conexão e supervisão de painéis solares em microgrid de corrente contínua**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017. (1)
- ALBUQUERQUE, F. **Avaliação de Diferentes Métodos para Estimação da Resistência Série de Módulos Fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado. Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2017. (2)
- ALI, M. H. YUSUF, A. Parameter Extraction And Estimation Based On The Pv Panel Outdoor Performance Using Iterative Method. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 10(1): 362 – 367.
- ALSAYID, B. Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell/Module/Array with Two-Diode Model. *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE)*; Volume 1, Issue 3, junho de 2012.
- ALVES, N. M. G. **Identificação de Parâmetros de Modelos Elétricos DC de Centrais Fotovoltaicas**. Dissertação de Mestrado. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto. Porto, fevereiro, 2018.
- ANEEL. **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024**. Maio, 2017.
- ANEEL. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2017.
- AZZOUZI, M. POPESCU, D. BOUCHAHDANE, M. **Modeling of Electrical Characteristics of Photovoltaic Cell Considering Single-Diode Model**. *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 4, No. 6, November 2016.
- AWODUGBA, A. O. SANUSI, Y. K. AJAYI, J. O. **Photovoltaic solar cell simulation of shockley diode parameters in Matlab**. *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 8(22), páginas 1193-1200, 16 Junho, 2013. Nigéria.
- BANCO DO NORDESTE. **Energia Solar no Nordeste**. Caderno Setorial ETENE, ano 1, n. 1, setembro, 2016.
- BELLIA, H. YOUCEF, R. FATIMA, M. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, nº 3, páginas 53–61. 2014.
- BESSO, R. **Sistema solar fotovoltaico conectado à rede – estudo de caso no Centro de Tecnologia da UFRJ**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, fevereiro, 2017.

BENGHANEM, M. S. ALAMRI, S. N. Modeling of photovoltaic module and experimental determination of serial resistance. **Taibah University for Science Journal**. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658365512600120>.

BONKOUNGOU, D. KOALAGA, Z. NJOMO, D. Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, vol. 3, Março, 2013;

BUENO, P. H. **Modelagem analítica e numérica semiempírica de células fotovoltaicas**. Dissertação de mestrado. Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Agosto, 2016.

BUHLER, A. J. KRENZINGER, A. ROMERO, F. C. **Análise da Variação da Eficiência de Módulos Fotovoltaicos de Diferentes Tecnologias Em Função da Temperatura e Irradiância**. Artigo Científico. Revista Brasileira de Energia Solar Ano 2 Volume II Número 2, Dezembro de 2011 p.98-104.

CAMPOS, E.L.F. **Construção de um caracterizador de curvas de painéis solares utilizando um conversor boost**. Monografia. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal De Viçosa. Viçosa, 2013.

CANADIAN SOLAR. **Datasheet MAXPOWER (1500 V) CS6U- 325| 330| 335P**.

CAVALHO, A. L C. **Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade federal e Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

CASARO, M.M. MARTINS, D. C. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. Artigo da Científico. **Revista Eletrônica de Potência**, vol. 13, nº. 3, Agosto de 2008.

CEPEL-CRESESB. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014.

CERQUEIRA, N. A. SOUZA,V.B. **Energia fotovoltaica como uma solução para crise energética: análise da viabilidade técnica de sua implantação em edifício de uma instituição de ensino superior na cidade de Itaperuna- RJ**. VIII Congresso Nacional De Excelência em Gestão. Junho, 2012. Disponível em:

<http://www.inovarse.org/filebrowser/download/15849>

CHENCHE, L. E. P. **Avaliação dos métodos de modelagem e parametrização de dispositivos fotovoltaicos mono e multi junção**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.

CRESESB. **Radiação Solar**. Disponível:

[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=301](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301)

COTFAS, D. COTFAS, P. KAPLANIS, S. URSUTIU, D. Results on series and shunt resistances in a c-Si PV cell: Comparison using existing methods and a new one. **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials** Vol. 10, No. 11, November 2008, p. 3124 – 3130.



- CORRÊA, R. M. C. **Modelagem e validação do uso de módulo fotovoltaico flutuante em água**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2015.
- COSTA, W. T. **Modelagem, Estimação De Parâmetros E Método Mppt Para Módulos Fotovoltaicos**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Espírito Santo, VITÓRIA–ES, 2010
- CUBAS, J. PINDADO, S. MANUEL, C. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function. Artigo Científico. **Energies Journal**, ed. 7, páginas 4098-4115, 2014.
- DHASS, A. D. LAKSHMI, P. NATARAJAN, E. **Investigation of Performance Parameters of Different Photovoltaic Cell Materials using the Lambert-W Function**. Artigo Científico. International Conference on Advances in Energy Research. Índia. Dezembro, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216314357>
- DEV, A. JEYAPRABHA, B. **Modeling and Simulation of Photovoltaic Module in MATLAB**. 2013.
- EICKER, U. **Solar Technologies for Buildings**. Livro. University of Applied Sciences, Stuttgart, Germany. 2001.
- EL-SAYED, T. M. NAFEH, A. E. A. FAHMY, F. H. YOUSEF, H. K. M. **PV Parameters Estimation using a Developed Iterative Method**. International Journal of Scientific Research & Engineering Trends. Volume 1, Issue 1, Jan-2015.
- FARIA, W. A. **Estudo do sombreamento parcial em módulos fotovoltaicos através da resistência série e das redes neurais artificiais**. Dissertação de mestrado. Programa de pós – graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2014.
- GOETZE, F. **Projeto de Microgeração Fotovoltaica Residencial: Estudo de Caso**. Monografia. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.
- RELLA, R. Energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista de Iniciação Científica**, Criciúma, v. 15, n. 1, 2017.
- HANSEN, W. C. **Parameter Estimation for Single Diode Models of Photovoltaic Modules**. Sandia National Laboratories Technical Report. Califórnia, 2015.
- HASHIM, E. T. KHAZAAL, **Modelling and Output Power Evaluation of Series-Parallel Photovoltaic Modules**. S. Q. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) v.158 – No 8, 2017.
- IBRAHIM, H. ANANI, A. **Variations of PV module parameters with irradiance and temperature**. 9th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-17, 5-7 July 2017, Chania, Crete, Greece.

IEMA. **Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. Estudo técnico. 2015.

INPE, **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª Edição, São Paulo, 2017.

JALLAD, J. S. E. A. H. **Design and Simulation of a Photovoltaic System with Maximum Power Control to Supply a Load with Alternating Current**. Dissertação de mestrado. An-Najah National University. Palestina, 2012.

KHEZZAR, R. ZEREG, M. KHEZZAR, R. **Comparative Study of Mathematical Methods for Parameters Calculation of Current-Voltage Characteristic of Photovoltaic Module**. Algeria, 2009. Disponível em: [http://www.emo.org.tr/ekler/c44f1ef5ad8931f\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/c44f1ef5ad8931f_ek.pdf).

LEAL NETO, R. F. **Estudo de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência**. Monografia. Universidade Federal Da Paraíba. Departamento de Engenharia Elétrica. João Pessoa, novembro, 2016.

LIMA, N. F. W. **Investigação de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência em módulos fotovoltaicos**. Monografia. Curso de Engenharia de Energia. Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

LOPES, R. J. C. L. **Efeito do sombreamento nos painéis fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Dezembro, 2013.

LUNA, M.L.M. **Comparação e validação de modelos elétricos de um diodo e dois diodos em um Módulo Fotovoltaico**. Monografia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2013.

MENDONÇA, C. M. **Análise de Rendimento de um Painel Fotovoltaico com o Vidro Danificado**. Monografia. Curso de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pampa. Rio Grande do Sul, 2017.

MEYER, E.L. **Extraction of Saturation Current and Ideality Factor from Measuring Voc and Isc of Photovoltaic Modules**. Artigo Científico. Hindawi International Journal of Photoenergy V. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/8479487>

MICROSOFT SUPPORT OFFICE. **Solver do Excel**. Disponível em: <https://support.office.com/pt-br/article/definir-e-resolver-um-problema-usando-o-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>

MME. ProGD: Ações de estímulo à geração distribuída, com base em fontes renováveis. 2015. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3013891/15.12.2015+Apresenta%C3%A7%C3%A3o+ProGD/bee12bc8-e635-42f2-b66c-fa5cb507fd06?version=1.0>

MME. **Energia Solar no Brasil e Mundo** (Ano de referência – 2016). Departamento de informações e estudos energéticos. 2017.

MME/EPE. **Plano decenal de expansão de Energia: 2026**. Brasília, 2016.

MORCILLO-HERRERA, C. HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, F. FLOTA-BAÑUELOS, M.

**Method to Calculate the Electricity Generated by a Photovoltaic Cell, Based on Its Mathematical Model Simulations in MATLAB.** Artigo científico. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy, Vol. 2015, Article ID 545831, 12 pag. Disponível em : <http://dx.doi.org/10.1155/2015/545831>.

NAKANO, A. **Simulação de desempenho energético de tecnologias fotovoltaicas em fachadas de edifício no município de São Paulo.** Dissertação de mestrado. Mestrado em Ciências. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

NASCIMENTO, R. L. **Energia Solar no Brasil: situação e perspectivas.** Estudo Técnico. Brasília. Março, 2017.

NASSAR-EDDINE, A. OBBADI , Y. ERRAMI, A. EL FAJRI, M. AGUNAOU. **Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the Lambert W function: A comparative study.** Artigo Científico. Elsevier, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/301334676>

NEÇAIBIA, A. BOUTASSETA, A. N. MOUHAJER, A. S. A Simple Theoretical Method for the Estimation of Dynamic Resistance in Photovoltaic Panels. Artido Científico. **International Journal of Computer Applications**, Volume 45– No.14, May 2012.

NOVAK, M. V. **Análise de modelos matemáticos de temperatura de módulos fotovoltaicos e avaliação energética a partir de dados da casa solar eficiente.** Monografia. curso de Engenharia de Energia. Universidade Federal De Santa Catarina. Araranguá, 2016.

ORTEGA, L. L. M. **Conversão Fotovoltaica: Comparação de modelos de desempenho.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Metrologia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

OSTIZ, J. L. **Development of a graphical user interface tool for modelling and simulation of photovoltaic modules.** Monografia. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2015.

PEROZA, J. **Caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos de distintas tecnologias a partir de ensaios com simulador solar e iluminação natural.** Monografia. curso de Engenharia de Energia. Universidade Federal de Santa Catarina-Campus Araranguá. Araranguá, maio, 2015.

PINTO, C.S.B.S. **Validação experimental do modelo cinco parâmetros e um díodo de painéis fotovoltaicos.** Dissertação de mestrado. Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, maio, 2016.

RIBEIRO, U. G. V. **Estudo de Viabilidade econômica de instalação de fontes de energia renováveis baseadas em células fotovoltaicas para o uso residencial.** Monografia. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

RODRIGUES, M. S. **Modelamento e simulação de um sistema inversor trifásico para injeção de energia na rede de distribuição a partir de fontes renováveis do tipo FV.** Dissertação de mestrado. Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 2015.

ROGANI, B.C. **Modelagem de um sistema fotovoltaico conectado à Rede e Análise do desenvolvimento sob condições de sombreamento e variações de temperatura.** Monografia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

ROY, S. SHARMIN, R. S. FREDOUS, T. **Performance Analysis Of Mono-Crystalline And Poly-Crystalline Silicon Solar Cells Under Different Climatic Conditions: A Comparative Study.** Trabalho de Monografia. BRAC University, 2014.

SAMPAIO, P. G. V. **Prospecção tecnológica de células fotovoltaicas para energia solar.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2015.

SANTIAGO, G. L. S. **Microgeração solar fotovoltaica conectada à rede: análise da qualidade de energia.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em sistemas de comunicação e automação. Universidade Federal Rural do Semiárido. Mossoró, 2017.

SANTOS JÚNIOR, F.A.F. **Modelagem, análise e experimentação de sistemas fotovoltaico isolado baseado em plataforma de simulação com diagrama de blocos.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2016.

SANTOS, R. J. C. **Ferramenta Computacional de Modelação do Desempenho de Painéis Fotovoltaicos.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Electromecânica. Universidade Da Beira Interior. Outubro, 2011.

SANZIO, E. A. NASCIMENTO, M. R. **Desenvolvimento de um Equipamento Suporte Móvel para Módulos Fotovoltaicos Otimizado para Aumento da Captação de Energia Solar.** Departamento de Educação Superior. Centro Federal De Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca. Monografia. Rio de Janeiro, 2016.

SIDDIQUE, A. B. KARIM, S. M. R. SHARIF, S. I. HOQUE, M. T. **Modeling of Single Diode Solar Photovoltaic Module using Matlab.** International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 178 – No.3, November, 2017.

SOUZA, A.C. ISSA, L. E. MELO, F.C.et al. **Avaliação de desempenho de modelos computacionais representativos de painéis fotovoltaicos.** Artigo Científico. Revista Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal), páginas 145 – 154, jan. – jun. 2016.

SOUZA, V. C. **Controle Local de Potência Reativa em Geradores Fotovoltaicos para a Melhoria da Regulação de Tensão em Redes de Distribuição.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará. Belém-Pará, 2017.

TUMMALA, A. **Effect of Series Resistance Increase on Fill Factor of PV Cells Extracted from Field Aged Modules of Different Climates.** Arizona State University. August, 2016.

TSAI, H. TU, C. SU, Y. **Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK.** Artigo Científico. World Congress on Engineering and Computer Science, 2008.

VALENTE, M. A. S. **Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2011.

VIDAL, L.C. **Modelagem e Simulação de um gerador fotovoltaico em MATLAB™ para estudo do uso de Cargas intermitentes**. Artigo científico. X Simpósio de excelência em gestão e tecnologia. Outubro, 2013.

ZEKRY, A. AL-MAZROO, A. Y. **A Distributed SPICE-Model of a Solar Cell**. Ieee Transactions On Electron Devices, Vol. 43, NO. 5, May 1996.

WAGNER, A. KUNS, G. **Internal Resistance Determinated of only IV-curve under illumination**. Article. 19<sup>a</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, junho, 2004.

WAGNER, A. **Photovoltaik Engineering - Die Methode der Effektiven Solarzellen-Kennlinie**. Livro. Capítulo 3, páginas 6 à 14. Springer Verlag Berlin Heidelberg 1999

WAGNER, A. **Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions**. Artigo. Junho, 2000. Disponível em: <https://wenku.baidu.com/view/6b75a4cc2cc58bd63186bd23.html>

## APÊNDICE A – Código em Matlab para o Modelo Ideal

```

function Ia = PVideal(V, G, Tcell)
%Dados
k = 1.38e-23; % Constante de Boltzmann [J/K]
q = 1.60e-19; % Carga elementar [C]
Eg = 1.14; % Tensão do Cristal de silicio [eV]

%Dados do módulo
n = 1.3; % Fator de qualidade do diodo
ns = 72; % Número de células do módulo
Voc_Tref = 45.6; % Tensão de circuito aberto a Tref [V]
Isc_Tref = 9.45; % Corrente de Curto Circuito a Tref [A]
K0 = 0.0005; % Coeficiente de temperatura da corrente de curto-
circuito

%Variáveis ambientais
Suns = G/1000; % Relação entre a radiação e radiação de referência
Tref = 273 + 25; % Temperatura de referência [K]
Tc = 273 + Tcell; % Conversão da temperatura em Celsius para Kelvin [K]

%Parâmetros do modelo
Iph_Tref = Isc_Tref * Suns; % Corrente fotogerada na temperatura de
referência em função da radiação
Iph = Iph_Tref + K0*(Tc - Tref); % Corrente fotogerada em função da
rdiação
Id_Tref = Isc_Tref / (exp(q*Voc_Tref / (n*k*ns*Tref)) - 1);
Id_sat = Id_Tref * (Tc/Tref)^(3/n) * exp(-q*Eg / (n*k) * ((1./Tc) - (1/Tref)));
Vt_Ta = n * k * Tc * ns / q; % Termo do expoente da corrente de saturação

Ia = zeros(size(V));
In = zeros(size(V));

maxit = 100;
eps = 1e-10;

for j=1:maxit;
    Ia = Ia - ((Iph - Ia - Id_sat .* (exp(V./Vt_Ta) - 1)) ./ -1)
    if(max(abs(In-Ia)) < eps)
        break;
    end
    In = Ia;
end
end

```

## APÊNDICE B – Código em Matlab para o Modelo de um diodo e uma resistência série

```

function Ia = PVRs(V,G,Tcell,Rs)

%Dados
k = 1.38e-23; % Constante de Boltzmann [J/K]
q = 1.60e-19; % Carga elementar [C]
Eg = 1.14; % Tensão do Cristal de silicio [eV]

%Dados do módulo
n = 1.3; % Fator de qualidade do diodo
ns = 72; % Número de célula do módulo
Voc_Tref = 45.6; % Tensão de circuito aberto a Tref [V]
Isc_Tref = 9.45; % Corrente de Curto Circuito a Tref [A]
K0 = 0.0005; % Coeficiente de temperatura da corrente de curto-
circuito

%Variáveis ambientais
Suns = G/1000; % Relação entre a radiação e radiação de referência
Tref = 273 + 25; % Temperatura de referência [K]
Tc = 273 + Tcell; % Conversão da temperatura em Celsius para Kelvin [K]

%Parâmetros do modelo
Iph_Tref = Isc_Tref * Suns; % Corrente fotogerada na temperatura
de referencia em função da radiação
Iph = Iph_Tref + K0*(Tc - Tref); % Corrente fotogerada em função da
radiação
Id_Tref = Isc_Tref / (exp(q*Voc_Tref / (n*k*ns*Tref)) - 1);
Id_sat = Id_Tref * (Tc/Tref) .^ (3/n) .* exp(-q*Eg / (n*k) .* ((1./Tc) - (1/Tref)));
Vt_Ta = n * k * Tc * ns/q; % Termo do expoente da corrente de saturação
%Fornecer Rs
Ia = zeros(size(V)); %%tem que dar o V
In = zeros(size(V));

maxit = 5;
eps = 1e-16;

%| IMPORTANTE | Termo da corrente de saturação está em Vt_ta

for j=1:maxit;
Ia = Ia - ((Iph - Ia - Id_sat .* (exp((V+Ia.*Rs) ./Vt_Ta) - 1)) ./ (-1 -
((Id_sat .* (exp((V+Ia.*Rs) ./Vt_Ta) - 1)) .*Rs ./Vt_Ta)));
if(Ia<=0)
Ia=0;
end
if(max(abs(In-Ia))<eps)
break;
end

In = Ia;
end

end

```

## APÊNDICE C – Código em Matlab para o Modelo de um diodo e uma resistência série e uma resistência em paralelo

```
function Ia = PVRsRp(V, G, Tcell, Rs, Rp)

%Dados
k = 1.38e-23; % Constante de Boltzmann [J/K]
q = 1.60e-19; % Carga elementar [C]
Eg = 1.14; % Tensão do Cristal de silicio [eV]

%Dados do módulo
n = 1.3; % Fator de qualidade do diodo
ns = 72; % Número de célula do módulo
Voc_Tref = 45.6; % Tensão de circuito aberto a Tref [V]
Isc_Tref = 9.45; % Corrente de Curto Circuito a Tref [A]
K0 = 0.0005; % Coeficiente de temperatura da corrente de curto-
circuito

%Variáveis ambientais
Suns = G/1000; % Relação entre a radiação e radiação de referência
Tref = 273 + 25; % Temperatura de referência [K]
Tc = 273 + Tcell; % Conversão da temperatura em Celcius para Kelvin [K]

%Parâmetros do modelo
Iph_Tref = Isc_Tref * Suns; % Corrente fotogerada na temperatura
de referencia em função da radiação
Iph = Iph_Tref + K0*(Tc - Tref); % Corrente fotogerada em função da
rdiação
Id_Tref = Isc_Tref/(exp(q*Voc_Tref/(n*k*ns*Tref))-1);
Id_sat = Id_Tref*(Tc/Tref).^(3/n).*exp(-q*Eg/(n*k).*(1./Tc)-(1/Tref));
Vt_Ta = n * k * Tc * ns/q; % Termo do expoente da corrente de saturação
%Fornecer Rs e Rp

Ia = zeros(size(V)); %%tem que dar o V
In = zeros(size(V));

maxit = 5;
eps = 1e-10;

%| IMPORTANTE | Termo da corrente de saturação está em Vt_ta

for j=1:maxit;
Ia = Ia - (Iph - Ia - Id_sat.*(exp((V+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1) - ...
((V+ Rs*Ia)/Rsh))./(-1 - ((Id_sat.*(exp((V+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -
1))...
.*Rs./Vt_Ta) - (Rs./Rsh));
if(max(abs(In-Ia))<eps)
break;
end
In = Ia;

end

end
```



