

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE E PROPOSTA DE APRIMORAMENTO DO MODELO DE UM DIODO PARA  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

por

Cristiano Saboia Ruschel

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2019

ANÁLISE E PROPOSTA DE APRIMORAMENTO DO MODELO DE UM DIODO PARA  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

por

Cristiano Saboia Ruschel

Mestre em Engenharia

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,  
PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Co-Orientador: Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin

Comissão de Avaliação

Prof. Dr. Ricardo Rüther . . . . . UFSC

Prof. Dr. Rafael Haag . . . . . UERGS

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Letícia Jenisch Rodrigues . . . . . PROMEC / UFRGS

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry . . . . . PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 31 de Maio de 2019.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Arno Krenzinger, sempre disponível para esclarecimentos e discussões essenciais na elaboração deste trabalho.

Igualmente, ao co-orientador Fabiano Gasparin, pela contribuição teórica na construção da tese e pelo auxílio na elaboração dos ensaios experimentais.

Ao colega César Prieb, por compartilhar seu conhecimento e experiência, colaborando na robustez do estudo.

Aos amigos do laboratório pelo apoio, em especial aos colegas Eurides Ramos Costa, Felipe Detzel Kipper e Fernando Schuck de Oliveira, por sua ajuda na realização das medições, essencial para o sucesso desta tese.

Aos membros da banca, os professores Ricardo Rüther, Rafael Haag, Letícia Jenisch Rodrigues e Adriane Prisco Petry por suas sugestões que enriqueceram o resultado final.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

## RESUMO

O modelo de um diodo é o mais utilizado na simulação de sistemas fotovoltaicos. Contudo, é reconhecido que este possui desempenho inferior em certas situações operativas, em especial na modelagem de condições de baixas irradiâncias, inferiores a  $300 \text{ W/m}^2$ . Assim, este trabalho se propõe a estudar o modelo de um diodo, compreendendo as funções de cada um dos parâmetros e avaliando seus comportamentos nas diferentes condições de temperatura e irradiância, a fim de propor aprimoramentos. Primeiramente, são analisados os trabalhos experimentais e os modelos da literatura, a fim de compreender as abordagens tradicionalmente utilizadas. A seguir, com a realização de dois conjuntos de ensaios experimentais em simulador solar com condições controladas, utilizando uma amostra de módulos fotovoltaicos de silício cristalino, extrai-se os parâmetros da curva I-V de cada uma das condições de estudo, e, desses dados, avalia-se possíveis ajustes no modelo de um diodo. Na primeira etapa, a temperatura constante, são propostas equações de variação das resistências série e paralela com a irradiância, e demonstra-se que estas levam a curvas mais adequadas a baixas irradiâncias que o modelo tradicional. Posteriormente, com os dados a diferentes temperaturas, na irradiância de referência avalia-se que o recálculo de  $I_0$  a cada condição é a opção mais adequada para esses casos. Na sequência, nas medições com temperaturas e irradiâncias distintas das condições de referências, conclui-se que um ajuste no coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto,  $\beta$ , com a irradiância leva a uma melhora notável nas curvas I-V, especialmente a baixas irradiâncias e altas temperaturas. Por fim, em um ensaio em condições externas, são comparados os resultados de um modelo de um diodo mais simplificado com outro que utiliza as alterações propostas. Os resultados confirmam a tendência verificada nas medições do simulador, de maior adequação às curvas I-V medidas quando aplicados os aprimoramentos propostos.

Palavras-chave: Modelo de um diodo; Modelagem fotovoltaica; Módulos fotovoltaicos.

## ABSTRACT

The single diode model is the most used for the photovoltaic systems modeling. However, it is a known fact that the model presents lower performance in certain conditions, as in the modeling of low irradiance operation, especially for those lower than 300 W/m<sup>2</sup>. So, this work aims to study the single diode model, understanding the function of each parameter and evaluating its behavior on different irradiance and temperature conditions, so that adjustments can be proposed. First, experimental works and proposed models on the literature are analyzed, in order to understand the traditional approaches. Next, two sets of experiments are performed on a solar simulator, with controlled conditions, on a sample of PV crystalline silicon modules. The I-V curves of each studied condition are extracted, and from these data, possible improvements to the single diode model are evaluated. On the first step, using constant temperature, equations for the variation of the series and the parallel resistances are proposed, and it is demonstrated that these lead to more adequate I-V curves than the traditional model. Later, concerning temperature variations, at reference irradiance, it is shown that the recalculation of  $I_0$  at each condition is the most adequate option. Following, on measurements with distinct temperature and irradiance conditions, it is concluded that an adjustment on the open circuit thermal coefficient,  $\beta$ , leads to a noticeable improvement of the I-V curves, specially under low irradiance and high temperatures. Finally, on an outdoor test, the results of a simple single diode model are compared with the ones obtained with the improved model. The results confirm the trend seen on the solar simulator measurements, showing better adequacy to the measured I-V curves when the proposed improvements are applied.

Palavras-chave: Single diode model, Photovoltaic modeling, Photovoltaic modules.

# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Motivação .....	2
1.2.	Objetivo geral .....	3
1.3.	Objetivos específicos .....	3
1.4.	Organização do trabalho .....	4
<b>2.</b>	<b>MODELAGEM FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>5</b>
2.1.	Modelo de máxima potência .....	5
2.2.	Modelo de um e dois diodos.....	6
2.2.1.	Modelo de um diodo de quatro parâmetros .....	7
2.2.2.	Modelo de um diodo de cinco parâmetros.....	8
2.3.	Influência dos parâmetros no modelo de um diodo.....	19
2.3.1.	Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ ) .....	19
2.3.2.	Fator de idealidade do diodo ( $n$ ).....	19
2.3.3.	Corrente de saturação reversa no escuro ( $I_0$ ).....	20
2.3.4.	Resistência paralela ( $R_p$ ) .....	21
2.3.5.	Resistência série ( $R_s$ ) .....	22
2.4.	Variação dos parâmetros com a irradiância.....	23
2.4.1.	Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ ) .....	23
2.4.2.	Fator de idealidade do diodo ( $n$ ).....	24
2.4.3.	Corrente de saturação reversa ( $I_0$ ) .....	24
2.4.4.	Resistência paralela ( $R_p$ ).....	25
2.4.5.	Resistência Série ( $R_s$ ).....	26
2.5.	Variação dos parâmetros com a temperatura.....	28
2.5.1.	Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ ) .....	28
2.5.2.	Fator de idealidade do diodo ( $n$ ).....	28
2.5.3.	Corrente de saturação reversa ( $I_0$ ) .....	29
2.5.4.	Resistência paralela ( $R_p$ ).....	30
2.5.5.	Resistência série ( $R_s$ ) .....	31
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
3.1.	Procedimento experimental para análise em diferentes irradiâncias.....	33

3.2.	Procedimento experimental para análises a diferentes temperaturas .....	34
3.3.	Medidas externas .....	36
3.4.	Método de extração considerado .....	37
3.5.	Métricas de avaliação utilizadas .....	39
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>40</b>
4.1.	Comportamento experimental dos parâmetros com a irradiância .....	40
4.1.1.	Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ ) .....	40
4.1.2.	Fator de idealidade do diodo ( $n$ ).....	40
4.1.3.	Corrente de saturação reversa no escuro ( $I_0$ ).....	42
4.1.4.	Resistência paralela ( $R_p$ ).....	43
4.1.5.	Resistência série ( $R_s$ ) .....	45
4.2.	Influência do método de extração.....	46
4.2.1.	Extração com $n$ constante .....	47
4.2.2.	Extração com $n$ e $I_0$ fixos.....	49
4.2.3.	Extração com método de Krenzinger .....	50
4.3.	Comportamento experimental dos parâmetros com a temperatura .....	55
4.3.1.	Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ ) .....	55
4.3.2.	Coefficientes de temperatura $\alpha$ e $\beta$ .....	56
4.3.3.	Fator de idealidade do diodo ( $n$ ).....	58
4.3.4.	Corrente de saturação reversa ( $I_0$ ) .....	59
4.3.5.	Resistência paralela ( $R_p$ ).....	60
4.3.6.	Resistência série ( $R_s$ ) .....	61
<b>5.</b>	<b>AVALIAÇÕES E PROPOSTAS DE MODELAGEM.....</b>	<b>63</b>
5.1.	Modelagem dos parâmetros com a irradiância .....	63
5.1.1.	Modelagem do comportamento de $I_{fg}$ e $n$ com a irradiância .....	63
5.1.2.	Modelagem do comportamento de $R_p$ com a irradiância.....	63
5.1.3.	Modelagem de $R_s$ e $I_0$ com a irradiância .....	67
5.1.4.	Resumo das análises com a irradiância .....	70
5.2.	Modelagem dos parâmetros com a temperatura .....	71
5.2.1.	Modelagem do comportamento de $I_{fg}$ com a temperatura .....	71
5.2.2.	Modelagem do comportamento de $n$ , $R_s$ e $R_p$ com a temperatura .....	72
5.2.3.	Modelagem do comportamento de $I_0$ com a temperatura.....	72

5.3.	Modelagem completa com temperatura e irradiância .....	75
5.3.1.	Avaliação do coeficiente $\beta$ .....	75
5.4.	Avaliação do modelo em medidas externas .....	79
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>87</b>
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros .....	90
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>91</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circuito do modelo de um diodo de quatro parâmetros .....	7
Figura 2.2 – Circuito do modelo de um diodo de cinco parâmetros .....	8
Figura 2.3 - Comportamento da curva I-V com a variação de $I_{fg}$ .....	19
Figura 2.4 - Comportamento da curva I-V com a variação de $n$ .....	20
Figura 2.5 - Comportamento da curva I-V com a variação de $I_0$ .....	21
Figura 2.6 – Efeito da resistência paralela na curva I-V com $G = 1000 \text{ W/m}^2$ .....	22
Figura 2.7 - Efeito da resistência paralela na curva I-V com $G = 100 \text{ W/m}^2$ .....	22
Figura 2.8 – Comportamento da curva I-V com a variação de $R_s$ .....	23
Figura 2.9 – Variação de $I_0$ com a temperatura no modelo de De Soto et al., 2006.....	30
Figura 2.10 – Circuito equivalente do modelo de dois diodos .....	32
Figura 3.1 – Vista frontal da câmara termostática para aquecimento do módulo .....	35
Figura 3.2 – Câmara com temperatura controlada .....	36
Figura 3.3 – Realização das medidas externas com filtro .....	37
Figura 4.1 – Comportamento experimental de $I_{fg}^*$ com a irradiância.....	41
Figura 4.2 – Comportamento experimental de $n^*$ com a irradiância.....	41
Figura 4.3 – Comportamento experimental de $I_0^*$ com a irradiância .....	42
Figura 4.4 – Comportamento experimental de $I_0^*$ com a irradiância – detalhe dos pontos de $I_0^*$ entre 0 e 2,5 .....	43
Figura 4.5 – Variação de $R_p^*$ com o nível de irradiância.....	43
Figura 4.6 – Comparação entre propostas de variação de $R_p^*$ com a irradiância .....	44
Figura 4.7 – Comportamento experimental de $R_s^*$ com a irradiância .....	45
Figura 4.8 – Comportamento de $I_0^*$ com a irradiância – extração com $n$ constante.....	48
Figura 4.9 – Comportamento da resistência série adimensional com a irradiância – extração com $n$ constante .....	48
Figura 4.10 – Comportamento da resistência série adimensional com a irradiância – extração com $n$ e $I_0$ constantes .....	49
Figura 4.11 – Comportamento do fator de idealidade do diodo adimensional $n^*$ com a irradiância – extração pelo método de Krenzinger.....	51
Figura 4.12 – Comportamento de $I_0^*$ com a irradiância – extração com o método de Krenzinger .....	52
Figura 4.13 – Comportamento de $R_p^*$ com a irradiância – extração com o método de Krenzinger .....	52

Figura 4.14 – Comportamento dos parâmetros extraídos pelo método de Krenzinger para um módulo específico.....	53
Figura 4.15 – Comportamento de $R_s^*$ com a irradiância – extração com o método de Krenzinger .....	54
Figura 4.16 – Variação da corrente fotogerada adimensional com a temperatura .....	56
Figura 4.17 – Variação do coeficiente $\alpha$ com a irradiância.....	57
Figura 4.18 – Variação do coeficiente $\beta$ com a irradiância.....	57
Figura 4.19 – Variação do fator de idealidade do diodo com a temperatura.....	58
Figura 4.20 – Variação da corrente de saturação reversa $I_0$ com a temperatura.....	59
Figura 4.21 – Variação de $R_p$ com a temperatura .....	60
Figura 4.22 – Variação de $R_p$ com a irradiância e com a temperatura para um dos módulos testados .....	61
Figura 4.23 – Variação da resistência série $R_s$ com a temperatura.....	62
Figura 4.24 – Variação de $R_s$ com a temperatura e com a irradiância para um dos módulos testados .....	62
Figura 5.1 – Desvio em $P_{mp}$ – modelos Parâmetros Constantes e $R_p$ Inverso .....	65
Figura 5.2 – Desvio médio quadrático ponderado – modelos Parâmetros Constantes e $R_p$ Inverso .....	66
Figura 5.3 – Desvio absoluto no $P_{mp}$ para os modelos $R_p$ Inverso e $R_s$ e $I_0$ Variáveis .....	69
Figura 5.4 – Desvio médio quadrático ponderado para os modelos $R_p$ Inverso e $R_s$ e $I_0$ Variáveis.....	69
Figura 5.5 – Desvio percentual em $P_{mp}$ para os três modelos estudados.....	70
Figura 5.6 – Desvio médio quadrático ponderado para os três modelos estudados .....	71
Figura 5.7 – Desvio absoluto no $P_{mp}$ com ambos modelos testados .....	74
Figura 5.8 – Desvio médio quadrático para ambos modelos testados.....	74
Figura 5.9 – Desvio médio no $P_{mp}$ a 45 °C com diferentes modelos de $\beta$ .....	77
Figura 5.10 - Desvio médio no $P_{mp}$ a 65 °C com diferentes modelos de $\beta$ .....	77
Figura 5.11 - Desvio médio quadrático da corrente a 45 °C com diferentes modelos de $\beta$ .....	78
Figura 5.12 - Desvio médio quadrático da corrente a 65 °C com diferentes modelos de $\beta$ .....	79
Figura 5.13 – Desvio médio quadrático ponderado para cada modelo nas medidas realizadas .....	81
Figura 5.14 - Desvio no ponto de máxima potência para cada modelo nas medidas realizadas .....	82

Figura 5.15 – Curvas medida e simuladas na medição Filtro 70% (1).....	83
Figura 5.16 - Curvas medida e simuladas na medição Filtro 70% (2) .....	84
Figura 5.17 - Curvas medida e simuladas na medição Filtro 50% (1) .....	85
Figura 5.18 - Curvas medida e simuladas na medição Filtro 50% (2) .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Requisitos para um simulador solar classe A [IEC 60904-9] e características do equipamento utilizado.....	33
Tabela 5.1 – Desvios para modelos Parâmetros Constantes e $R_p$ Inverso.....	64
Tabela 5.2 – Desvios para modelos $R_p$ Inverso e $R_s$ e $I_0$ Variáveis .....	68
Tabela 5.3 – Resumo do tratamento dos parâmetros com a irradiância nos modelos estudados .....	70
Tabela 5.4 – Comparação dos modelos de variação de temperatura testados .....	73
Tabela 5.5 – Resumo do comportamento dos parâmetros do modelo proposto até o momento .....	75
Tabela 5.6 – Desvio no ponto de máxima potência com diferentes modelos de $\beta$ .....	76
Tabela 5.7 - Desvio médio quadrático ponderado da corrente com diferentes modelos de $\beta$ ..	78
Tabela 5.8 - Resumo do comportamento dos parâmetros do modelo proposto .....	79
Tabela 5.9 – Desvio médio quadrático ponderado de corrente para cada modelo e condição testados .....	81
Tabela 5.10 – Desvio no ponto de máxima potência para cada modelo e condições testados .	82
Tabela 6.1 - Resumo do comportamento dos parâmetros do modelo proposto .....	89

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM – American Society for Testing and Materials

CdTe – Telureto de cádmio

CIGS – Seleneto de cobre, índio e gálio

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GaAs – Arseneto de gálio

IEC – International Electrotechnical Commission

LABSOL - Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LAPSS - Large Area Pulsed Solar Simulator

NIST - National Institute of Standards and Technology

NOCT – Nominal Operating Cell Temperature

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SAM – System Advisor Model

STC – Standard Test Conditions

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_1$	Coeficiente de modelos de variação da eficiência dos módulos com a irradiância	(-)
$a_2$	Coeficiente de modelos de variação da eficiência dos módulos com a irradiância	(-)
$a_3$	Coeficiente de modelos de variação da eficiência dos módulos com a irradiância	(-)
$AM$	Coeficiente modificador pela massa de ar no modelo de De Soto	(-)
$AM^*$	Coeficiente modificador pela massa de ar adimensionalizado pelo valor em STC no modelo de De Soto	(-)
$C_s$	Constante para obtenção da resistência série no modelo de Orioli & di Gangi	(-)
$C_p$	Constante para obtenção da resistência paralela no modelo de Orioli & di Gangi	(-)
$C_1$	Constante utilizada no modelo de Orioli & di Gangi	(-)
$C_2$	Constante utilizada no modelo de Orioli & di Gangi	(-)
$C_3$	Constante utilizada no modelo de Orioli & di Gangi	(-)
$D$	Fator de difusão do diodo	(-)
$E_g$	Energia da banda proibida do material semiconductor	(eV)
$G$	Irradiância	(W/m <sup>2</sup> )
$G^*$	Irradiância adimensionalizada pelo padrão STC	(-)
$I$	Corrente no módulo fotovoltaico	(A)
$I_d$	Corrente no diodo do modelo de um diodo	(A)
$I_{fg}$	Corrente fotogerada	(A)
$I_{fg}^*$	Corrente fotogerada adimensionalizada pelo valor em STC	(-)
$I_{sc}$	Corrente de curto-circuito	(A)
$I_{mp}$	Corrente no ponto de máxima potência	(A)
$I_0$	Corrente de saturação reversa do diodo no escuro	(A)

$I_0^*$	Corrente de saturação reversa do diodo no escuro adimensionalizada pelo valor em STC	(-)
$k$	Constante de Boltzmann	(J/K)
$K$	Constante de ajuste de temperatura do modelo de Lo Brano et al.	(-)
$m$	Expoente de dependência de temperatura de $I_0$ no modelo de Boyd et al.	(-)
$n$	Fator de idealidade do diodo	(-)
$n^*$	Fator de idealidade do diodo adimensionalizado pelo valor em STC	(-)
$N_s$	Número de células em série no módulo fotovoltaico	(-)
$P$	Potência do arranjo fotovoltaico	(W <sub>p</sub> )
$P_{nom}$	Potência nominal de um módulo fotovoltaico	(W <sub>p</sub> )
$P_{mp}$	Potência no ponto de máxima potência	(W)
$q$	Carga elementar do elétron	(C)
$R_p$	Resistência paralela	(Ω)
$R_p^*$	Resistência paralela adimensionalizada pelo valor em STC	(-)
$R_{p0}$	Inverso da declividade da curva I-V na região de curto circuito	(A/V)
$R_s$	Resistência série	(Ω)
$R_s^*$	Resistência série adimensionalizada pelo valor em STC	(-)
$R_{s0}$	Inverso da declividade da curva I-V na região de circuito aberto	(A/V)
$S$	Irradiância absorvida	(W/m <sup>2</sup> )
$T$	Temperatura do módulo fotovoltaico	(°C)
$T'$	Temperatura para obtenção da constante $K$ no modelo de Lo Brano et al.	(°C)
$T^*$	Temperatura adimensionalizada pelo padrão STC	(-)
$V$	Tensão elétrica	(V)
$V_{mp}$	Tensão no ponto de máxima potência	(V)
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto	(V)

$\alpha$	Coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura	(A/°C)
$\alpha^*$	Coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura adimensionalizado pelo valor em STC	(-)
$\beta$	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura	(V/°C)
$\beta^*$	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura adimensionalizado pelo valor em STC	(-)
$\gamma$	Coeficiente de variação da potência máxima com a temperatura	(W/°C)
$\eta$	Eficiência de um módulo fotovoltaico	(%)

## 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a energia solar fotovoltaica ficava restrita a aplicações específicas, sendo utilizada especialmente para fornecimento de energias em localidades de difícil acesso. Inicialmente utilizada em aplicações espaciais, posteriormente começou a ser aplicada em regiões remotas, ilhas e sistemas isolados de uma rede elétrica principal. Mais recentemente, passou a ser vista também como uma alternativa de redução de emissões de gases de efeito estufa nos sistemas elétricos de grande porte, porém dependendo de subsídios governamentais para sua viabilização.

Nos últimos anos, contudo, em diferentes países a energia proveniente da fonte solar fotovoltaica tem sido uma das mais competitivas em termos de custo nivelado de energia. Os contratos de energia com os menores preços já registrados no mundo foram firmados a partir de energia solar fotovoltaica, de USD 17,90 / MWh na Arábia Saudita [RenewEconomy, 2017a] e USD 21,48 / MWh no Chile [RenewEconomy, 2017b]. Embora haja algumas dúvidas sobre a existência de subsídios no primeiro caso [Greentech Media, 2017], é inegável a competitividade atingida pela fonte.

Tal competitividade se traduz em crescimentos expressivos da participação da energia solar fotovoltaica nas matrizes elétricas de diversos países. A Alemanha foi pioneira na difusão massiva dessa tecnologia, apresentando ainda hoje a maior penetração nacional da fonte. Em 2017, aproximadamente 7,2% da energia total no país foi suprida por energia solar, e a fração instantânea da carga suprida por fotovoltaica chega a 35% em dias de semana e 50% em finais de semana [Fraunhofer ISE, 2018]. Recentemente, contudo, a China assumiu o papel de maior destaque nessa tecnologia. Além da posição de maior fabricante de equipamentos, nos últimos anos o país se tornou também líder em instalações da energia fotovoltaica, tendo adicionado à sua matriz cerca de 52,8 GW em 2017, 53,3% do total mundial. Assim, o país já possuía, ao final de 2017, 32% da potência instalada mundial, que era de 404,5 GW, enquanto os EUA, segundo maior mercado, respondiam por cerca de 13% do total [SolarPower Europe, 2018].

No Brasil, a energia solar fotovoltaica ainda não possui uma penetração tão significativa no Sistema Interligado Nacional, mas vem apresentando um crescimento acelerado. Segundo o Banco de Informações da Geração [ANEEL, 2019a], ao final de abril de 2019, estavam em operação mais de 2.000 MW de geração fotovoltaica em usinas centralizadas, enquanto o banco de dados de geração distribuída registrava 728 MW da fonte nessa modalidade [ANEEL, 2019b]. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 [EPE, 2018], em seu cenário base,

indica a instalação de cerca de 1 GW por ano entre os anos de 2021 e 2027. Em um cenário de redução de custos, e se fosse considerada a contribuição da fonte no atendimento à demanda máxima, o plano indica que poderia ser benéfica para o sistema elétrico a contratação de até 3 GW por ano no período 2021-2027. Para geração distribuída, o plano estima que, ainda que ocorresse a alteração regulatória para tarifação binômia, que reduziria a atratividade do modelo atual, seriam instalados quase 10 GW até final do ano de 2027.

### 1.1. Motivação

Com o crescimento recente da fonte fotovoltaica, alguns dos desafios relacionados aos sistemas fotovoltaicos tornam-se ainda mais relevantes, como a estimativa de sua produção. Diversas etapas estão envolvidas nesse processo. Inicialmente, é necessário conhecer o recurso solar, seja medido ou previsto, para a estimativa da produção em tempo real, ou modelado, caso se esteja na fase de projeto. A seguir vem a modelagem do módulo fotovoltaico, ou seja, da conversão da energia solar em energia elétrica em corrente contínua. Posteriormente, é realizada a simulação do inversor fotovoltaico, que converte a energia de corrente contínua para corrente alternada.

Para a etapa da conversão nos módulos fotovoltaicos, há algumas alternativas. A mais utilizada é o modelo de um diodo, presente na maioria dos softwares de simulação fotovoltaica utilizados no mercado. Contudo, o modelo de um diodo possui algumas limitações, reconhecidamente no cálculo da produção quando de irradiâncias mais baixas, inferiores a 300 W/m<sup>2</sup>. Tal resultado foi verificado em trabalho anterior [Ruschel, 2015], onde foi comparada a precisão de um *software* que utilizava o modelo de um diodo com dados medidos de um sistema fotovoltaico real. Sugeriu-se que alterações em um dos parâmetros do modelo, a resistência paralela, poderiam trazer o resultado para mais próximo do verificado experimentalmente.

De fato, esta abordagem é utilizada por diversos autores, com modelos modificados sendo utilizados por dois dos principais softwares de simulação utilizados por projetistas do setor, PVSYST, desenvolvido pela Universidade de Genebra, na Suíça e SAM, do *National Renewable Energy Laboratories*, dos EUA. Contudo, verifica-se que nem sempre as propostas de alterações no modelo possuem validações experimentais extensivas.

Embora em geral a maior parte da energia produzida por sistemas fotovoltaicos seja em condições de irradiância mais elevadas, principalmente em usinas centralizadas, que geralmente

são instaladas em locais favoráveis, e utilizam frequentemente sistemas de rastreamento, os aprimoramentos do modelo a baixas irradiâncias podem ser relevantes. Mesmo no Brasil, que possui bons índices de irradiação, uma fração importante pode ser gerada em dias de baixa irradiação. No Rio Grande do Sul, estado que possui a segunda maior potência instalada em geração distribuída, atrás apenas de Minas Gerais [ANEEL, 2019b], foi demonstrado por Ennes, 2018, que em boa parte do ano predominam dias de irradiação menos elevada. Por exemplo, na capital Porto Alegre, 32% dos dias apresentam um total de irradiação horizontal acumulada inferior a 3 kWh/m<sup>2</sup>, e 8% dos dias (aproximadamente um mês), um total diário de até 1 kWh/m<sup>2</sup>. Nesses dias, o sistema opera na maior parte do tempo (senão em sua totalidade) nas condições onde a modelagem é menos precisa.

Além da piora na precisão do modelo a baixas irradiâncias, verificam-se na literatura outras lacunas no estudo do modelo de um diodo. Não há consenso, por exemplo, em estudos experimentais, de qual o comportamento esperado de cada um dos parâmetros para diferentes temperaturas de operação ou níveis de irradiação, com diferentes estudos chegando a conclusões por vezes opostas. Assim, há também discussão nas propostas de modelagem, com alguns autores propondo diferentes comportamentos para os parâmetros do modelo, além de utilizarem diferentes técnicas de obtenção desses parâmetros, desde abordagens analíticas ou modelos semi-empíricos até técnicas de *curve-fitting*, algoritmos genéticos ou redes neurais.

## **1.2. Objetivo geral**

Este trabalho tem por objetivo estudar o modelo de um diodo, avaliando a função de cada um dos parâmetros e seus comportamentos em diferentes condições operativas por meio de ensaios experimentais em módulos de silício cristalino. A partir desse estudo, visa-se a proposição de aprimoramentos no modelo que sejam de simples implementação e façam com que este forneça resultados mais adequados para as condições de baixa irradiação, nas quais os modelos tradicionais são menos precisos.

## **1.3. Objetivos específicos**

- Compreender a influência de cada parâmetro do modelo na construção das curvas I-V;

- Estudar o comportamento dos parâmetros do modelo de um diodo em diferentes condições de temperatura e irradiância solar por meio de ensaios experimentais em módulos de silício cristalino.

- Avaliar a influência dos métodos de extração de parâmetros de curvas I-V na modelagem fotovoltaica.

- Propor aprimoramentos no modelo de um diodo a fim de melhorar seu desempenho em diferentes condições de operação.

#### **1.4. Organização do trabalho**

O capítulo 2 apresenta uma revisão sobre modelagem fotovoltaica, focando no modelo de um diodo. São apresentados alguns dos modelos tradicionalmente utilizados, discutidas as funções de cada parâmetro no modelo, e estuda-se o estado da arte na literatura quanto ao tratamento de cada um dos parâmetros com relação a variações de irradiância e temperatura.

O capítulo 3 traz o detalhamento dos ensaios experimentais realizados, bem como do método de extração utilizado e das métricas de avaliação de resultados.

O capítulo 4 discute, a partir dos dados experimentais, o comportamento dos parâmetros do modelo de um diodo com relação às variações de temperatura e irradiância, bem como a influência do método de extração nessas conclusões.

O capítulo 5 propõe alternativas de modelagem baseadas nos resultados apresentados no capítulo 4, e avalia os ganhos de precisão de cada alteração proposta em relação ao modelo tradicional.

O capítulo 6 traz as considerações finais, discutindo as conclusões do estudo e indicando algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2. MODELAGEM FOTOVOLTAICA

São diversos os modelos utilizados para representar a conversão de energia solar em energia elétrica por módulos fotovoltaicos, a depender das informações disponíveis e da precisão desejada. Neste capítulo, são descritos: o modelo de máxima potência, o modelo de um diodo de quatro parâmetros, o modelo de um diodo de cinco parâmetros, este com algumas formulações propostas na literatura, e o modelo de dois diodos.

### 2.1. Modelo de máxima potência

A potência gerada por módulos fotovoltaicos é aproximadamente linear com a irradiância para módulos de silício cristalino em grande parte de sua faixa de operação. Portanto, o modelo mais simples para representá-los consiste em utilizar-se dessa relação. Soma-se ainda o efeito da temperatura, que leva a uma redução linear da eficiência de conversão fotovoltaica, seguindo um coeficiente fornecido pelos fabricantes para seus equipamentos. Esse modelo, portanto, resume-se à Equação 2.1:

$$P = \frac{G}{1000} P_{nom} \gamma (T - 25) \quad (2.1)$$

onde  $\gamma$  é o coeficiente de variação de potência com a temperatura,  $P_{nom}$  a potência nominal do módulo,  $T$  e  $G$ , respectivamente, a temperatura de operação dos módulos e a irradiância local, e  $P$  a potência para tais condições.

Devido a desvios em relação a esse comportamento linear de potência com a irradiância, decorrente dos efeitos das resistências série e paralela, alguns autores propuseram coeficientes adicionais que adaptam a eficiência dos módulos ao nível de irradiância desejado. A formulação de Williams et al., 2003 considera a eficiência dependente de três parâmetros, conforme a Equação 2.2.

$$\eta(G) = a_1 + a_2 G^* + a_3 \ln(G^*) \quad (2.2)$$

Sendo  $G^*$  a fração de irradiância em relação ao valor STC (*Standard Test Conditions*), de 1000 W/m<sup>2</sup>. Devido ao caso particular de eficiência unitária para a condição STC, é possível derivar que:

$$a_1 + a_2 = 1 \quad (2.3)$$

Assim, são necessários mais dois pontos de eficiência para obtenção dos três coeficientes. Alguns catálogos de fabricantes trazem a informação de eficiência a  $200 \text{ W/m}^2$ , além da condição NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*), de  $800 \text{ W/m}^2$ , esta, contudo para uma temperatura diferente da STC. Corrigindo o efeito da temperatura da condição NOCT, estes dois pontos poderiam ser utilizados para determinação dos 3 parâmetros da Equação 2.2.

Como alternativa, outros autores buscaram obter as curvas de variação de eficiência de módulos fotovoltaicos de maneira empírica. Ruschel et al., 2016, a partir da medição da curva I-V de 27 módulos de silício cristalino em 20 diferentes níveis de irradiância, obtiveram como ajuste mais adequado a Equação 2.4, com os coeficientes  $a_1 = 9,53 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_2 = -3,8 \cdot 10^{-2}$  e  $a_3 = 2,37 \cdot 10^{-2}$ . A limitação dessa proposição reside na falta de generalidade dos coeficientes, que variam conforme o modelo de módulo fotovoltaico considerado.

$$\eta(G) = \frac{G^*}{G^* + (a_1 + a_2 G^* + a_3 G^{*2})} \quad (2.4)$$

La Parra et al., 2017 compararam o desempenho de diversas formulações do modelo de máxima potência e do modelo de um diodo, concluindo que os modelos de máxima potência com apenas 3 variáveis independentes podem ser suficientes para uma boa representação do comportamento de módulos fotovoltaicos. Contudo, os modelos de máxima potência possuem como desvantagem fornecer apenas a potência produzida, sem informações sobre a tensão e a corrente do sistema. Assim, este não é adequado para o estudo de algumas condições operativas do sistema, como a adequação de um arranjo fotovoltaico a determinado inversor, valores máximos de tensão e corrente do sistema ou condições especiais de operação, como o deslocamento do ponto de operação da curva I-V realizada pelo inversor para corte de potência.

## 2.2. Modelo de um e dois diodos

Diferentemente do modelo de máxima potência, baseado na relação direta entre entrada de irradiância e saída de potência, os modelos de um e dois diodos se propõem a descrever o comportamento de células fotovoltaicas a partir da teoria dos semicondutores. Existem modelos com diversos níveis de complexidade, requerendo mais ou menos dados de entrada.

### 2.2.1. Modelo de um diodo de quatro parâmetros

Segundo a teoria de semicondutores, uma célula fotovoltaica ideal seria representada por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo. Utilizando a formulação de diodo proposta por Shockley, 1950, obtém-se que a relação entre tensão e corrente é dada pela Equação 2.5.

$$I = I_{fg} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

Nesta equação,  $I_{fg}$  é a corrente fotogerada,  $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro,  $n$  representa o fator de idealidade do diodo,  $q$  é a carga de um elétron, de  $-1,602 \cdot 10^{-19}$  C,  $V$  a tensão na célula, em volts,  $k$  a constante de Boltzmann, de  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K, e  $T$  a temperatura absoluta da célula, em K.

Tal modelo ideal apresenta um desvio significativo em relação ao comportamento de células reais. Para representação das resistências dos contatos elétricos e dos materiais que compõem as células, adiciona-se então ao circuito ideal uma resistência em série, obtendo-se, então, o modelo de um diodo de quatro parâmetros. Uma célula é representada por uma fonte de corrente, um diodo e uma resistência em série, segundo o circuito mostrado na Figura 2.1.

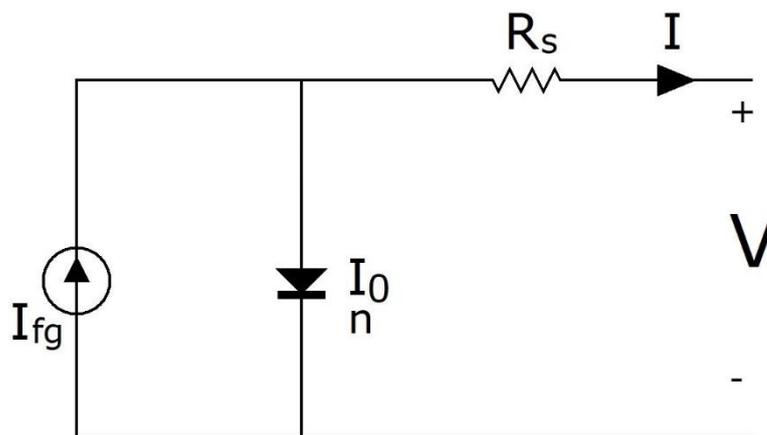


Figura 2.1 – Circuito do modelo de um diodo de quatro parâmetros

Os 4 parâmetros a serem determinados são  $I_{fg}$ ,  $I_0$ ,  $n$ , e a resistência série,  $R_s$ . A representação de um módulo fotovoltaico é similar àquela de uma célula, considerando que módulos são compostos de células conectadas em série. Tipicamente os modelos consideram os parâmetros

para o módulo completo, sendo seu comportamento do módulo dado pela Equação 2.6, onde o termo  $N_s$  representa o número de células em série no módulo.

$$I = I_{fg} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{N_s n k T} \right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

A vantagem desse modelo em relação ao modelo de máxima potência é fornecer não apenas a potência produzida, mas a curva I-V completa, e este é utilizado por diversos autores como Xiao et al., 2004 e Chenni et al., 2007. Entretanto, foi demonstrado que esse modelo apresenta resultados inferiores em determinadas condições de operação. Celik et al., 2007 comparam a produção de um sistema fotovoltaico por 5 dias com os resultados de dois modelos de um diodo, um de quatro parâmetros e um de cinco parâmetros. É demonstrado que o primeiro é pouco eficaz em representar o comportamento do sistema, em especial próximo ao meio dia solar, quando a maior parte da energia é produzida, com o segundo apresentando maior concordância.

### 2.2.2. Modelo de um diodo de cinco parâmetros

Para uma melhor representação do comportamento de módulos fotovoltaicos, o modelo de cinco parâmetros considera uma variável adicional, a resistência paralela. Assim, o circuito equivalente é dado pela Figura 2.2.

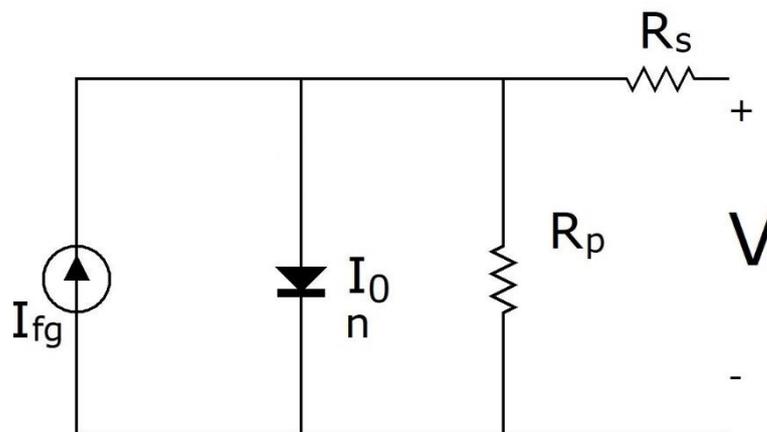


Figura 2.2 – Circuito do modelo de um diodo de cinco parâmetros

A inclusão de um parâmetro adicional traz maiores dificuldades na definição dos parâmetros do modelo, mas em geral considera-se que o ganho de precisão obtido justifica a

maior complexidade. A equação que descreve a curva I-V para um módulo fotovoltaico é dada então pela Equação 2.7.

$$I = I_{fg} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{N_s n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.7)$$

A resistência paralela representa os caminhos alternativos para os elétrons e lacunas livres gerados pela radiação solar. Breitenstein et al., 2004 apresentam um estudo por meio de termografia a fim de investigar e classificar diferentes tipos de defeito *shunt*. Os autores argumentam que a maior parte dos caminhos alternativos são induzidos no processo de fabricação, tais como rachaduras, buracos ou partículas de alumínio. Em um trabalho posterior, Breitenstein et al., 2007 apresentam uma análise detalhada da natureza física dos *shunts*. Reconhece-se que embora apresente desempenho superior ao modelo de quatro parâmetros, o modelo apresenta baixa precisão em menores níveis de irradiância [Ishaque et al., 2011].

Há diferentes propostas de como se obter os cinco parâmetros para a utilização da Equação 2.7. Ainda, é importante notar que qualquer que seja o método utilizado para obtenção dos parâmetros, estes são válidos, a princípio, apenas para a condição na qual foram obtidos. Um modelo completo necessita ainda descrever o comportamento de cada um dos cinco parâmetros com a variação da temperatura e da irradiância. Alguns dos principais modelos são apresentados a seguir.

### 2.2.2.1. Modelo de Krenzinger

O modelo proposto em Krenzinger, 1994 utiliza apenas os pontos de curto-circuito, máxima potência e circuito aberto dos módulos, apresentados nos catálogos dos fabricantes, para obtenção dos 5 parâmetros. Para  $I_0$ , utiliza-se a Equação 2.8, pressupondo que  $I_{fg}$  corresponde à corrente de curto circuito  $I_{sc}$  do dispositivo.

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{\exp \left( \frac{qV_{oc}}{N_s n k T} \right) - 1} \quad (2.8)$$

Além disso, utiliza-se a o fato de que no ponto de máxima potência da curva característica do módulo a derivada da potência em relação à tensão é nula, conforme induz a Equação 2.9.

$$\left. \frac{\partial [I(V)V]}{\partial V} \right|_{V=V_{mp}} = 0 \quad (2.9)$$

Utilizando a equivalente matemática apresentada na Equação 2.10:

$$\frac{\partial [I(V)V]}{\partial V} = V \frac{\partial I(V)}{\partial V} + I \quad (2.10)$$

verifica-se a igualdade da Equação 2.11.

$$\left. \frac{\partial I(V)}{\partial V} \right|_{V=V_{mp}} = -\frac{I_{mp}}{V_{mp}} \quad (2.11)$$

Ainda, derivando-se a corrente em relação à tensão na Equação 2.7, demonstra-se a Equação 2.12.

$$\frac{\partial I(V)}{\partial V} = \frac{\frac{qI_0}{N_s nkT} \exp\left\{\frac{q[V + I(V)R_s]}{N_s nkT}\right\} + \frac{1}{R_p}}{\frac{-qI_0 R_s}{N_s nkT} \exp\left\{\frac{q[V + I(V)R_s]}{N_s nkT}\right\} - \frac{R_s}{R_p} - 1} \quad (2.12)$$

Assim, substitui-se a expressão dada pela Equação 2.12 no lado direito da Equação 2.11 e obtém-se a Equação 2.13.

$$R_p = \frac{V_{mp} - I_{mp}R_s}{\frac{qI_0}{N_s nkT} \left\{ [I_{mp}R_s - V_{mp}] \exp\left[\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{N_s nkT}\right] \right\} + I_{mp}} \quad (2.13)$$

Substituindo a Equação 2.13 na equação do modelo de um diodo, Equação 2.7, é obtida a Equação 2.14.

$$R_s = \left\{ \frac{\left(\frac{V_{mp}}{I_{mp}}\right) - R_s}{\left[\frac{qI_0}{N_s n k T} (I_{mp} R_s)\right] \left[\exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp} R_s)}{N_s n k T}\right)\right] + I_{mp}} \right\} \left\{ I_{fg} \right. \\ \left. - I_{mp} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp} R_s)}{N_s n k T}\right) - 1 \right] \right\} - \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2.14)$$

Um valor inicial de  $n$  é obtido pelas Equações 2.15 e 2.16, sendo a primeira dependente das informações de catálogo do módulo, e a segunda obtida experimentalmente.

$$FF = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.15)$$

$$n = 2,8 - 2,3FF \quad (2.16)$$

Posteriormente, por um processo iterativo são obtidos os valores de  $R_s$ ,  $R_p$  e  $n$  para cada módulo. Para isto, as Equações 2.8, 2.13 e 2.14 são repetidas, permitindo-se pequenas variações em  $n$  entre 1 e 2, até formar um conjunto de parâmetros  $R_s$ ,  $R_p$  e  $n$  que solucionem a Equação 2.7 de forma que o ponto de máxima potência seja correspondente ao informado no catálogo.

Depois de obtidos os parâmetros  $R_s$ ,  $R_p$  e  $n$ , estes são mantidos constantes para quaisquer condições de irradiância e temperatura do módulo. Contudo, o parâmetro  $I_0$  é recalculado, modificando-se  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  a partir dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  que representam, respectivamente, a variação da corrente de curto-circuito com a temperatura e a variação da tensão de circuito aberto com a temperatura, usualmente dados nos catálogos dos módulos, e aplicando-se a Equação 2.8.

#### 2.2.2.2. Modelo de De Soto et al.

No modelo proposto por De Soto et al., 2006 as 3 primeiras equações para a obtenção dos 5 parâmetros são derivadas dos pontos de curto-circuito, circuito aberto e máxima potência, presentes nos catálogos dos fabricantes, Equações 2.17, 2.18 e 2.19.

$$I_{sc} = I_{fg} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{N_s n k T}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_p} \quad (2.17)$$

$$0 = I_{fg} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s n k T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (2.18)$$

$$I_{mp} = I_{fg} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{N_s n k T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_p} \quad (2.19)$$

Dado que para o ponto de máxima potência, a derivada em relação a potência é nula, tem-se a Equação 2.20.

$$\frac{d(IV)}{dV}\Big|_{mp} = I_{mp} - V_{mp} \frac{dI}{dV}\Big|_{mp} = 0 \quad (2.20)$$

Sendo a derivada da corrente em relação à tensão no ponto de máxima potência é dada pela Equação 2.21.

$$\frac{dI}{dV}\Big|_{mp} = \frac{\frac{-I_0 q}{N_s n k T} \exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{N_s n k T}\right) - \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{I_0 R_s q}{N_s n k T} \exp\left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{N_s n k T}\right) + \frac{R_s}{R_p}} \quad (2.21)$$

A quinta equação necessária é obtida a partir da definição do coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto,  $\beta$ .

$$\beta = \frac{\partial V}{\partial T}\Big|_{I=0} \approx \frac{V_{oc,ref} - V_{oc,T}}{T_{ref} - T} \quad (2.22)$$

Para resolver a Equação 2.22, e por consequência o sistema proposto, é necessário conhecer o comportamento da tensão de circuito aberto com a temperatura. A tensão de circuito aberto para uma temperatura diferente da de referência pode ser obtida da Equação 2.8, desde que se conheça as dependências dos parâmetros  $I_{fg}$ ,  $I_0$  e  $n$  com a temperatura. Enquanto  $n$  é assumido como independente da temperatura, os comportamentos dos demais parâmetros são dados pelas Equações 2.23 e 2.24.

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = [T^*]^3 \exp \left[ \frac{1}{k} \left( \frac{E_g}{T} \Big|_{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \Big|_T \right) \right] \quad (2.23)$$

$$I_{fg} = G^* AM^* [I_{fg,ref} + \alpha_{isc}(T - T_{ref})], \quad (2.24)$$

onde  $E_g$  é a energia da banda proibida do material semiconductor, que, no caso do Silício, por sua vez possui também possui uma dependência com a temperatura [Van Zeghbroeck, 2004], dada pela Equação 2.25,  $S$  é a irradiância absorvida pelo módulo, e  $AM^*$  o coeficiente modificador pela massa de ar, e  $T^*$  a temperatura, estes dois últimos adimensionalizados por seus valores de referência.

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - 0,0002677(T - T_{ref}) \quad (2.25)$$

Com relação à irradiância, além da dependência de  $I_{fg}$ , descrita na Equação 2.24, a resistência paralela,  $R_p$ , varia conforme a Equação 2.26. Os demais parâmetros,  $n$ ,  $I_0$  e  $R_s$  são tratados como constantes em relação à irradiância.

$$\frac{R_p}{R_{p,ref}} = \frac{1}{G^*} \quad (2.26)$$

A proposição da Equação 2.26 é justificada com referência a Schroeder, 1998, que indica que esta é válida para irradiâncias consideradas pelo autor como muito baixas, e pela observação da inclinação da curva I-V na região de curto circuito em alguns módulos medidos, que indica que a resistência paralela cresce para menores irradiâncias.

### 2.2.2.3. Modelo de Lo Brano et al.

Os cinco parâmetros do modelo de Lo Brano et al., 2010 são obtidos a partir do sistema de equações composto pelas Equações 2.17, 2.18 e 2.19, em conjunto com as Equações 2.27 e 2.28.

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}} = \frac{\frac{-I_0 q}{N_s n k T} \exp\left(\frac{q(I_{sc} R_s)}{N_s n k T}\right) - \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{I_0 R_s q}{N_s n k T} \exp\left(\frac{q(I_{sc} R_s)}{N_s n k T}\right) + \frac{R_s}{R_p}} = -\frac{1}{R_{p0}} \quad (2.27)$$

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=0} = \frac{\frac{-I_0 q}{N_s n k T} \exp\left(\frac{q(V_{oc})}{N_s n k T}\right) - \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{I_0 R_s q}{N_s n k T} \exp\left(\frac{q(V_{oc})}{N_s n k T}\right) + \frac{R_s}{R_p}} = -\frac{1}{R_{s0}} \quad (2.28)$$

Onde  $R_{p0}$  e  $R_{s0}$  são, respectivamente, os inversos das inclinações da curva I-V nas regiões de curto circuito e circuito aberto. Para resolver esse sistema de equações, os autores utilizaram um algoritmo baseado em um duplo processo acoplado de tentativa e erro para os parâmetros  $R_s$  e  $n$ . Para iniciar o processo, é necessário utilizar as condições das Equações 2.29 e 2.30:

$$I_{fg,ref} = I_{sc,ref} \quad (2.29)$$

$$R_p = R_{p0} \quad (2.30)$$

Que são obtidas a partir das inequações 2.31 e 2.32, que são usualmente satisfeitas.

$$R_s \ll R_p \quad (2.31)$$

$$\frac{I_0 q}{N_s n k T} \exp\left(\frac{q(I_{sc} R_s)}{N_s n k T}\right) \ll \frac{1}{R_p} \quad (2.32)$$

Após os valores iniciais de  $R_s$  e  $n$  serem obtidos, pelas Equações 2.29 e 2.30, a corrente  $I_0$ , a fotocorrente  $I_{fg}$ , e a resistência  $R_p$  são calculadas com as Equações 2.19, 2.17 e 2.27. Logo, com a Equação 2.18, o valor de  $n$  é recalculado e o processo repetido até a convergência. Então,  $R_s$  é reavaliado com a Equação 2.28, e após alterá-lo, recomeça-se as iterações de  $n$ , e o processo é repetido até a convergência de ambos os parâmetros.

A equação base do modelo de um diodo proposto por Lo Brano et al., 2010 possui algumas diferenças em relação ao original, sendo dada por:

$$I(G^*, T) = G^* I_{fg}(T) - I_0(G^*, T) \left[ \exp \left( \frac{q \left[ G^* (V + KI(T - T_{ref})) \right] + IR_s}{G^* N_s n k T} \right) - 1 \right] - \frac{G^* [V + KI(T - T_{ref})] + IR_s}{R_p} \quad (2.33)$$

Em relação ao comportamento dos parâmetros com a irradiância e com a temperatura,  $I_{fg}$  é dependente apenas da temperatura (já que o valor da irradiância o multiplica de maneira explícita),  $I_0$ , varia tanto com  $G$  quanto com  $T$ , e  $n$  é tratado como constante. Já os parâmetros  $R_s$  e  $R_p$ , embora sejam constantes na Equação 2.33, trata-se de manipulação algébrica, já que estes acabam se comportando como se, na equação do modelo de um diodo original, Equação 2.7, fossem considerados como inversamente proporcional à irradiância, como na Equação 2.26 do modelo de De Soto et al., 2006. A constante  $K$  é obtida experimentalmente e tem a função de ajuste das características da curva I-V em função da temperatura.

Para a dependência de  $I_{fg}$  com a temperatura, propõe-se a Equação 2.34.

$$I_{fg}(T) = I_{fg,ref} + \alpha(T - T_{ref}) \quad (2.34)$$

Já  $I_0$  depende da irradiância e da temperatura, segundo a Equação 2.35.

$$I_0(G^*, T) = G^* \left( \frac{(I_{fg}(T) - V_{oc}(G^*, T)/R_{sh})}{\exp(qV_{oc}(G^*, T)/N_s n k T) - 1} \right) \quad (2.35)$$

Para avaliação desse termo a qualquer irradiância, propõe-se como aproximação utilizar a Equação 2.36.

$$I_0(G^*, T) = \exp \left[ \left( \frac{G^* - 0,2}{1 - 0,2} \right) \ln \frac{I_0(1, T)}{I_0(0,2, T)} + \ln I_0(0,2, T) \right] \quad (2.36)$$

Esta é obtida a partir da interpolação linear do comportamento proposto para  $I_0$  na Equação 2.35 em duas condições de irradiância, de 1000 W/m<sup>2</sup> e 200 W/m<sup>2</sup>. Para tanto, é necessário obter os valores de  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  nessas condições, a partir das Equações 2.34 e 2.37.

$$V_{oc}(G^*, T) = V_{oc,ref}(G^*) + \beta(T - T_{ref}) \quad (2.37)$$

Ainda, o termo  $K$  na Equação 2.33 tem a função de deslocar as características da curva I-V à temperatura  $T_{ref}$  a temperaturas diferentes da de referência. Este é obtido impondo que a máxima potência calculada à uma temperatura  $T'$  com a Equação 2.33 seja igual àquela informada pelo fabricante nesta temperatura. Tal imposição resulta na Equação 2.38.

$$K = \frac{V_{mp} - V'_{mp}}{I'_{mp}(T' - T_{ref})} \quad (2.38)$$

No artigo em que o modelo é proposto, a temperatura  $T'$  selecionada foi de 75°C.

#### 2.2.2.4. Modelo de Orioli e Di Gangi

O modelo de Orioli e di Gangi, 2013, assim como o proposto por Lo Brano et al., 2010, utiliza a Equação 2.33 para modelar o comportamento de módulos fotovoltaicos. O sistema de equações resolvido também é similar, contendo as Equações 2.17, 2.18, 2.19, 2.27 e 2.28 assumindo as simplificações das Equações 2.29 e 2.30. Como diferença fundamental, não são utilizadas as inclinações da curva para se obter os valores de  $R_{s0}$  e  $R_{p0}$ , sendo propostas duas Equações, 2.39 e 2.40, para descrevê-los.

$$R_{s0} = C_s \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.39)$$

$$R_{p0} = C_p \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.40)$$

Com valores propostos de  $C_s = 0,11175$  e  $C_p = 34,4962$  baseados nas informações de 144 módulos fotovoltaicos de 30 diferentes fabricantes.

As dependências dos parâmetros com a irradiância e temperatura seguem comportamentos similares aos propostos no modelo de Lo Brano et al., 2010, Equações 2.26, 2.34, 2.35,  $R_s$  inverso com a irradiância, assim como  $R_p$ , e  $n$  constante. Contudo, para a tensão de circuito aberto, propõe-se a Equação 2.41.

$$V_{oc}(G^*, T) = V_{oc,ref} + \{C_1 \ln(G^*) + C_2 [\ln(G^*)]^2 + C_3 [\ln(G^*)]^3\} + \beta(T - T_{ref}) \quad (2.41)$$

Com as constantes  $C_1 = 5,468511 \cdot 10^{-2}$ ,  $C_2 = 5,973869 \cdot 10^{-3}$  e  $C_3 = 7,616178 \cdot 10^{-4}$  tendo sido obtidas a partir de dados de 108 módulos de 23 fabricantes.

Assim, o modelo de Orioli e di Gangi, 2013 utiliza uma formulação bastante similar ao de Lo Brano et al., 2010. A principal diferença, que os autores destacam como vantagem, é que, com o uso de correlações empíricas para  $R_{s0}$ ,  $R_{p0}$  e  $V_{oc}(G^*, T)$ , o modelo pode ser definido apenas com dados presentes nos catálogos dos fabricantes, dispensando a medição da curva I-V ou o uso de curvas apresentadas nos catálogos, por considerar-se que seu uso pode trazer incertezas ao processo.

#### 2.2.2.5. Modelo de Villalva et al.

O modelo de Villalva et al., 2009 utiliza a equação padrão do modelo de um diodo, Equação 2.7, propondo modificações apenas no comportamento dos parâmetros com a irradiância e a temperatura, e um método alternativo de obtenção dos parâmetros. A corrente fotogerada, de forma similar aos demais modelos, é considerada linearmente variável com ambas as condições. Para  $I_0$ , é proposta a Equação 2.42, e uma dependência com a temperatura dada pela Equação 2.43.

$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{qV_{oc,ref}}{N_s n k T}\right) - 1} \quad (2.42)$$

$$I_0(T) = \frac{I_{sc,ref} + \alpha(T - T_{ref})}{\exp\left(q\left(V_{oc,ref} + \beta(T - T_{ref})\right)/N_s n k T\right) - 1} \quad (2.43)$$

Os autores afirmam que, por depender dos valores dos demais parâmetros do modelo, qualquer valor de  $n$  pode ser estimado inicialmente, recomendando-se que esteja entre 1 e 1,5. Posteriormente é possível otimizar tal estimativa a partir de algoritmos de ajuste, caso se julgue necessário.

As resistências  $R_s$  e  $R_p$  são determinadas a partir da restrição de que a potência máxima da curva I-V modelada com a Equação 2.7 deve ser igual àquela apresentada no catálogo do

fabricante, assim como os valores de tensão e corrente nesse ponto. É realizado então, um processo iterativo, que utiliza as Equações 2.44 e 2.45.

$$P_{mp,m} = V_{mp} \left\{ I_{fg} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{N_s n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \right\} \\ = P_{mp,e} \quad (2.44)$$

$$R_p = \frac{V_{mp}(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{\left\{ V_{mp}I_{fg} - V_{mp}I_0 \exp \left[ \frac{q(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{N_s n k T} \right] + V_{mp}I_0 - P_{mp} \right\}} \quad (2.45)$$

O algoritmo para encontrar os parâmetros começa utilizando as Equações 2.29 e 2.42 para obtenção de  $I_{fg}$  e  $I_0$ , enquanto o valor de  $n$  é arbitrado. Faz-se  $R_s = 0$ , e o  $R_p$  inicial é dado pela Equação 2.46.

$$R_{p,min} = \frac{V_{mp}}{I_{sc,ref} - I_{mp}} - \frac{V_{oc,ref} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2.46)$$

Calcula-se, então, a diferença entre o  $P_{mp}$  obtido pela Equação 2.44, com os parâmetros do modelo, e compara-se este com o valor dado no catálogo do fabricante. Caso esse esteja abaixo do limiar estabelecido de erro, encerra-se o procedimento. Caso contrário, recalcula-se  $I_{fg}$  conforme a Equação 2.47.

$$I_{fg} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc} \quad (2.47)$$

Posteriormente,  $R_p$  é recalculado com a Equação 2.45, calcula-se a curva I-V com a Equação 2.7, e sua potência máxima correspondente, a qual é comparada com a potência máxima do catálogo,  $R_s$  é incrementado e, caso o desvio ainda esteja acima do desejado, o procedimento é repetido até a convergência.

Após encontrados os 5 parâmetros,  $R_s$ ,  $R_p$  e  $n$  são tratados como constantes,  $I_0$  é constante com a irradiância, variando apenas com a temperatura, conforme Equação 2.43 e  $I_{fg}$  é diretamente proporcional à irradiância, e cresce com a temperatura segundo o fator  $\alpha$ .

### 2.3. Influência dos parâmetros no modelo de um diodo

Sendo um objetivo desse trabalho o aprimoramento do modelo de um diodo, apresenta-se, para melhor compreensão do comportamento deste em relação a cada parâmetro, um estudo da influência da curva I-V a partir da variação de cada um destes.

#### 2.3.1. Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ )

Um incremento em  $I_{fg}$  leva a um aumento proporcional na corrente na curva I-V. Sendo este proporcional, o efeito é mais acentuado próximo à região de curto-circuito, conforme demonstrado na Figura 2.3. A tensão de circuito aberto cresce, sendo esse aumento logarítmico para módulos com resistências paralelas elevadas. Para resistências paralelas mais baixas, o crescimento da tensão é menor, devido ao último termo da Equação 2.7.

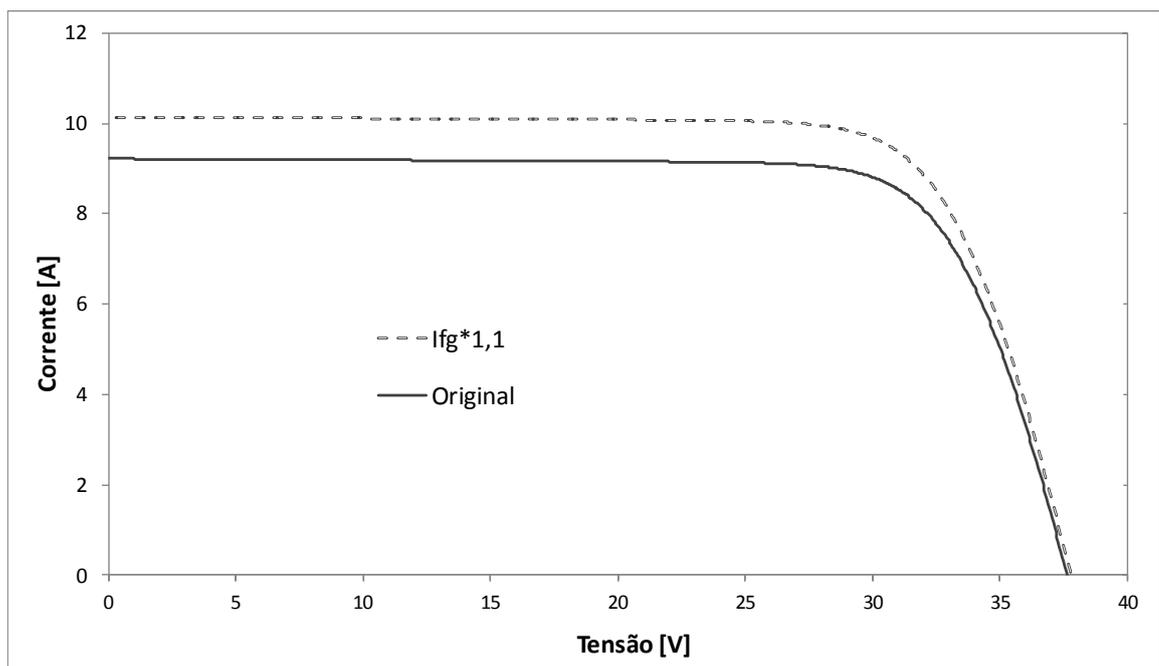


Figura 2.3 - Comportamento da curva I-V com a variação de  $I_{fg}$

#### 2.3.2. Fator de idealidade do diodo ( $n$ )

Conforme a Equação 2.7 do modelo de um diodo, o termo  $I_0$  faz parte do termo corrente no diodo, que reduz a corrente fotogerada em função da tensão aplicada aos terminais e da própria corrente. A corrente no diodo,  $I_d$ , é dada pela Equação 2.48.

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{N_s n k T}\right) - 1 \right] \quad (2.48)$$

O numerador é positivo praticamente toda a curva I-V, pois os valores de  $V$  são em geral mais elevados que o produto de  $I_{sc}$  por  $R_s$ . Nesse intervalo, quanto maior o  $n$ , menor a corrente no diodo, e, portanto, menor a perda. Ainda, a contribuição da corrente do diodo só é significativa na faixa de tensões mais altas, depois do “joelho” da curva. Por esse motivo, a diferença causada pela variação de  $n$  só é visível para maiores tensões, conforme ilustrado na Figura 2.4.

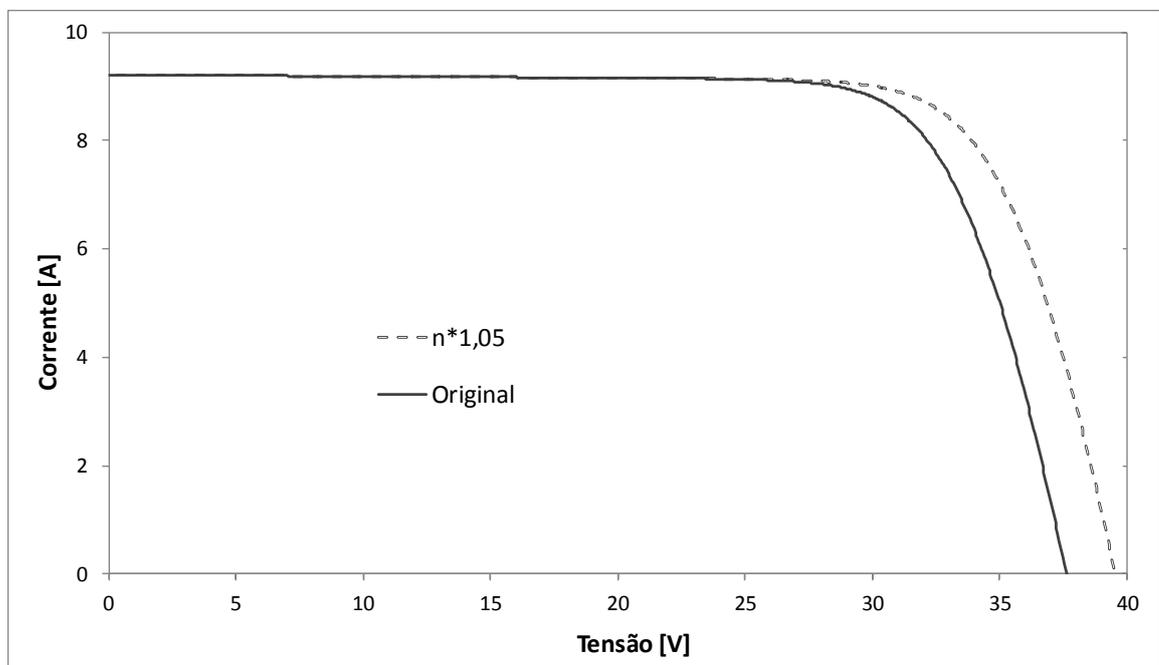


Figura 2.4 - Comportamento da curva I-V com a variação de  $n$

### 2.3.3. Corrente de saturação reversa no escuro ( $I_0$ )

A análise para  $I_0$  é semelhante à de  $n$ . A diferença é que um aumento de  $I_0$  causa um aumento proporcional da corrente do diodo, e, portanto, mais perdas em todos os pontos da curva I-V. Novamente, como a corrente do diodo só é significativa na faixa de tensão mais alta, não é visível nenhuma alteração nas proximidades de  $I_{sc}$ , comportamento mostrado na Figura 2.5.

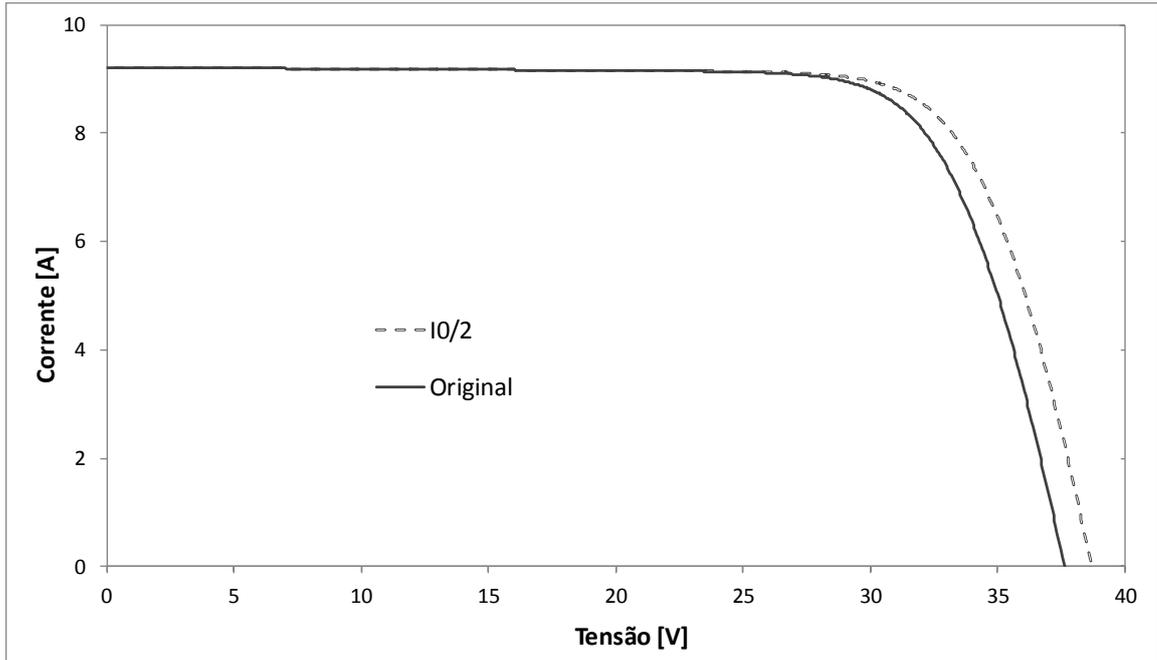


Figura 2.5 - Comportamento da curva I-V com a variação de  $I_0$

#### 2.3.4. Resistência paralela ( $R_p$ )

A resistência paralela entra no terceiro termo da Equação 2.7, sendo denominador da expressão  $-(V + I.R_s)$ . Uma redução nessa resistência aumenta esse termo, incrementando as perdas do módulo. O efeito é mais visível nas faixas da curva onde o numerador é mais elevado, o que faz com que a curva fique menos inclinada na região de  $I_{sc}$  em módulos com  $R_p$  mais elevado, ilustrado pela Figura 2.6.

O efeito de uma baixa resistência paralela é ainda mais drástico em níveis de irradiância mais baixos. A Figura 2.7 demonstra essa diferença, repetindo a análise da Figura 2.6 mas para um módulo sujeito a um nível de irradiância de  $100 \text{ W/m}^2$ , ao invés de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Percebe-se que, mesmo para o caso “Original”, a inclinação no caso de menor irradiância já é aparentemente maior do que no caso base a  $1000 \text{ W/m}^2$ . Trata-se de um efeito visual, já que as escalas de corrente em ambos os gráficos são bastante distintas. Fica visível também o fato de que, a baixas irradiâncias, eventuais erros no valor de  $R_p$  têm uma influência muito maior no modelo, podendo alterar significativamente o ponto de máxima potência, considerando em termos relativos.

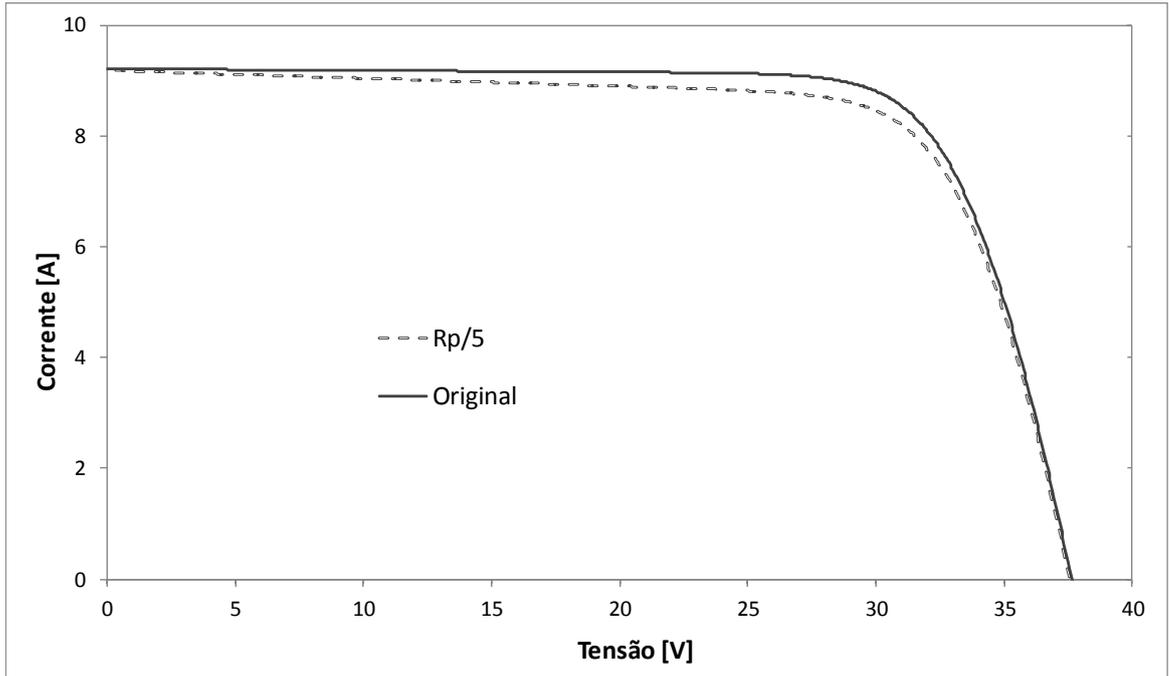


Figura 2.6 – Efeito da resistência paralela na curva I-V com  $G = 1000 \text{ W/m}^2$

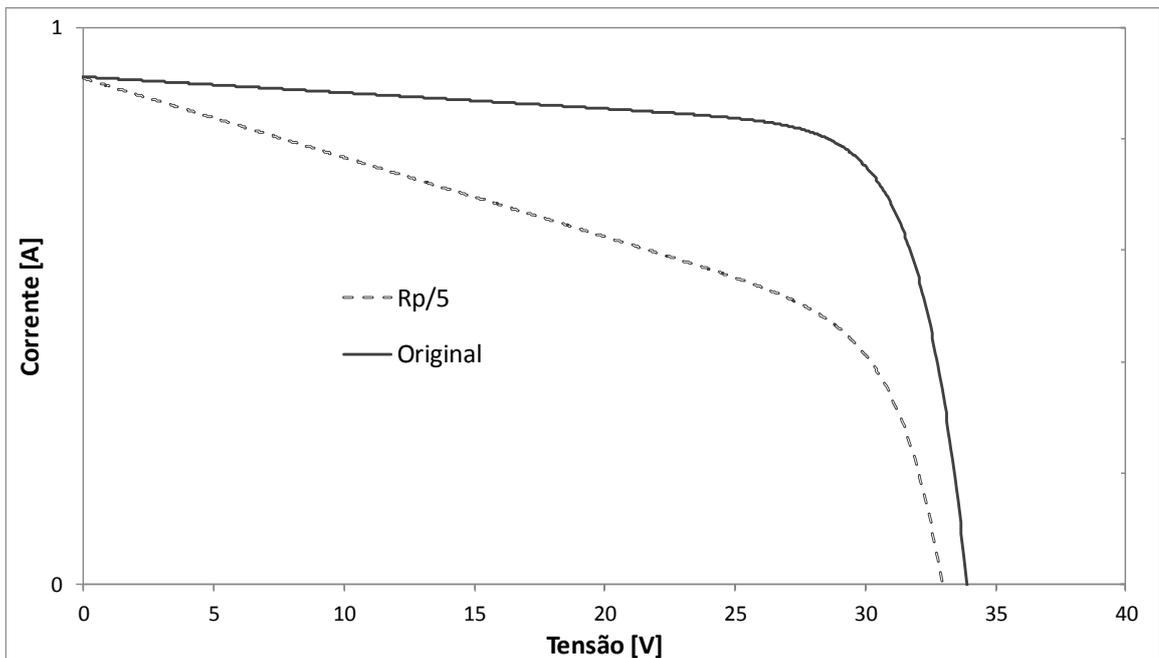


Figura 2.7 - Efeito da resistência paralela na curva I-V com  $G = 100 \text{ W/m}^2$

### 2.3.5. Resistência série ( $R_s$ )

O efeito da resistência série é mais complexo de ser descrito analiticamente, pois esta aparece em dois termos da Equação 2.7. Contudo, em ambos esta aparece multiplicando a corrente, e, portanto, seu aumento leva a um incremento nas perdas. A Figura 2.8 mostra

graficamente o efeito do aumento de  $R_s$  na curva, indicando uma redução na potência especialmente na região próxima ao “joelho” da curva, ou seja, próximo ao ponto de máxima potência. Os efeitos são mínimos para a faixa de tensão de 0 a cerca de 80% da tensão do ponto de máxima potência, e novamente nulos na tensão de circuito aberto.

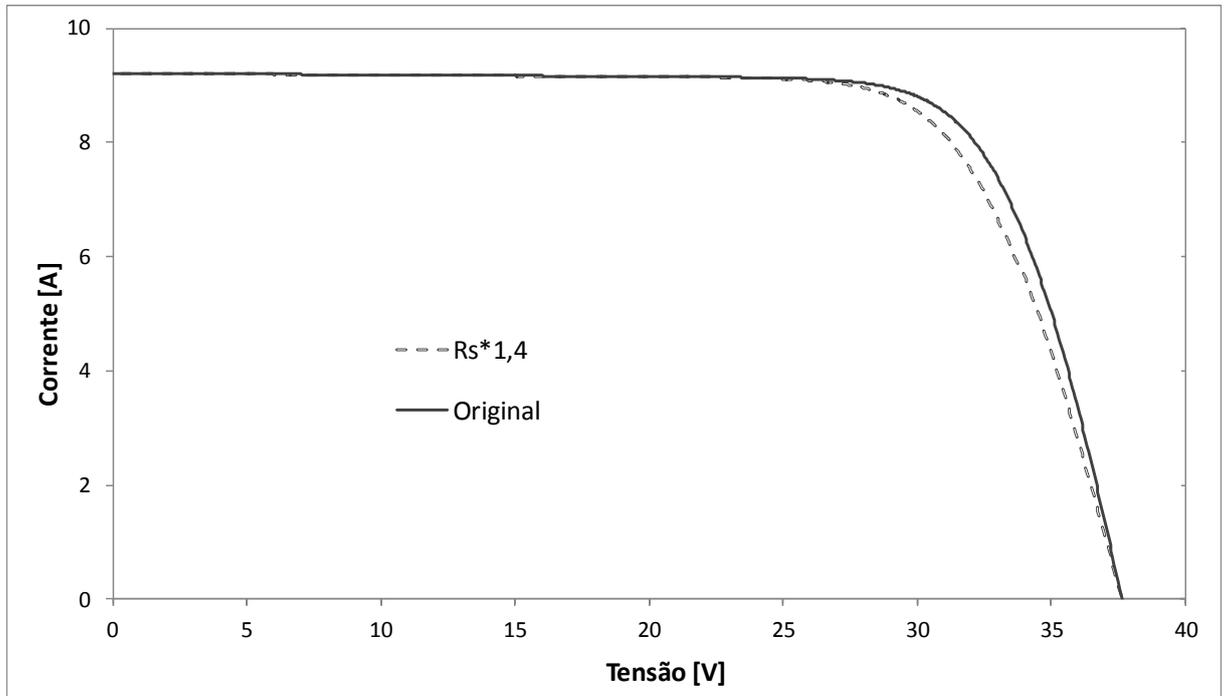


Figura 2.8 – Comportamento da curva I-V com a variação de  $R_s$

## 2.4. Variação dos parâmetros com a irradiância

Conforme pôde-se notar na seção 2.2, há diferentes abordagens para o modelo de um diodo de 5 parâmetros. Uma diferença importante entre estes é a consideração da variação de cada um dos parâmetros com o nível de irradiância recebido pelos módulos. Essa seção sintetiza o tratamento dado a cada um dos 5 parâmetros na literatura.

### 2.4.1. Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ )

A maioria dos modelos considera que a corrente fotogerada depende linearmente da irradiância, de forma diretamente proporcional. O modelo de De Soto et al., 2006 destaca na Equação 2.24 que a irradiância a ser considerada para essa dependência é a irradiância efetiva, já incluindo os efeitos de modificação espectral pelo *air mass* e do ângulo de incidência. No

modelo proposto por Dongue et al., 2013 propõe-se que a variação de  $I_{fg}$  com a irradiância seja em função de um expoente determinado empiricamente, que é utilizado também para descrever variações de  $R_s$  e  $R_p$  com a irradiância, mas estes de forma inversa. Contudo, no trabalho onde se apresenta este modelo o coeficiente calculado é muito próximo de um para os três módulos testados, sendo de 0,984 para um módulo monocristalino, 0,996 para um policristalino e 0,998 para um módulo CIGS.

#### 2.4.2. Fator de idealidade do diodo ( $n$ )

Na modelagem, o fator de idealidade do diodo,  $n$ , é assumido como constante com a irradiância por praticamente todos os autores. Em trabalhos experimentais, entretanto, ao extrair tal parâmetro para curvas a diferentes irradiâncias observa-se comportamentos distintos. Bashahu e Nkundabakura, 2007, em um trabalho de revisão de métodos de extração de  $n$ , sugerem que o valor experimental de  $n$  é maior ao se obtê-lo da curva de um módulo iluminado do que de um no escuro, e apontam que outros autores também observaram  $n$  crescente com a irradiância. Bätzner et. al., 2001, utilizando um método de *curve-fitting* obtêm resultado semelhante para módulos de telureto de cádmio (CdTe) e arseneto de gálio (GaAs), porém verificam comportamento inverso ( $n$  decrescente) para silício cristalino. Também para células de filmes finos, de CdS/CuInSe<sub>2</sub>, Sites e Mauk, 1989 demonstraram que o fator  $n$  aumenta de forma aproximadamente linear com o nível de irradiância.

#### 2.4.3. Corrente de saturação reversa ( $I_0$ )

A corrente de saturação reversa  $I_0$  também é considerada fixa em relação à irradiância por muitos autores. Segundo De Soto, 2004,  $I_0$  deve ser vista como invariável por não ter efeito na corrente de curto circuito. O trabalho experimental de Bätzner et al., 2001 aponta  $I_0$  como decrescente com a irradiância para módulos de silício cristalino e crescente para os módulos de CdTe e GaAs, variando diversas ordens de magnitude. Boyd et al., 2011 propõem uma dependência de  $I_0$  com a irradiância segundo um expoente de potência a ser extraído,  $m$ , em um modelo de 7 parâmetros. A Equação 2.49 representa a parcela de dependência de irradiância dessa proposta, ou seja, considerando a temperatura igual à de referência.

$$I_0|_{T_{ref},G} = I_{0,ref} \left( \frac{G_{ref}}{G} \right)^m \quad (2.49)$$

O expoente  $m$  é determinado utilizando-se o ponto de máxima potência a  $200 \text{ W/m}^2$ , e objetiva um melhor ajuste do modelo às condições de baixa irradiância. Contudo, é demonstrado no estudo que os resultados do modelo de 7 parâmetros são similares aos do de 5 parâmetros utilizado como referência, baseado no modelo de De Soto et al., 2006.

O modelo de Lo Brano et al., 2010 considera uma variação de  $I_0$  com a irradiância e com a temperatura, conforme descrito na seção 2.2.2.3. Com relação à irradiância, utiliza-se uma interpolação linear entre os valores obtidos a dois diferentes níveis, sendo sugeridos os valores de  $1000 \text{ W/m}^2$  e  $200 \text{ W/m}^2$ , conforme descrito nas Equações 2.35 e 2.36.

Os valores de  $n$  e  $I_0$  são inter-relacionados, e há diferentes pares  $(n, I_0)$  que fornecem curvas I-V semelhantes. Portanto, o fato de estes serem vistos como dependentes da irradiância em alguns estudos pode derivar do modelo de extração utilizado. Se a cada condição os valores de  $n$  e  $I_0$  puderem variar livremente, há a possibilidade de que os algoritmos utilizados encontrem pares diferentes desses parâmetros a cada extração. Contudo, o fato de muitos modelos considerá-los como fixos pode indicar que resultados semelhantes são obtidos dessa forma. Os efeitos do método de extração serão discutidos em detalhes na seção 4.2.

#### 2.4.4. Resistência paralela ( $R_p$ )

Embora tratado originalmente como um valor constante, estudos mais recentes convergem para a conclusão de que o modelo de um diodo apresenta resultados mais próximos aos verificados experimentalmente quando a resistência paralela é considerada como função da irradiância.

O modelo de De Soto et al., 2006 foi o primeiro a considerar essa variação, indicando uma resistência paralela inversamente proporcional à irradiância, conforme indicado na Equação 2.26, baseado em medições realizadas pelo instituto NIST dos Estados Unidos e em Schroeder, 1998, embora o segundo afirme que esta equação seria válida apenas para irradiâncias muito baixas, nas quais a corrente no diodo é desprezível. Outros autores incorporaram essa proposta em seus modelos, tais como Dongue et al., 2012, e Ma et al., 2014, utilizando a mesma Equação 2.26.

O modelo de Lo Brano et al., 2010 considera da mesma forma a resistência paralela como inversamente proporcional à irradiância, sem, contudo, escrevê-la em uma equação explícita.

A própria definição do modelo, na Equação 2.33 resulta em um comportamento desse tipo, sem que seja necessário alterar o valor de  $R_p$ . Situação semelhante ocorre com o modelo de Orioli & di Gangi, 2013.

O *software* PVSYST, um dos mais utilizados na modelagem de sistemas fotovoltaicos, incorpora outra proposta de variação da resistência paralela com a irradiância. A resistência paralela é calculada a partir da condutância virtual no ponto de máxima potência  $(I_{sc}-I_{mp})/V_{mp}$ , correspondente ao mínimo valor de  $R_p$ , e tomando uma dada fração dessa quantidade para representá-la [PVsyst S.A., 2012]. Para a variação com a irradiância, propõe-se a Equação 2.50.

$$R_p = R_{p,ref} + [R_p(0) - R_{p,ref}] \cdot e^{-5,5G^*} \quad (2.50)$$

Os valores sugeridos para a constante  $R_p(0)$  são de 12 vezes o valor de  $R_p$  para módulos de silício amorfo e de 4 vezes  $R_p$  para módulos cristalinos. É destacado pelos desenvolvedores que tanto a equação proposta quanto os valores de referência foram baseados em poucas medições.

Em trabalhos experimentais, tanto Bätzner et al., 2001, quanto Eikelboom e Reinders, 1997 obtiveram valores de resistências paralelas mais altas para menores níveis de irradiância, embora o segundo estudo tenha utilizado o modelo de dois diodos. Um estudo mais recente, de *Sandia National Laboratories*, 2015 apresenta a comparação da resistência paralela calculada com a Equação 2.26 com aquela extraída da curva I-V para um módulo de silício monocristalino em diversas irradiâncias. A resistência  $R_p$  medida segue a tendência de crescimento em irradiâncias mais baixas, mas apresenta algumas diferenças em relação ao comportamento esperado com a Equação 2.26, do modelo de De Soto et al.

#### 2.4.5. Resistência Série ( $R_s$ )

Ao contrário da resistência paralela, não há um consenso sequer quanto à tendência do comportamento da resistência série em relação à irradiância. Poverini et al., 2012 investigaram e validaram diferentes métodos de determinação da resistência série sob diferentes condições operativas e afirmam que tratá-la como independente da irradiância e da temperatura é uma boa abordagem. Grande parte dos modelos assim o fazem, conforme proposto originalmente na Equação 2.7. De Soto et al., 2006 afirmam que o impacto de  $R_s$  nos resultados é baixo, não justificando uma modelagem mais complexa.

A formulação de Lo Brano et al., 2010, que é utilizada também por Orioli e Di Gangi, 2013, resulta em uma consideração de  $R_s$  inversamente proporcional à irradiância. É importante ressaltar, contudo, que nestes modelos há uma tendência de se obter fatores de idealidade do diodo inferiores a um, o que, ao menos utilizando-se a extração com o modelo analítico, faz com que o comportamento de  $R_s$  tenda a ser similar ao de  $R_{s0}$ . Para o parâmetro  $R_{s0}$ , Reich et al., 2009 demonstraram um comportamento inverso com a irradiância para uma ampla faixa de variação, indicando que na formulação de Lo Brano et al., 2010 pode ser coerente a consideração de um comportamento inversamente proporcional à irradiância para  $R_s$ . Em Townsend, 1989 demonstra-se que é possível derivar-se o valor de  $R_s$  a partir da inclinação da curva I-V, mas utilizando-se, ao invés do ponto de circuito aberto, um ponto com a tensão mais elevada, com correntes negativas.

Em estudos experimentais, há resultados divergentes com relação ao comportamento de  $R_s$  com a irradiância. De Soto, 2004, Chan et al., 1986, e Bätzner et al., 2001 obtiveram valores menores de  $R_s$  para menores irradiâncias, apresentando inclusive em alguns casos valores negativos. O mesmo ocorre no estudo de Eikelboom e Reinders, 1997, sendo que este utiliza para análise um modelo de dois diodos. Já Priyanka et al., 2007 obtiveram um  $R_s$  crescente para irradiâncias mais baixas em um estudo de células monocristalinas. Comportamento semelhante foi obtido nas medições de Bühler, 2011 para módulos de diferentes tecnologias, utilizando diferentes métodos de extração. Por sua vez, Cheegar et al., 2013 obtiveram valores de  $R_s$  praticamente invariantes para irradiâncias entre 1000 W/m<sup>2</sup> e 160 W/m<sup>2</sup>.

Há que se destacar que há influência no valor e no comportamento de  $R_s$  do método de extração utilizado para sua obtenção. Em Chan et al., 1986 são utilizados diferentes métodos de extração para obtenção desse parâmetro, e fica clara a diferença em seus valores. Embora nesse estudo  $R_s$  tenha se reduzido em baixas irradiâncias para todos os métodos, no de *curve-fitting* essa queda foi mais acentuada do que no método analítico. Contudo, tais diferenças não significam necessariamente que algum dos métodos forneça resultados errados, já que os demais parâmetros, em especial  $n$  e  $I_0$  também se alteram, devido à interdependência entre estes. Conforme será discutido na seção 4.2, há diferentes conjuntos de parâmetros que apresentam resultados semelhantes para a curva I-V.

## 2.5. Variação dos parâmetros com a temperatura

De maneira análoga ao apresentado na seção 2.4 para a irradiância, discute-se a seguir as propostas da literatura para a dependência dos parâmetros do modelo de um diodo com a temperatura. São citados trabalhos experimentais de extração dos parâmetros, bem como propostas de modelagem que considerem a variação destes com a temperatura, discutindo os resultados obtidos pelos autores.

### 2.5.1. Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ )

Em geral, a variação considerada para  $I_{fg}$  é de um aumento desse parâmetro com a temperatura, pois a largura da banda proibida do material sofre um decréscimo, e mais fótons possuem energia suficiente para criar pares elétron-lacuna. Esse aumento é em geral pouco significativo, da ordem de 0,05%/°C e é fornecido pelos fabricantes nos catálogos dos módulos no coeficiente  $\alpha$ .

### 2.5.2. Fator de idealidade do diodo ( $n$ )

Para  $n$ , considera-se um valor constante com a temperatura. Alguns autores, ao escrever a equação do modelo de um diodo, definem uma variável  $a = nkT$ , por simplificação de notação. Por esse motivo, certas vezes refere-se que o fator de idealidade do diodo como variável com a temperatura. Contudo, trata-se apenas de uma questão de convenção, já que nesses casos se internaliza a variável  $T$  que aparece de maneira explícita na Equação 2.7, base para diferentes formulações do modelo de um diodo.

Experimentalmente, contudo, diversos autores demonstraram fatores de idealidade de diodo decrescentes com o aumento da temperatura para diodos de silício ou para células fotovoltaicas. Acharya, 2001 demonstrou uma queda aproximadamente linear no fator de idealidade de um diodo de silício para uma ampla faixa de temperaturas, caindo de cerca de 1,1 a temperaturas em torno de 0 °C para cerca de 1,0 a temperaturas superiores a 100 °C. Sites e Mauk, 1989 obtiveram tendência semelhante para células de filmes finos, tanto para medições realizadas no escuro como para medições sob condições de iluminação.

### 2.5.3. Corrente de saturação reversa ( $I_0$ )

Frequentemente, considera-se a variação de  $I_0$  a partir da teoria do diodo. Townsend, 1989 propôs a Equação 2.51 para a obtenção da corrente de saturação reversa de uma célula fotovoltaica, na qual explicitamente aparece a dependência da temperatura.

$$I_0 = DT^3 e^{\frac{qE_g}{nkT}} \quad (2.51)$$

Sendo  $D$  o fator de difusão do diodo, aproximadamente constante,  $E_g$  a energia da banda proibida do material, considerada constante, de 1,12 eV para o silício.

Já o modelo de De Soto et al., 2006, por exemplo, considera a formulação de Messenger e Ventre, 2004, já apresentada na Equação 2.23, repetida nesta seção por facilidade de entendimento.

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = [T^*]^3 \exp \left[ \frac{1}{k} \left( \frac{E_g}{T} \Big|_{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \Big|_T \right) \right] \quad (2.23)$$

Nessa formulação é considerado que a energia do gap, no caso do silício, por sua vez possui também possui uma dependência com a temperatura dada pela Equação 2.25, de Van Zeghbroeck, 2004.

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - 0,0002677(T - T_{ref}) \quad (2.25)$$

Tal proposta resulta em um forte incremento da corrente de saturação reversa com a irradiância, como representado na Figura 2.9, onde o valor de  $I_0$  foi adimensionalizado por seu valor a 25 °C, e o eixo y é apresentado em escala logarítmica.

Conforme se pode inferir da Figura 2.9, nessa faixa de operação, o comportamento de  $I_0$  é aproximadamente exponencial com a temperatura. Resultado semelhante, embora com outra proposta de equação, foi obtido por Acharya, 2001 ao ensaiar um diodo de silício a diferentes temperaturas.

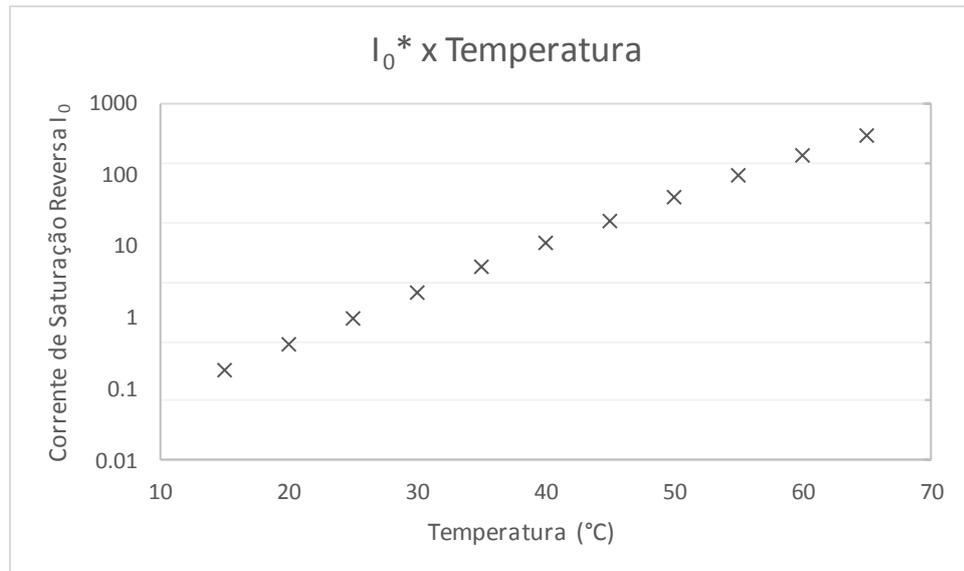


Figura 2.9 – Variação de  $I_0$  com a temperatura no modelo de De Soto et al., 2006

Outra abordagem é a proposta nos modelos de Krenzinger, 1994 e Villalva et al., 2009, nos quais o valor de  $I_0$  é obtido a partir dos pontos de  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ . Assim, para cada valor de temperatura, a corrente de saturação reversa é recalculada, e os valores para  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  ao variar-se a temperatura são obtidos com as correções dadas pelos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  dos catálogos dos fabricantes. O modelo de Lo Brano et al., 2010 segue uma lógica semelhante, recalculando  $I_0$  em função da temperatura, embora neste seja também considerada uma variação com a irradiância, conforme tratado na seção 2.4.3.

#### 2.5.4. Resistência paralela ( $R_p$ )

Embora raros modelos na literatura considerem variações da resistência paralela com a temperatura, alguns trabalhos experimentais sugerem que pode haver alguma relação, sendo esta em geral de queda da resistência paralela com o aumento da temperatura da célula. Cuce et al., 2013, Ghani et al., 2015, Karatepe et al., 2006 e Bensalem e Cheegar, 2013 concordam com essa queda, embora a tendência apresentada varie entre os autores, sendo algumas lineares ou próximas a linear, enquanto em alguns trabalhos a variação apresentada se aproxima mais de inversa. O modelo proposto por Silva et al., 2017, de oito parâmetros, inclui um coeficiente que representa a variação de  $R_p$  com a temperatura, sendo que os 4 módulos testados no estudo apresentaram coeficientes negativos, estando de acordo com os trabalhos experimentais citados.

### 2.5.5. Resistência série ( $R_s$ )

Polverini et al., 2012 investigaram a dependência de  $R_s$  com a irradiância e com a temperatura, e afirmam que, para silício cristalino, embora para boa parte das irradiâncias testadas a resistência série aumente com a temperatura, não é possível tirar uma conclusão clara, e desconsiderar essa eventual dependência parece mais adequado. Cuce et al., 2013, ao contrário, obtiveram quedas lineares para a resistência série com o aumento de temperatura, para um módulo monocristalino e outro policristalino.

Ghani et al., 2015, ao extrair os parâmetros de uma célula de silício monocristalino a 10 temperaturas, variando de 25 °C a 70 °C, demonstraram uma tendência de crescimento linear dessa resistência, sendo o valor a 70 °C cerca de 60% superior ao obtido na condição de referência. Bensalem e Chegaar, 2013 obtiveram tendência semelhante para uma célula policristalina com temperaturas variando entre 15 °C e 50 °C, obtendo-se o valor na temperatura a 50 °C cerca de 70% maior do que aquele na condição STC. Ainda, Karatepe et al., 2006 também demonstram comportamento de crescimento da resistência série com a temperatura, utilizando um método de extração dos 5 parâmetros do modelo de um diodo baseado em redes neurais.

Boyd et al., 2011, em seu modelo de 7 parâmetros, propuseram um efeito exponencial de dependência de  $R_s$  com a temperatura, mas segundo demonstrado no artigo, esse modelo não trouxe ganhos em relação ao modelo de 5 parâmetros utilizado para comparação. O modelo de Silva et al., 2017 propõe que seja utilizado um coeficiente para consideração de resistência série variável com a temperatura, o qual precisa ser extraído para cada módulo a ser modelado. Dentre os testados no estudo, todos apresentaram valores positivos para o coeficiente proposto, embora em um deles o valor tenha sido bastante reduzido, de 0,1%/°C.

## 2.6. Outros modelos

Além dos modelos de máxima potência e de um diodo, há outras alternativas para a modelagem de módulos fotovoltaicos. A mais notável é o modelo de dois diodos, que surge com a proposta de corrigir as deficiências do modelo de um diodo. Neste, como o próprio nome indica, o modelo equivalente possui dois diodos ao invés de um, sendo dado pela Figura 2.10.

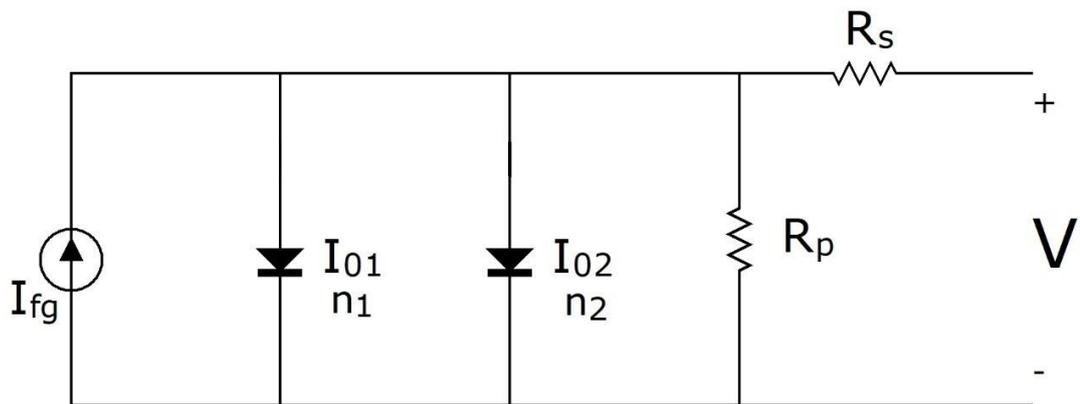


Figura 2.10 – Circuito equivalente do modelo de dois diodos

A principal desvantagem do modelo de dois diodos em relação ao de um diodo é que este possui um maior número de variáveis, necessitando métodos mais complexos para sua extração. Ao se adicionar um diodo, a princípio, duas variáveis novas são inseridas, o fator de idealidade  $n$  e a corrente de saturação reversa do novo diodo, trazendo o número de parâmetros desconhecidos para 7. Alguns autores fixam os fatores de idealidade de ambos os diodos em 1 e 2, com o intuito de representar os mecanismos de difusão e recombinação, respectivamente. Contudo, conforme discutido por McIntosh et al., 2000, nem sempre essa premissa se verifica, podendo ser inadequada sua consideração. O método proposto por Bühler, 2011, assume como variável o fator de idealidade do diodo referente ao processo de recombinação, obtendo uma melhor representação de módulos de tecnologia cristalina ou amorfa.

Chin et al., 2015, ao apresentar uma extensa revisão sobre modelagem fotovoltaica, analisam modelos de um diodo de 4 e 5 parâmetros e modelos de dois diodos, afirmando que este último vem ganhando espaço em modelos de simulação, com destaque para o modelo de Ishaque et al., 2011. Neste, o número de variáveis é reduzido fazendo-se as duas correntes de saturação reversa iguais, fixando-se o fator de idealidade do primeiro diodo como 1 para representar a corrente por difusão, com o fator do segundo diodo sendo variável. Os parâmetros são obtidos por um método semelhante ao de Villalva et al., 2009, em um processo iterativo.

Alguns modelos mais sofisticados têm sido propostos, tais como modelos modificados de dois diodos, por exemplo, considerando resistências adicionais em série com cada um dos diodos [Kurobe e Matsunami, 2005], modelos de três diodos [Nishioka et al., 2007] e modelos multi-dimensionais de diodos [Soon et al., 2014]. Entretanto, estes são considerados excessivamente complexos por requererem maiores esforços computacionais e não vêm sendo utilizados na modelagem de sistemas fotovoltaicos.

### 3. METODOLOGIA

A fim de uma melhor compreensão do comportamento de módulos fotovoltaicos em diferentes condições operativas, e visando a proposição de um modelo simples e adequado, foram realizados ensaios experimentais. Este capítulo descreve os ensaios realizados, bem como os procedimentos para obtenção dos resultados a partir destes.

#### 3.1. Procedimento experimental para análise em diferentes irradiâncias

O estudo do desempenho de módulos fotovoltaicos para diferentes níveis de irradiância foi realizado a partir da caracterização da curva I-V de 27 módulos fotovoltaicos a 20 níveis de irradiância, sendo 19 policristalinos e 8 monocristalinos. Para tanto, foi utilizado um LAPSS (*Large Area Pulsed Solar Simulator*), modelo PASAN SunSim 3C, instalado no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O simulador possui um *flash* de 10 ms, iluminando uma área de 2m x 2m para o teste. Sua precisão elétrica é de 0,2% e a colimação da luz é menor que 15°. O simulador segue a norma IEC 60904-9, 2007, excedendo todos os requisitos conforme mostrado na Tabela 3.1, sendo classificado como AAA.

Tabela 3.1 – Requisitos para um simulador solar classe A [IEC 60904-9] e características do equipamento utilizado

Característica	Simulador solar classe A	LAPSS PASAN SunSim 3C
Não-uniformidade	2%	< 1%
Instabilidade temporal	2%	< 1%
Correspondência espectral	0,75 a 1,25	0,875 to 1,125

Em testes realizados no laboratório pouco após a instalação do equipamento, este demonstrou possuir uma não-uniformidade de 0,27%, superando as especificações nominais. A não-uniformidade do *flash* foi testada a partir da medição da corrente de curto-circuito de uma célula de Silício policristalino em 64 posições na área de teste.

As curvas I-V foram obtidas em 10 ms, em uma única varredura de  $I_{sc}$  a  $V_{oc}$ , sendo obtidos 418 pares I-V. A curva bruta é corrigida para a condição de temperatura STC a partir do procedimento da norma IEC 60891, 2009, no software do simulador. Essa correção, contudo,

foi pequena, pois a temperatura do módulo foi monitorada e mantida em  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante os ensaios.

Um conjunto de seis máscaras com razões de atenuação de 0,7, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2 e 0,1 foi utilizado para a obtenção das curvas I-V sob um conjunto de níveis de irradiância. As curvas foram traçadas com irradiâncias variando de  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $75 \text{ W/m}^2$ , em geral com intervalos de  $50 \text{ W/m}^2$ , exceto para o nível mais baixo, que foi estabelecido em  $75 \text{ W/m}^2$  ao invés de  $50 \text{ W/m}^2$  devido a limitações técnicas do equipamento. As medições a  $1000, 950, 900, 850, 800$  e  $750 \text{ W/m}^2$  foram realizados sem o uso de máscaras atenuadoras, apenas regulando a intensidade do *flash*. As medições a  $700, 650, 600$  e  $550 \text{ W/m}^2$  utilizaram a máscara com razão atenuadora de 0,7, e assim sucessivamente.

As máscaras atenuadoras possuem efeito espectral neutro, já que realizam um bloqueio físico de parte da radiação. A redução da intensidade do *flash*, por sua vez, poderia influenciar no espectro da radiação, mas tal influência é limitada dado que a máxima redução possível é de 25% da potência total. Ainda, o uso da célula de referência de silício, que possui resposta espectral similar aos módulos ensaiados, faz com que seja considerada a irradiância efetiva convertida pelos módulos fotovoltaicos, corrigindo os efeitos da variação espectral na corrente de curto-circuito.

### **3.2. Procedimento experimental para análises a diferentes temperaturas**

Na sequência do estudo, foi realizado um novo experimento, no qual são obtidas curvas I-V de 4 módulos a diferentes temperaturas e irradiâncias. Com isso, pretende-se avaliar a influência da temperatura nos 5 parâmetros, a fim de propor aprimoramentos no modelo. Foi utilizado para tanto o simulador solar PASAN já descrito na seção 3.1.

São obtidas as curvas I-V dos 4 módulos, dois policristalinos e dois monocristalinos, variando-se a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  até  $75 \text{ W/m}^2$ , com intervalos decrescentes de  $100 \text{ W/m}^2$ , com exceção do último intervalo, que é de  $25 \text{ W/m}^2$ . A faixa de temperatura selecionada foi de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $65^{\circ}\text{C}$ , com variações de  $10^{\circ}\text{C}$ . Assim, tem-se uma matriz de 11 irradiâncias e 5 temperaturas por módulo, totalizando 55 curvas I-V para cada um destes.

O aquecimento do módulo e controle de temperatura são realizados em uma câmara termostática, construída com essa finalidade. Tal câmara consiste em uma caixa, com tamanho suficiente para abrigar um módulo fotovoltaico em seu interior, e possui isolamento térmico em seu fundo, com uma placa de espuma de polietileno expandido de cerca de 20 mm de espessura,

bem como uma camada de papel alumínio, com a função de refletir a radiação térmica recebida. Na frente desses isolamentos, foi instalada uma placa de policarbonato alveolar, dentro da qual são inseridas resistências de fios que causam o aquecimento do conjunto. Uma vista frontal dessa câmara, sem o módulo fotovoltaico, é apresentada na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Vista frontal da câmara termostática para aquecimento do módulo

A potência máxima dissipada pelas resistências é de cerca de 2500 W, sendo acionada de forma intermitente pelo controlador de temperatura. Foram utilizados cerca de 210 m de fios para a construção da resistência, com diâmetro externo de 2,4 mm e resistência de 4,21  $\Omega/m$ . Foram usados ventiladores para uniformizar a temperatura do módulo por meio de convecção forçada, conforme pode ser visualizado também na Figura 3.1. São catorze ventiladores na parte superior e onze na parte inferior da câmara, que fazem com que o ar suba por trás do módulo fotovoltaico e desça pela sua frente. O controle da temperatura é feito por um controlador de temperatura Novus N1100, tendo como sensor um PT100 colado na face posterior do módulo. Um exemplo do sistema com um módulo em ensaio é apresentado na Figura 3.2.

As variações de irradiância são obtidas da mesma maneira dos ensaios anteriores, a temperatura constante. A quantidade de níveis de irradiância considerada foi reduzida de 20 para 11 para diminuir a necessidade de medições, tendo sido avaliado do primeiro ensaio que os intervalos de 100 W/m<sup>2</sup> já seriam suficientes para capturar os efeitos desejados. Os demais equipamentos e procedimentos de medida também foram mantidos inalterados.

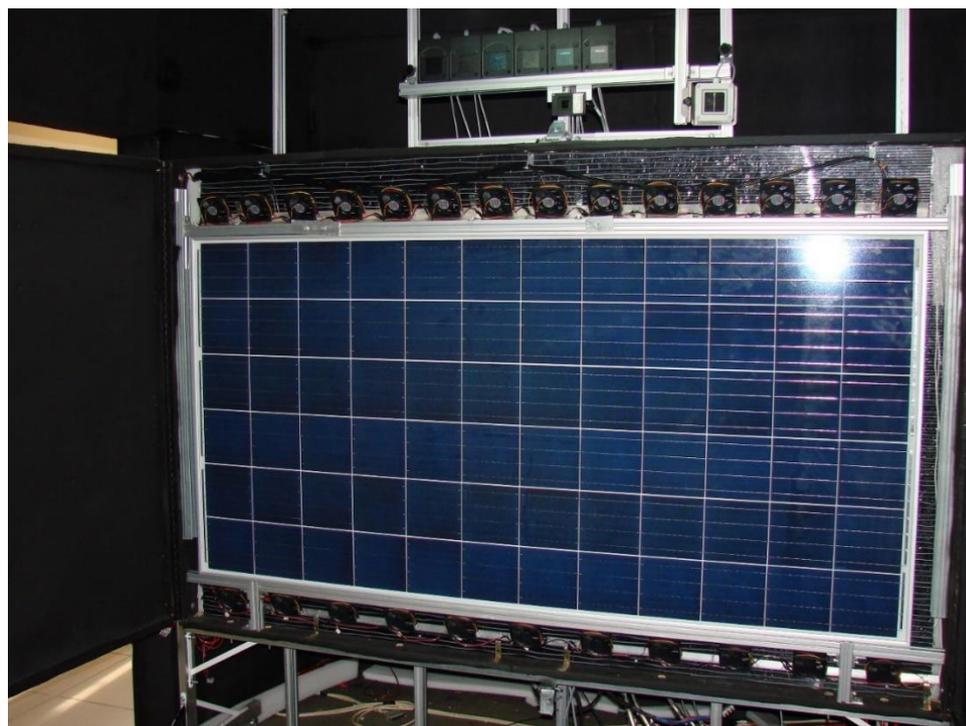


Figura 3.2 – Câmara com temperatura controlada

### 3.3. Medidas externas

Em um terceiro ensaio, foram realizadas medidas com um módulo fotovoltaico em condições externas, a fim de testar as propostas feitas para aprimoramento do modelo de um diodo a partir das medidas no simulador. Primeiro, uma curva de referência é obtida no simulador para esse módulo, nas condições de 25 °C e 1000 W/m<sup>2</sup> utilizando os equipamentos descritos anteriormente. Então, este é colocado no ambiente externo, e são obtidas curvas em diferentes temperaturas e irradiâncias por meio de um traçador de curvas. Um maior detalhamento desse sistema pode ser obtido em Gasparin, 2012.

A irradiância é obtida com uma célula de referência calibrada no LABSOL, e a temperatura por meio de um sensor PT100 colado na face posterior do módulo. As curvas foram obtidas em uma varredura única, de  $I_{sc}$  para  $V_{oc}$ , com a obtenção de 500 pontos e tempo de medida de 400  $\mu$ s por ponto, totalizando 200 ms para a medição. São obtidas curvas em três condições distintas. Primeiro, com a exposição do módulo ao Sol em um horário no qual a irradiância seja próxima à de referência, e o ângulo de incidência seja baixo. Posteriormente, são utilizados dois filtros distintos, que reduzem a irradiância recebida, o primeiro de 70%, ou seja, reduz em cerca de 30% a irradiância incidente, e o segundo de 50%, reduzindo a irradiância pela metade. Uma imagem do ensaio em realização é mostrada na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Realização das medidas externas com filtro

A realização das medidas com ângulo de incidência reduzido visou minimizar efeitos de reflexões do ambiente, que poderiam causar não uniformidades na radiação no módulo em teste, além de diferenças com relação à irradiância recebida por este e pela célula de referência. Como as diferenças nas curvas I-V entre os modelos que serão testados são baixas, mesmo interferências pequenas podem interferir na comparação.

#### 3.4. Método de extração considerado

O método utilizado para a extração de parâmetros de curva I-V foi o método analítico proposto por Phang et al., 1984. Este apresenta uma metodologia simples e precisa de se obter os cinco parâmetros do modelo de um diodo com dados tomados de uma curva medida. Os resultados apresentados pelo método analítico foram consistentes e a curva reproduzida é igual à medida dentro das incertezas experimentais. No capítulo 4, discute-se a influência do método de extração, a partir de alterações no método proposto nesta seção, e da utilização do método proposto por Krenzinger, 1994 descrito na seção 2.2.2.1.

O parâmetro  $R_{s0}$ , é extraído considerando-se a Equação 3.1, calculando-se a regressão linear na região de  $V_{oc}$  a partir dos pares I-V com os valores de corrente entre  $-0,05 I_{sc}$  e  $0,33 I_{mp}$ . Para o parâmetro  $R_{p0}$ , dado pela Equação 3.2, utiliza-se os pontos da curva compreendidos

entre -0,3 volts e 0,5  $V_{mp}$ . Esses intervalos são os recomendados pelo software do simulador solar, possuindo pontos suficientes para a determinação dos parâmetros com menor influência de ruído. Bühler et al., 2014 utilizaram intervalos ligeiramente distintos para tais regressões, os quais foram testados em alguns módulos para comparação, e os resultados foram similares. O ponto de máxima potência é determinado por uma regressão a partir de polinômio de quarto grau contendo os pares I-V entre 0,75  $V_{mp}$  e 1,15  $V_{mp}$ , conforme proposto na norma E1036M da ASTM, 1996.

$$R_{s0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{V=V_{oc}} \quad (3.1)$$

$$R_{p0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{I=I_{sc}} \quad (3.2)$$

Como parte do método, são propostas algumas simplificações, com base no atendimento às inequações 2.31, 2.32 e 3.3, que se verifica exceto para casos de concentração solar. Assim, os parâmetros podem ser obtidos analiticamente com o conjunto de Equações 3.4 a 3.7. A corrente fotogerada é obtida diretamente da corrente de curto-circuito medida.

$$\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s nkT}\right) \gg \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{N_s nkT}\right) \quad (3.3)$$

$$R_p = R_{p0} \quad (3.4)$$

$$n = \frac{V_{mp} + R_{s0}I_{mp} - V_{oc}}{\frac{N_s kT}{q} \left[ \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{p0}} - I_{mp}\right) - \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{p0}}\right) + \frac{I_{mp}}{I_{sc} - \left(\frac{V_{oc}}{R_{p0}}\right)} \right]} \quad (3.5)$$

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{p0}}\right) \exp\left(-\frac{qV_{oc}}{N_s nkT}\right) \quad (3.6)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{N_s nkT}{qI_0} \exp\left(-\frac{qV_{oc}}{N_s nkT}\right) \quad (3.7)$$

### 3.5. Métricas de avaliação utilizadas

A avaliação de modelos propostos baseia-se em duas métricas principais, sendo estas o desvio no ponto de máxima potência, dado pela Equação 3.8, e o desvio médio quadrático ponderado, dado pela Equação 3.9.

$$Desvio_{P_{mp}} = \frac{P_{mp,calc} - P_{mp,med}}{P_{mp,med}} \quad (3.8)$$

$$Desvio_{rms} = \frac{1}{I_{sc,med}} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I_{calc,j} - I_{med,j})^2}{n}} \quad (3.9)$$

Os subscritos *calc* e *med* indicam respectivamente valores calculados pelo modelo e medidos experimentalmente. Enquanto o desvio no ponto de máxima potência indica a precisão do modelo em prever o ponto mais importante do sistema simulado, o desvio médio quadrático mostra a qualidade do modelo em descrever a forma da curva I-V resultante. Para o segundo parâmetro, utiliza-se a ponderação pela corrente de curto-circuito para se obter um valor normalizado do desvio. Como as correntes são diretamente proporcionais à irradiância, para irradiâncias mais baixas os valores absolutos desse parâmetro tendem a ser mais baixos, ainda que a curva prevista pelo modelo seja menos adequada do que aquelas para irradiâncias mais altas, e por esse motivo considera-se mais adequado utilizar a ponderação.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são analisadas as medições realizadas conforme descrito no capítulo 3. Primeiramente, estuda-se o comportamento de cada um dos 5 parâmetros variando-se apenas a irradiância, conforme descrito na seção 3.1. Posteriormente, são realizadas análises semelhantes em função da temperatura de operação dos módulos, segundo a metodologia da seção 3.2. Nas análises aqui apresentadas, considera-se o método de extração analítico da seção 3.4. O comportamento dos parâmetros é demonstrado de maneira adimensional, utilizando como referência o valor obtido para aquele módulo à irradiância de referência de 1000 W/m<sup>2</sup>, e os parâmetros adimensionalizados são marcados com um asterisco.

### 4.1. Comportamento experimental dos parâmetros com a irradiância

Na análise do comportamento dos parâmetros com a irradiância, utiliza-se o resultado das medições de 27 módulos a 20 níveis de irradiância. Os resultados da extração de cada parâmetro são apresentados em gráficos de dispersão, permitindo a visualização da nuvem de pontos de forma a compreender o comportamento dos parâmetros. Cada nível de irradiância possui sempre 27 pontos, embora em certos casos a semelhança entre o resultado dos diferentes módulos faça com que estes fiquem sobrepostos.

#### 4.1.1. Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ )

A corrente fotogerada  $I_{fg}$  comportou-se de maneira bastante linear, com pequenos desvios dentro das incertezas de medição, conforme demonstrado na Figura 4.1, indicando que a abordagem utilizada pela grande maioria dos modelos é adequada.

#### 4.1.2. Fator de idealidade do diodo ( $n$ )

Utilizando a extração pelo método analítico,  $n$  não possui uma tendência clara, conforme mostrado na Figura 4.2. Embora visualmente possa parecer que seu valor aumente nos pontos de irradiância mais baixa, ao se construir uma linha de tendência com esses valores, obtém-se uma reta praticamente horizontal, com um coeficiente angular de  $3,5 \cdot 10^{-5}$ , e um coeficiente de

correlação de Pearson inferior a 0,5%. Correlações não lineares foram testadas, apresentando sempre comportamentos próximos ao constante e coeficientes de correlação próximos a zero.

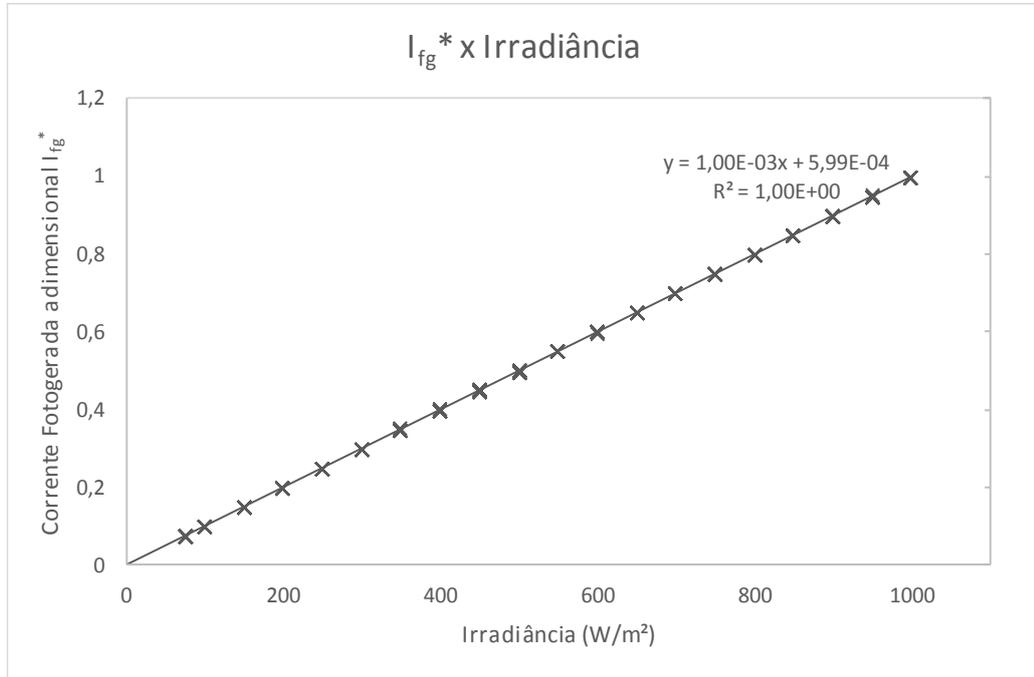


Figura 4.1 – Comportamento experimental de  $I_{fg}^*$  com a irradiância

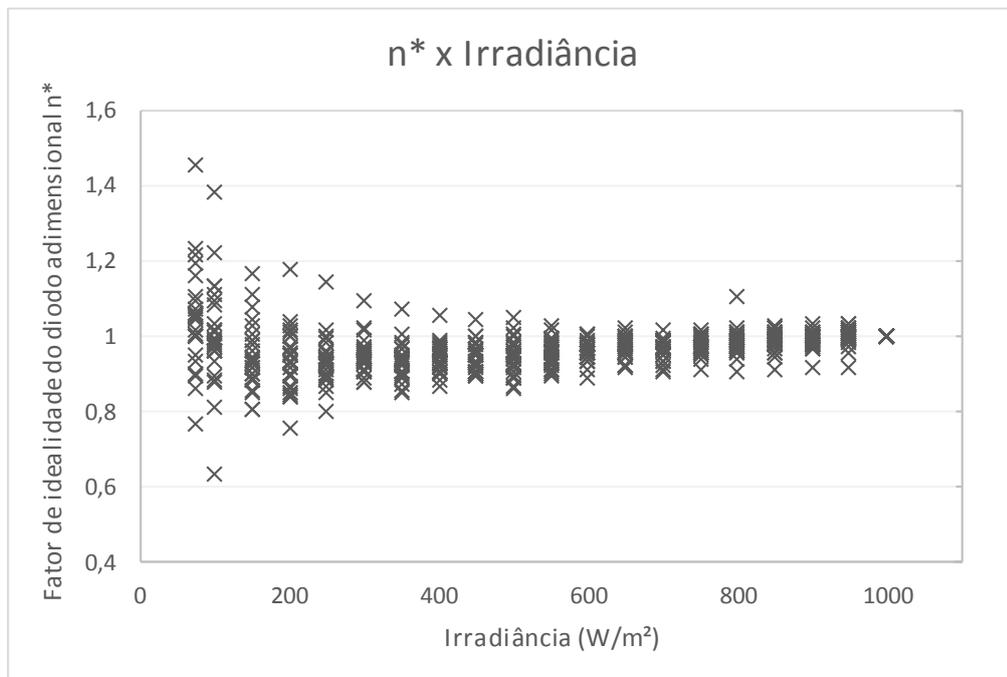


Figura 4.2 – Comportamento experimental de  $n^*$  com a irradiância

### 4.1.3. Corrente de saturação reversa no escuro ( $I_0$ )

O comportamento adimensional da corrente de saturação reversa é mostrado na Figura 4.3, em escala logarítmica. Assim como em  $n$ , além da dispersão verificada, não é possível definir uma tendência, com todas as alternativas testadas resultando em coeficientes de correlação sem significância e comportamentos com tendência desprezíveis frente ao nível de dispersão, que cresce a baixas irradiâncias. Em alguns casos, os valores a irradiâncias menores são de até duas ordens de grandeza superiores ao valor de referência a 1000 W/m<sup>2</sup>.

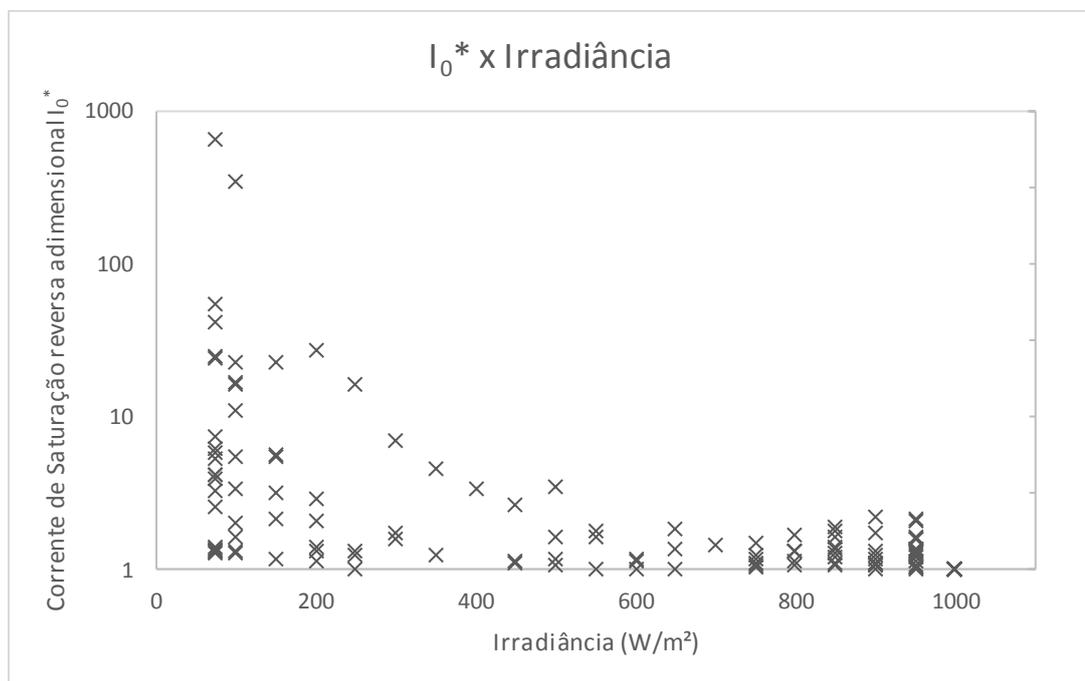


Figura 4.3 – Comportamento experimental de  $I_0^*$  com a irradiância

Contudo, a grande maioria dos pontos se situa no intervalo entre 0 e 2,5 vezes o valor de referência, conforme detalhado na Figura 4.4, que apresenta um detalhe da Figura 4.3, com o eixo  $y$  variando apenas neste intervalo. Apenas dois dos módulos medidos apresentaram valor de  $I_0^*$  superior a 2,5 para irradiâncias maiores que 200 W/m<sup>2</sup>, sendo a irradiância mais alta para tal ocorrência de 500 W/m<sup>2</sup>. A quantidade de ocorrências desses casos foi maior para as irradiâncias mais baixas, sendo de 14 para as medições a 75 W/m<sup>2</sup>, 7 para 100 W/m<sup>2</sup>, 4 para 150 W/m<sup>2</sup> e 2 para 200 W/m<sup>2</sup>.

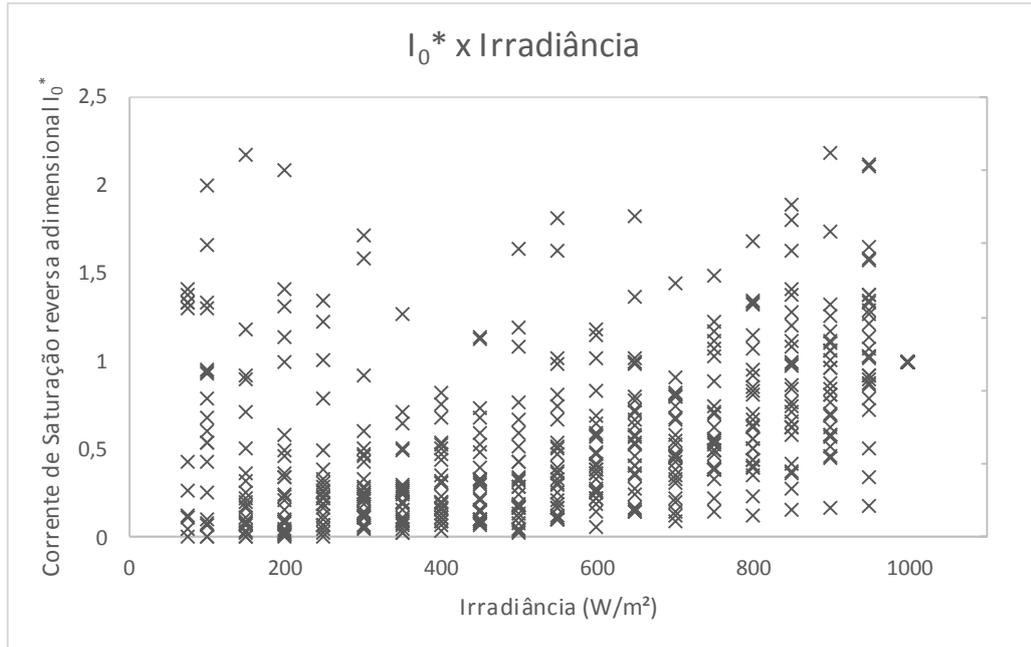


Figura 4.4 – Comportamento experimental de  $I_0^*$  com a irradiância – detalhe dos pontos de  $I_0^*$  entre 0 e 2,5

#### 4.1.4. Resistência paralela ( $R_p$ )

Para análise da variação da resistência paralela com a irradiância, a partir de sua obtenção com as Equações 3.2 e 3.4, obteve-se um ajuste de curva segundo uma equação de potência, conforme indicado na Figura 4.5.

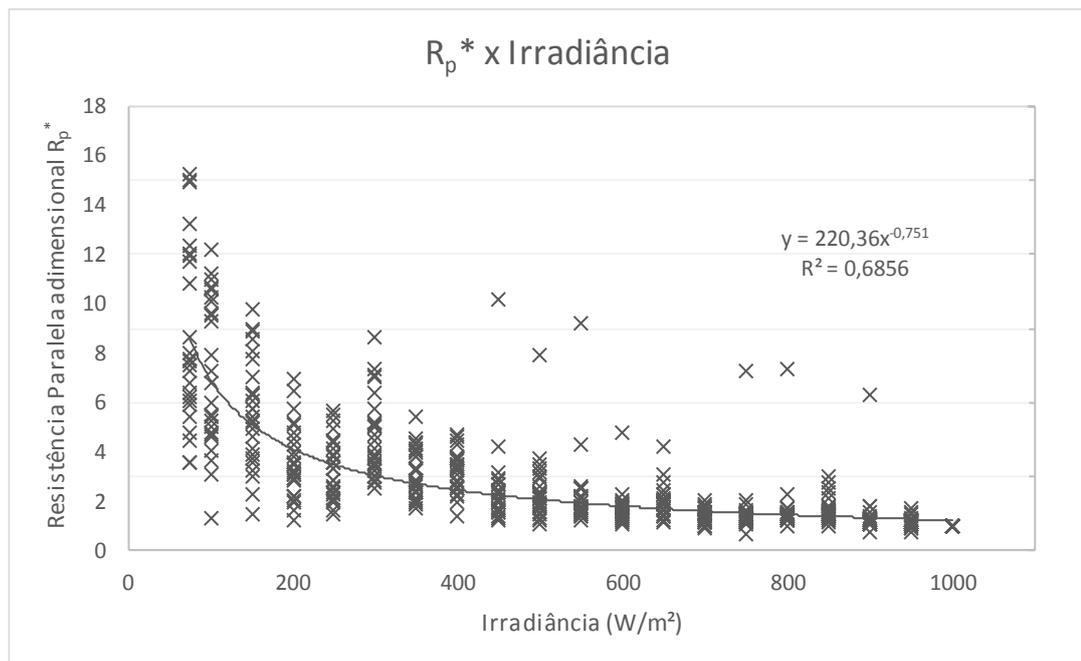


Figura 4.5 – Variação de  $R_p^*$  com o nível de irradiância

A linha de tendência apresentada na Figura 4.5 indica que, para o conjunto de módulos cristalinos testados, o comportamento de  $R_p^*$  pode ser aproximado pela Equação 4.1.

$$R_p^* = 220G^{-0,75} \quad (4.1)$$

Para comparação da equação obtida com as soluções propostas na literatura para esse parâmetro, a Figura 4.6 apresenta duas propostas para módulos de silício cristalino, a de De Soto et al., 2006 e a proposta utilizada no software PVSYST [Mermoud e Lejeune, 2010], junto com a Equação 4.1.

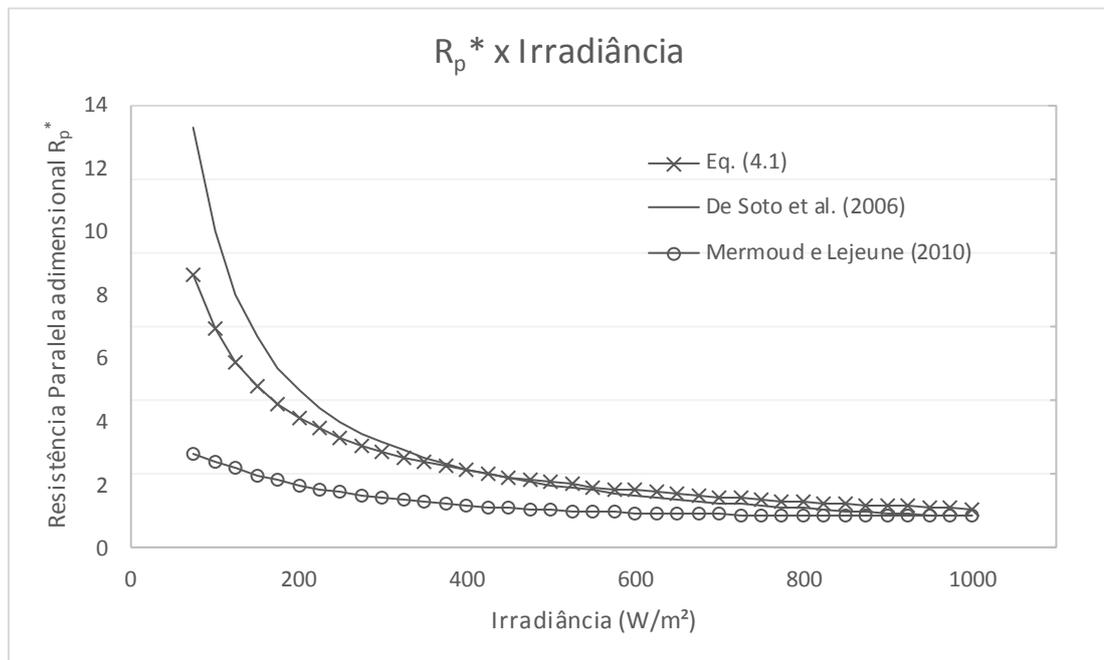


Figura 4.6 – Comparação entre propostas de variação de  $R_p^*$  com a irradiância

Verifica-se que a curva obtida experimentalmente é similar à proposta de comportamento inverso de De Soto et al., 2006, principalmente para a faixa de irradiâncias de 300 a 1000 W/m². Para irradiâncias mais altas, o valor obtido com a Equação 4.1 é um pouco superior ao comportamento inverso, enquanto para irradiâncias mais baixas o valor fornecido pela equação proposta é um pouco inferior. Por sua vez, a curva proposta por Mermoud e Lejeune, 2010, utilizada pelo modelo do software PVSYST subestima a resistência paralela todas as faixas de irradiância. O próprio manual do *software* indica esse resultado como preliminar, baseado em poucas medições experimentais, e condiciona seu uso à escolha do usuário.

Assim, pode-se verificar que o uso da equação que considera o comportamento inverso de  $R_p$  com a irradiância é bastante adequado para o conjunto de módulos testados, principalmente para irradiâncias maiores que  $300 \text{ W/m}^2$ . Abaixo desse valor, a relação inversa acaba por superestimar o valor de  $R_p$ , podendo levar a uma eficiência superior ao valor real. Contudo, verifica-se que as diferenças nos valores obtidos com as duas propostas só se afastam para os menores valores de irradiâncias, nos quais ambas já fornecem valores de  $R_p$  muito superiores aos de referência. Sendo a inclinação da curva proporcional ao inverso de  $R_p$ , diferenças em valores já mais altos são menos significativas. Uma desvantagem importante do uso da Equação 4.1 em detrimento da equação inversa é que esta acaba por alterar o valor de  $R_p$  utilizado na condição de referência, já que esta fornece um valor superior a um (1,237) para a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.1.5. Resistência série ( $R_s$ )

O conjunto de pontos representando a resistência série dos 27 módulos testados é apresentado na Figura 4.7. A partir da nuvem de pontos, a linha de tendência indica um comportamento com uma função potência com expoente negativo, fornecendo maiores resistências série para baixas irradiâncias.

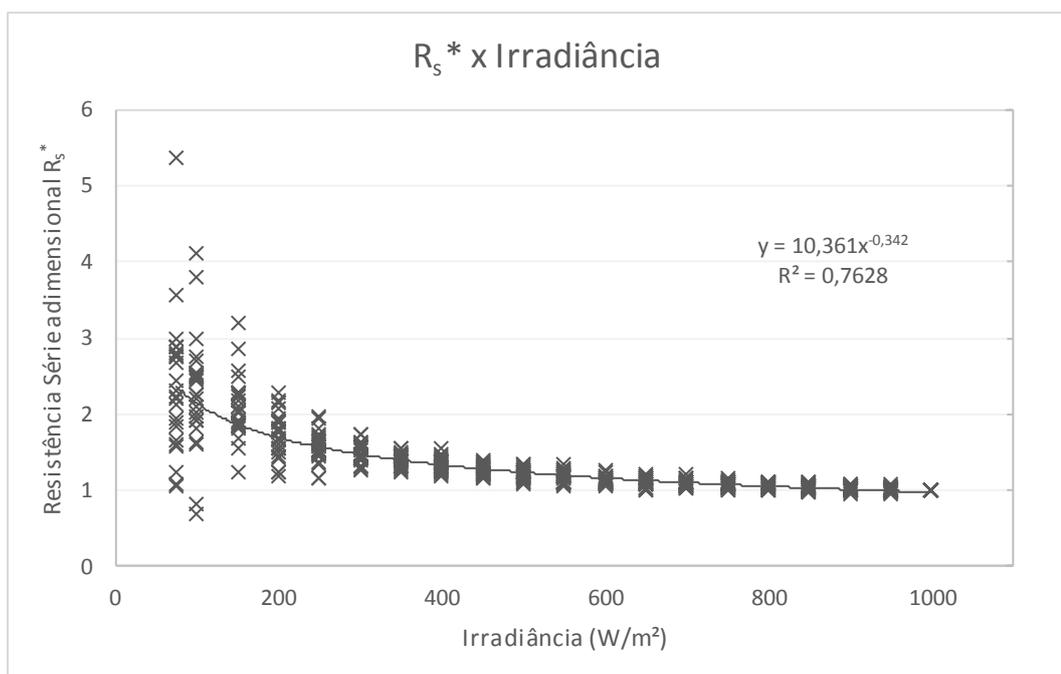


Figura 4.7 – Comportamento experimental de  $R_s^*$  com a irradiância

Assim, por simplicidade de notação, sem prejuízo de precisão, propõe-se como ajuste para os pontos encontrados, a Equação 4.2. Como vantagem dessa proposta em relação ao valor obtido do ajuste de curva original, a Equação 4.2 fornece o valor de referência para a irradiância  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ .

$$R_s = 10G^{\left(-\frac{1}{3}\right)} \quad (4.2)$$

#### 4.2. Influência do método de extração

Os resultados apresentados até aqui consideram o método de extração analítico de Phang et al., apresentado na seção 3.4 para obtenção dos 5 parâmetros do modelo. Conforme discutido no capítulo 2, além de divergirem no comportamento dos parâmetros com variações de temperatura e irradiância, os trabalhos da literatura utilizam métodos de extração distintos, o que pode influenciar no resultado. Assim, da mesma maneira que se discutiu que existem diferentes pares  $(n, I_0)$  que fornecem resultados semelhantes, a partir da análise da influência de cada um dos parâmetros na curva I-V, é importante uma análise mais ampla sobre qual a influência da forma de extração dos parâmetros no modelo como um todo.

Uma revisão da literatura indica que há estudos que demonstram que existem diferentes conjuntos de cinco parâmetros que fornecem resultados satisfatórios na representação do comportamento de um mesmo módulo fotovoltaico. Rhouma et al., 2017, demonstraram que diferentes pares de  $n$  e  $R_s$ , variando o  $n$  de 1 a 1,2, e a resistência série de 0,03 a 0,035, fornecem curvas praticamente idênticas, a partir de alterações nos parâmetros  $R_p$  e  $I_0$ , afirmando que a obtenção de parâmetros do modelo de um diodo é um problema de solução não-única. De maneira semelhante, Biswas et al., 2019, utilizaram um algoritmo de evolução diferencial adaptativa para obter os parâmetros dos modelos de um e dois diodos a partir apenas dos três pontos fornecidos em catálogo. Para cada módulo estudado, são obtidos 30 conjuntos de parâmetros que fornecem exatamente os pontos de curto-circuito, circuito aberto e máxima potência, embora haja diferença no formato da curva.

Ambos os trabalhos demonstraram que há diversas soluções possíveis para o problema da determinação dos parâmetros do modelo de um diodo nas condições STC. Assim, é provável que o mesmo se confirme para outras condições operativas, o que poderia explicar a grande quantidade de modelos desenvolvidos na literatura, e o porquê de muitos deles apresentarem

conclusões diferentes para as variações dos parâmetros, e ao mesmo tempo todos apresentarem soluções com qualidade satisfatória.

A seguir, são realizados alguns testes a fim de avaliar possíveis diferenças no comportamento dos parâmetros com a irradiância ao se alterar o método de extração. Primeiramente, são propostas alterações no procedimento realizado no estudo da seção 4.1, repetindo-se a extração dos parâmetros para todos os módulos e níveis de irradiância com o procedimento modificado. Em um segundo momento, o estudo é refeito considerando o método de extração utilizado no modelo de Krenzinger, detalhado na seção 2.2.2.1.

#### 4.2.1. Extração com $n$ constante

Os resultados da análise da extração dos parâmetros com o método de Phang et al. indicaram, assim como a maioria dos modelos da literatura, que o fator de idealidade do diodo não possui tendência de alteração com o nível de irradiância, parecendo adequado tratá-lo como uma constante. Assim, nesta seção decidiu-se por repetir a extração dos parâmetros, considerando o fator de idealidade do diodo como uma constante. Ou seja, o método apresentado na seção 3.4 é aplicado na curva medida a  $1000 \text{ W/m}^2$  e, para as demais irradiâncias, o valor de  $n$  não é recalculado com a Equação 3.5.

São apresentados os resultados para a corrente de saturação reversa  $I_0$  e para a resistência série, já que a corrente  $I_{fg}$  e a resistência paralela  $R_p$  independem dos demais parâmetros, sendo os resultados para estas idêntico. A análise das curvas obtidas durante as extrações mostrou que os parâmetros obtidos após essa alteração proposta continuam representado adequadamente os dados medidos.

A Figura 4.8 apresenta o comportamento obtido para a corrente de saturação reversa no escuro,  $I_0$ , adimensionalizado por seu valor a  $1000 \text{ W/m}^2$  para cada módulo, em função da irradiância, ao se considerar o fator de idealidade do diodo  $n$  constante na extração dos parâmetros. Comparando-se com o resultado obtido com  $n$  variável, apresentado na Figura 4.3, com o detalhe na Figura 4.4, percebe-se que a dispersão foi reduzida significativamente. Enquanto com  $n$  variável o valor de  $I_0$  variava em ordens de magnitude, com a nova abordagem a corrente de saturação reversa variou entre 92% e 158% de seu valor de referência.

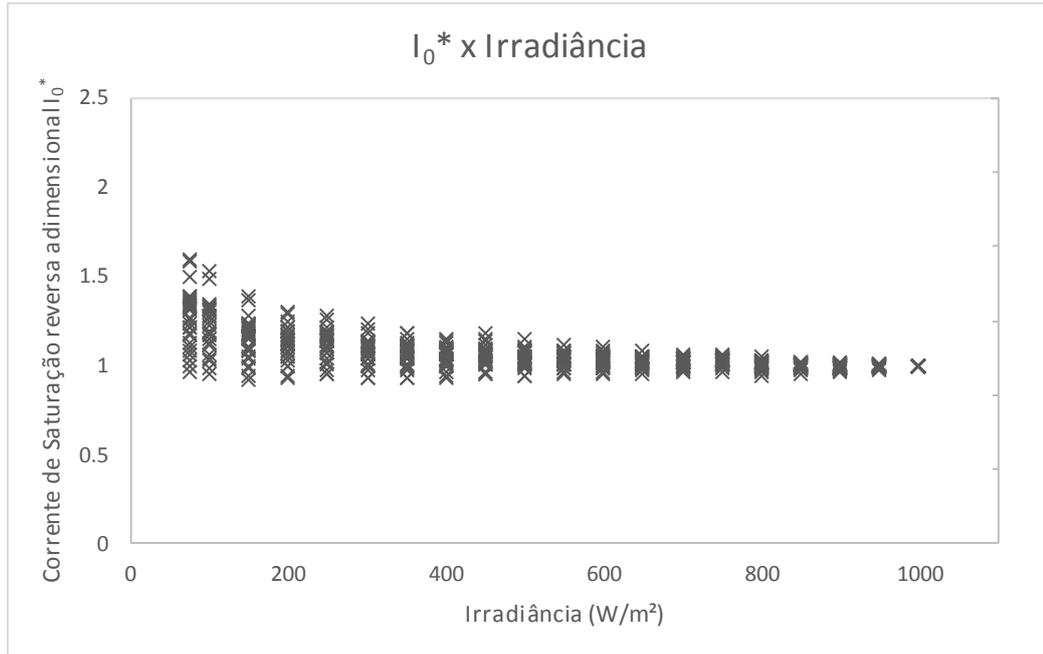


Figura 4.8 – Comportamento de  $I_0^*$  com a irradiância – extração com  $n$  constante

A dispersão do comportamento da resistência série também foi reduzida com a abordagem de fixar o valor de  $n$ , conforme conclui-se da comparação da Figura 4.9 com a Figura 4.7. O coeficiente de correlação aumentou de 0,76 para 0,88, e é visível que alguns pontos de  $R_s$  reduzidos a baixas irradiâncias que eram verificados com o método original deixam de ser obtidos.

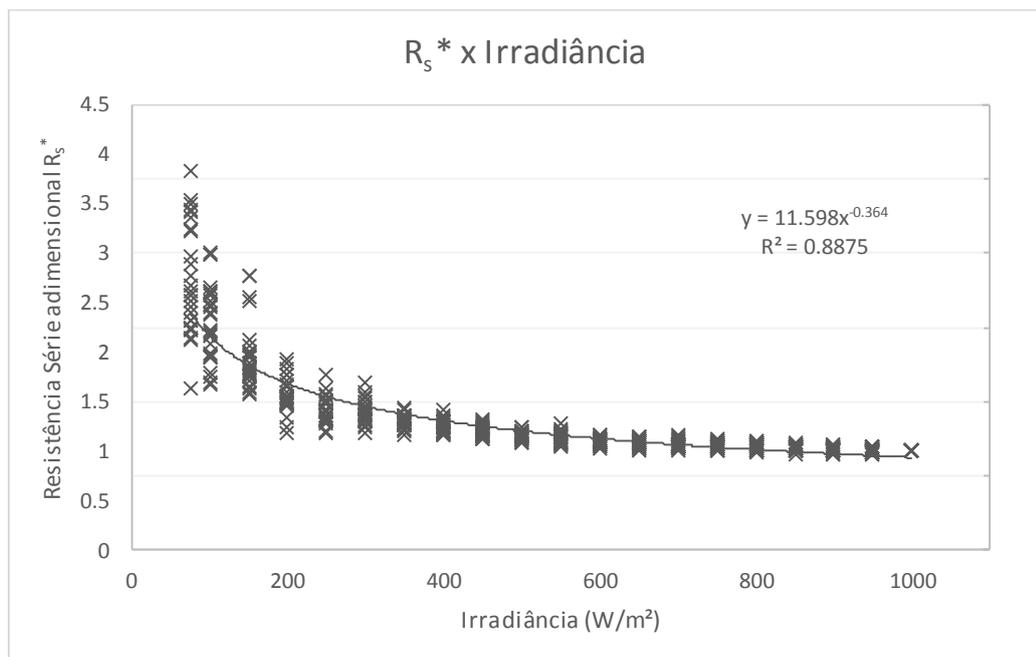


Figura 4.9 – Comportamento da resistência série adimensional com a irradiância – extração com  $n$  constante

. Nas curvas reconstruídas, é possível notar que os casos onde eram calculadas resistências série mais baixas eram justamente os que apresentavam menor concordância entre as curvas medidas e simuladas. Verificou-se também que o comportamento proposto pela Equação 4.2 continua a representar adequadamente a resistência série, visto que o expoente do ajuste não é alterado significativamente.

#### 4.2.2. Extração com $n$ e $I_0$ fixos

Conforme verificado na seção 4.2.1, houve uma redução na grande dispersão que era verificada no comportamento de  $I_0$  com a irradiância ao fixar o fator de idealidade do diodo nas extrações de parâmetros. Esse resultado corrobora a hipótese de que  $I_0$  é invariável com o nível de irradiância, sugerida por diversos autores, e consistente do ponto de vista físico. Assim, o próximo passo adotado foi repetir mais uma vez a extração dos parâmetros, dessa vez fixando tanto o valor de  $n$  quanto o valor de  $I_0$  naqueles obtidos a  $1000 \text{ W/m}^2$ . Conforme citado, os parâmetros  $I_{fg}$  e  $R_p$  são independentes no método de Phang et al., restando a análise da resistência série.

A Figura 4.10 mostra que, com esse procedimento, a linha de tendência da resistência série demonstra um comportamento praticamente constante, com grande dispersão, como sugere o coeficiente de correlação bastante baixo.

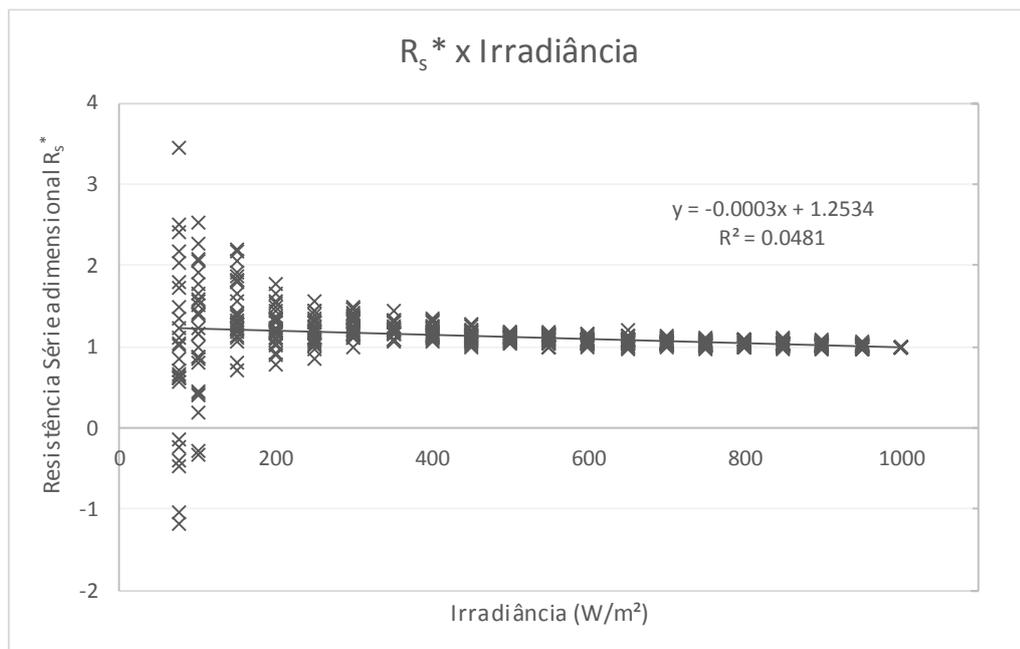


Figura 4.10 – Comportamento da resistência série adimensional com a irradiância – extração com  $n$  e  $I_0$  constantes

Em alguns casos, são obtidos valores negativos para a resistência série, o que não tem significado físico, além de levar a resultados inconsistentes na reconstrução de curvas medidas. Assim, parece inadequado manter ambos  $I_0$  e  $n$  fixos, restringindo dois graus de liberdade na extração dos parâmetros.

Dessa forma, demonstra-se que há influência do método de extração, conforme sugerido na literatura, e é comprovado que o comportamento dos parâmetros com a irradiância pode de fato depender da metodologia utilizada. Portanto, ao se analisar uma proposta de modelagem, com eventuais variações nos comportamentos dos parâmetros, pode ser relevante avaliar também a forma utilizada para obtenção dos mesmos.

#### **4.2.3. Extração com método de Krenzinger**

Os testes realizados com o método de extração modificado permitiram avaliar a possibilidade de alterações no comportamento de dois dos parâmetros com a irradiância, a corrente de saturação reversa e a resistência série. A fim de melhor explorar esse tópico, propõe-se extrair novamente os parâmetros, mas utilizando o método analítico proposto por Krenzinger, 1994.

Essa metodologia tem uma diferença importante em relação à de Phang et al.: utiliza apenas os 3 pontos (máxima potência, curto-circuito e circuito aberto), a derivada nula no ponto de máxima potência, e uma correlação empírica para  $n$  para começar o processo iterativo, que busca um conjunto de parâmetros com os pontos significativos iguais aos utilizados como referência. Assim, o valor da resistência paralela deixa de ser obtido da inclinação da curva medida, e, sendo determinado por meio do sistema de equações, pode apresentar comportamentos diferentes daquele obtido anteriormente.

Foram tentadas duas abordagens, similares às aplicadas no método anterior: recalcular o fator de idealidade para cada curva ou utilizar sempre aquele calculado a 1000 W/m<sup>2</sup>. Contudo, verificou-se que o método tem dificuldades de convergência ao manter-se o fator de idealidade do diodo fixo em situações de baixa irradiância, motivo pelo qual essa alternativa foi descartada. À exceção de  $I_{fg}$ , que segue com comportamento perfeitamente linear, os demais parâmetros demonstraram variações distintas e por vezes menos contínuas que com o método de Phang et al.

O fator de idealidade do diodo, por exemplo, embora tenha permanecido em níveis razoavelmente constantes para boa parte dos módulos nos níveis de irradiância altos e

intermediários, apresentou valores mais baixos que o calculado para o STC em irradiâncias inferiores, conforme demonstra a Figura 4.11. Houve uma tendência de queda de patamar do fator de idealidade em irradiâncias inferiores a um determinado nível, que na maioria dos módulos foi de cerca de 200 W/m<sup>2</sup>.

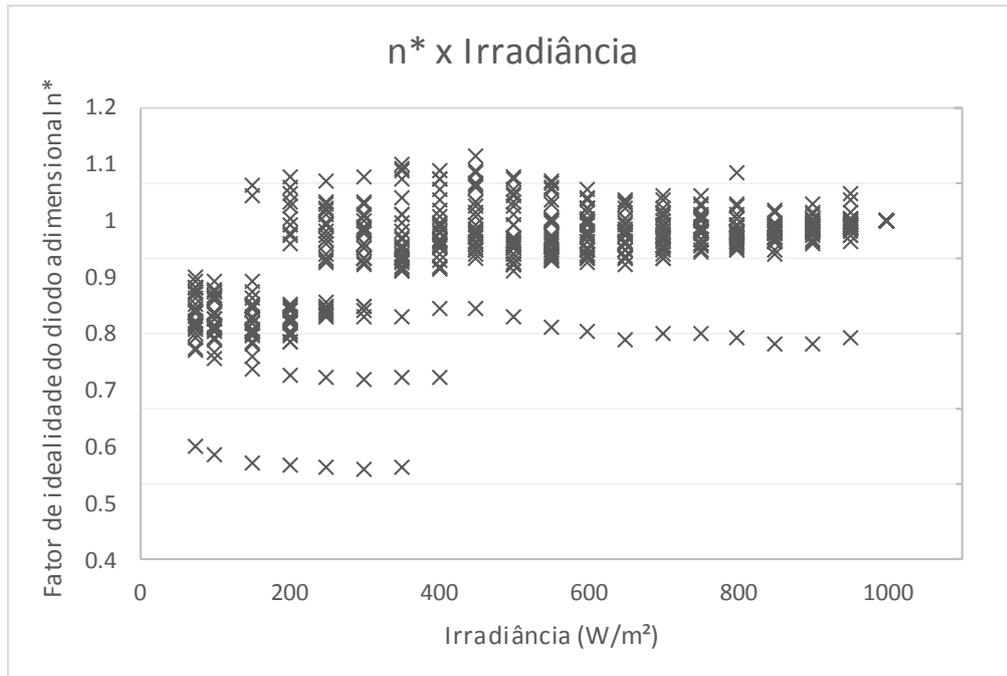


Figura 4.11 – Comportamento do fator de idealidade do diodo adimensional  $n^*$  com a irradiância – extração pelo método de Krenzinger

A corrente de saturação reversa no escuro  $I_0$ , sendo extremamente sensível às variações de  $n$ , apresentou razoável dispersão, reduzindo-se fortemente também em baixas irradiâncias, nas situações onde  $n$  apresenta um patamar inferior. Nessas situações,  $I_0^*$  é cerca de duas ordens de magnitude inferior que o valor de referência. Os resultados adimensionais são mostrados na Figura 4.12.

A resistência paralela, apesar de no método de Krenzinger ser calculada por um algoritmo no qual é interdependente dos demais parâmetros, apresentou um resultado que, nas faixas de irradiância superiores, pode ser considerado similar ao obtido com a inclinação da curva, conforme demonstra a Figura 4.13, na qual a curva inversa é apresentada para referência. Pode-se notar que, para as irradiâncias mais elevadas, a curva inversa representa os pontos com boa precisão, possuindo inclusive uma correlação maior do que no caso da obtenção de  $R_p$  com a inclinação da curva I-V. Para irradiâncias mais baixas, há uma quebra de tendência, e os valores desviam-se da curva inversa.

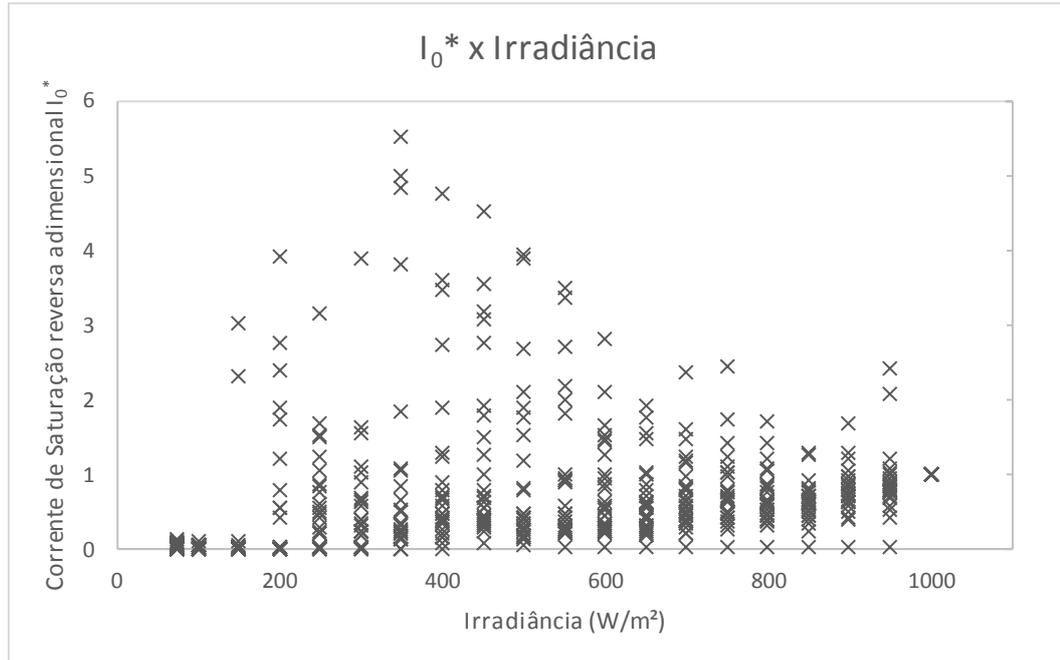


Figura 4.12 – Comportamento de  $I_0^*$  com a irradiância – extração com o método de Krenzinger

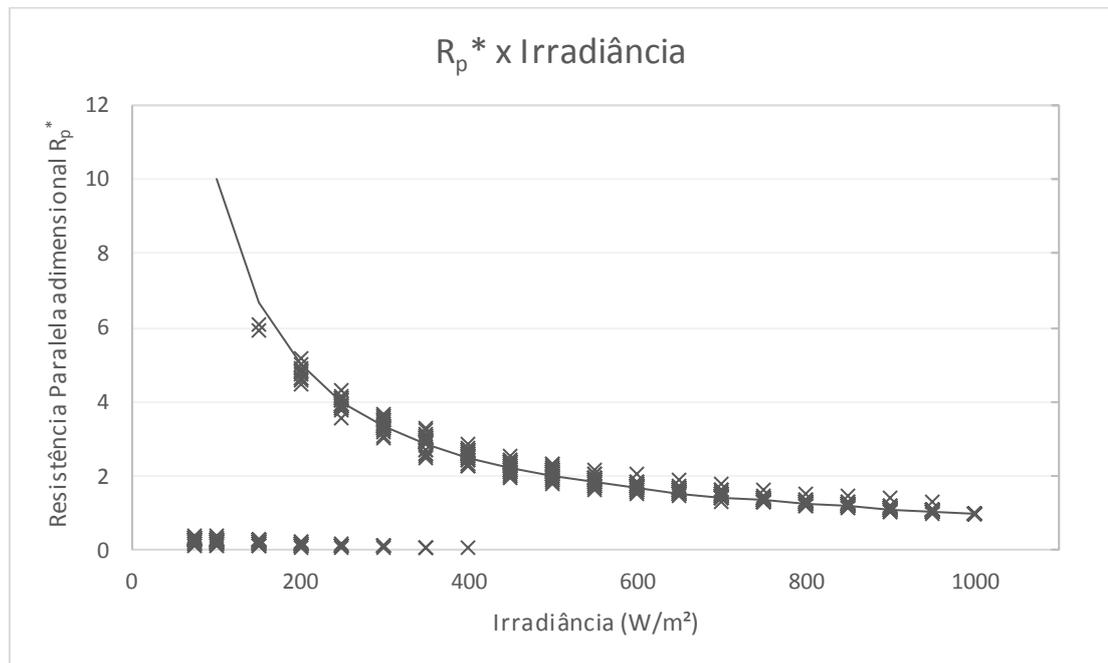


Figura 4.13 – Comportamento de  $R_p^*$  com a irradiância – extração com o método de Krenzinger

Devido à interdependência entre os parâmetros, os casos onde  $n$  e  $I_0$  apresentam valores mais baixos levam a uma resistência paralela também mais baixa, resultando em uma descontinuidade nos valores da Figura 4.13, com queda de ordem de magnitude.

Conforme discutido e apresentado na literatura, o problema da determinação dos parâmetros do modelo de um diodo possui diversas soluções, e o que parece acontecer é que para alguns casos em irradiâncias mais baixas o algoritmo encontra uma solução diferente, quebrando a tendência que vinha sendo verificada. É importante salientar que o fato de ser encontrada uma solução diferente não significa que esta esteja incorreta ou sequer seja pior do que a anterior. A análise das curvas obtidas mostra que todas representam os dados medidos com precisão similar. Pelas características do método, quando obtidos os parâmetros com o modelo de Krenzinger, a curva reproduzida passa pelos três pontos de interesse, embora seu comportamento possa divergir dos dados medidos nas regiões intermediárias.

Para uma melhor demonstração dessa interdependência e dos dois conjuntos de soluções encontrados pelo método de Krenzinger, a depender da irradiância, a Figura 4.14 detalha o comportamento dos parâmetros extraídos para um módulo específico.

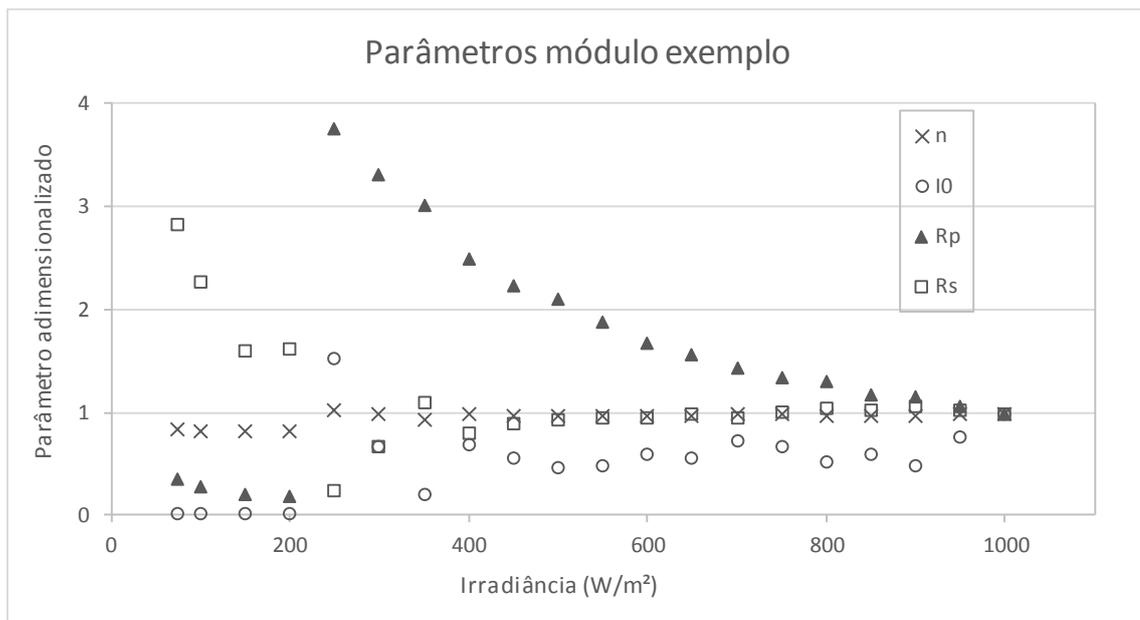


Figura 4.14 – Comportamento dos parâmetros extraídos pelo método de Krenzinger para um módulo específico

A alteração de  $n^*$  é menos visível no gráfico, pois é de magnitude menos significativa que as dos demais parâmetros, passando de cerca de 1,0 a 250 W/m² para 0,83 a 200 W/m². As equações que fornecem os demais parâmetros possuem dependência de  $n$ , que aparece dentro de exponenciais, fazendo com que pequenas variações nesse parâmetro alterem os demais significativamente. Nota-se que a corrente de saturação reversa passa a cerca de 2% do seu valor de referência com essa alteração em  $n$ ,  $R_p$  passa de um comportamento muito próximo ao

inverso para 20% do valor de referência, e volta a apresentar tendência de acréscimo nas irradiâncias ainda mais baixas. A resistência série tem um comportamento ainda menos contínuo. Ao reduzir-se a irradiância, inicialmente seu valor vem caindo, até que para o conjunto de pontos abaixo de 200 W/m<sup>2</sup> essa passa a subir.

No conjunto completo de módulos, a resistência série apresentou, de forma geral, uma tendência pequena de aumento a baixas irradiâncias. Contudo, de certa forma é visível a tendência apresentada para o módulo exemplo, de queda e posterior incremento no valor de  $R_s^*$ . Em um dos módulos, houve grande crescimento da resistência série nas baixas irradiâncias, mas esta pode ser creditada ao fato de o valor de referência neste caso ter sido relativamente mais baixo. A Figura 4.15 apresenta os resultados, com a linha cheia representando a proposta da Equação 4.2, que será utilizada posteriormente nas propostas de modelagem.

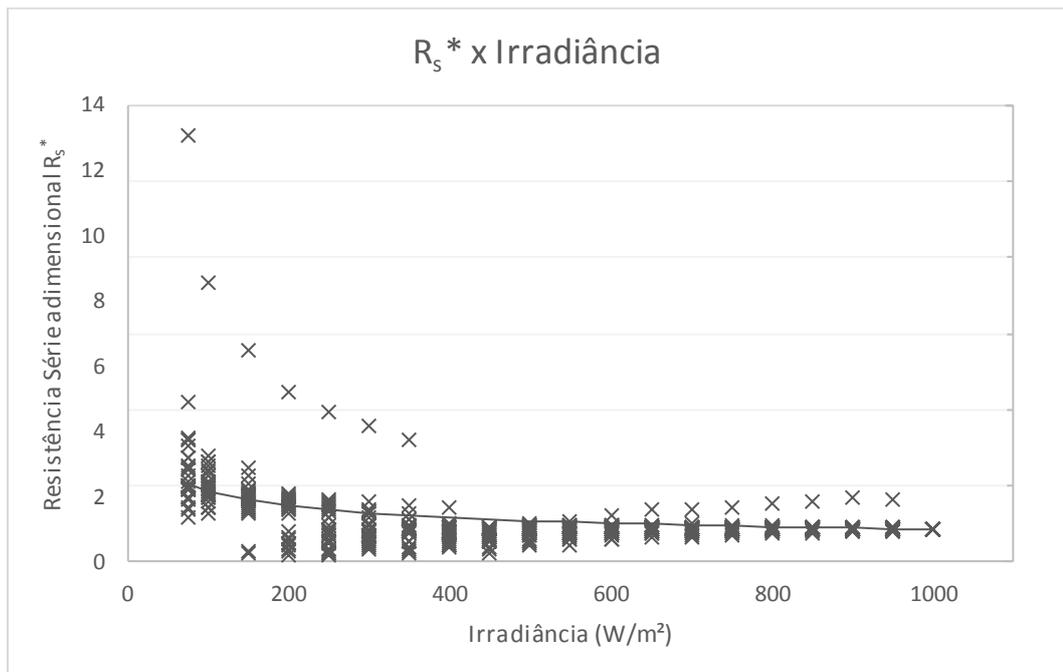


Figura 4.15 – Comportamento de  $R_s^*$  com a irradiância – extração com o método de Krenzinger

Assim, pode-se concluir que, dado que há diferentes conjuntos diferentes de parâmetros do modelo de um diodo que representam adequadamente o comportamento de um certo módulo fotovoltaico, há influência do método utilizado para sua determinação, pois cada método pode encontrar uma solução diferente, embora todas sejam válidas. Assim, é possível que os diferentes estudos de comportamentos de parâmetros da literatura, embora apresentem resultados por vezes opostos, sejam válidos quando considerado o método de extração do

estudo. Especialmente no uso de métodos como *curve-fitting*, ou outros que utilizem otimização numérica como redes neurais ou algoritmo genético, há a possibilidade de que seja encontrado a cada vez um conjunto diferente de soluções a depender das condições iniciais consideradas, levando a diferentes comportamentos aparentes dos parâmetros.

### 4.3. Comportamento experimental dos parâmetros com a temperatura

A partir dos dados obtidos com o experimento descrito na seção 3.2, são analisados os comportamentos dos parâmetros do modelo de um diodo com a temperatura. De maneira semelhante ao realizado para a irradiância, estes são analisados individualmente. Incorporando as conclusões da análise dos métodos de extração, os parâmetros no estudo a seguir consideram o fator de idealidade do diodo constante com relação à irradiância, com seu valor calculado a  $1000 \text{ W/m}^2$ , mas variável com a temperatura, a fim de estudar possíveis variações. A fim de separar os efeitos de irradiância e temperatura, os parâmetros são sempre normalizados por seu valor a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  naquela irradiância.

Conforme será demonstrado, o fator de idealidade do diodo  $n$  não tem correlação significativa com a temperatura. Dada a influência desse parâmetro no método de extração, conforme demonstrado na seção 4.2, e à melhora nos resultados que decorreu de tratá-lo como constante, realizou-se primeiro a extração com  $n$  variável, para compreender seu comportamento, e, confirmando sua invariância, os demais parâmetros foram obtidos com  $n$  constante, mantendo seu valor na condição STC para todas as demais. Os parâmetros  $I_{fg}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $R_p$  são independentes do modelo, não sendo afetados por essa consideração.

#### 4.3.1. Corrente fotogerada ( $I_{fg}$ )

Tal como esperado da teoria dos semicondutores, a corrente fotogerada tem um aumento com a temperatura na proporção de seu coeficiente  $\alpha$ , descrito nos catálogos dos fabricantes. Houve certa dispersão nos resultados, conforme se verifica na Figura 4.16. Os motivos para tal dispersão são a dificuldade de se garantir que a temperatura equivalente das células do módulo em teste fosse a que se pretendia, a pequena ordem de magnitude das variações, que aumenta a influência de ruídos, e a diferença entre os coeficientes dos quatro módulos testados.

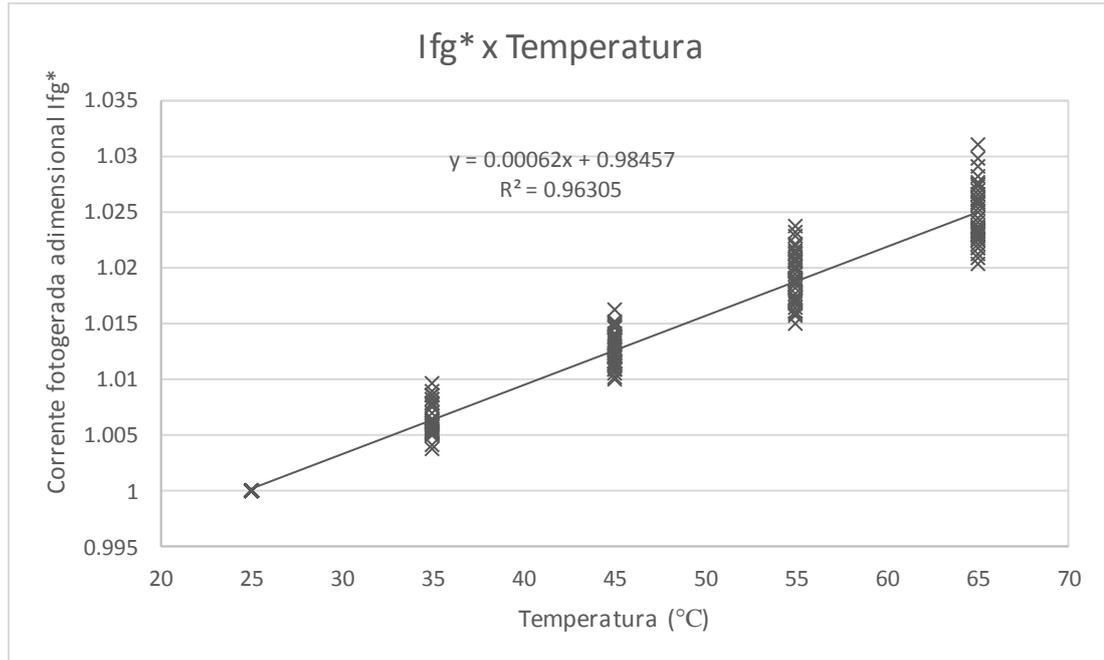


Figura 4.16 – Variação da corrente fotogerada adimensional com a temperatura

#### 4.3.2. Coeficientes de temperatura $\alpha$ e $\beta$

Os fabricantes informam, em geral, para seus módulos, os coeficientes que representam a variação dos três principais parâmetros com a temperatura para uso em condições operativas diferentes da STC. A maioria das formulações de modelo de um diodo utiliza os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ , considerando o valor de catálogo. De posse dos dados disponíveis de uma matriz de medições de 5 temperaturas e 10 níveis de irradiância, foram extraídos os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para cada irradiância, a fim de avaliar se há uma constância em tais coeficientes.

A Figura 4.17 mostra que o coeficiente  $\alpha$  tem uma tendência fraca de crescimento a baixas irradiâncias. Contudo, além do coeficiente de correlação relativamente baixo, nota-se que o valor máximo sugerido pela linha de tendência é cerca de 20% superior ao de referência. Levando-se em conta a ordem de magnitude da variação da corrente com a temperatura no modelo de um diodo, julga-se essa tendência desprezível.

Já na Figura 4.18, o coeficiente  $\beta$  apresenta uma tendência clara, com coeficiente de correlação próximo à unidade da linha de tendência obtida, tendo os quatro módulos testados um comportamento muito próximo com relação a esse parâmetro, indicando que este pode estar relacionado à tecnologia de silício cristalino.



Sendo o valor de  $\beta$  negativo, a Equação 4.3 indica que ele sofre um aumento em módulo, fazendo com que a tensão de circuito aberto caia mais percentualmente com a temperatura em irradiâncias mais baixas que na condição padrão.

#### 4.3.3. Fator de idealidade do diodo ( $n$ )

Corroborando a abordagem utilizada na maioria dos modelos de um diodo, os dados obtidos não demonstraram tendência clara de acréscimo ou decréscimo de  $n$  com a temperatura, como apresenta a Figura 4.19.

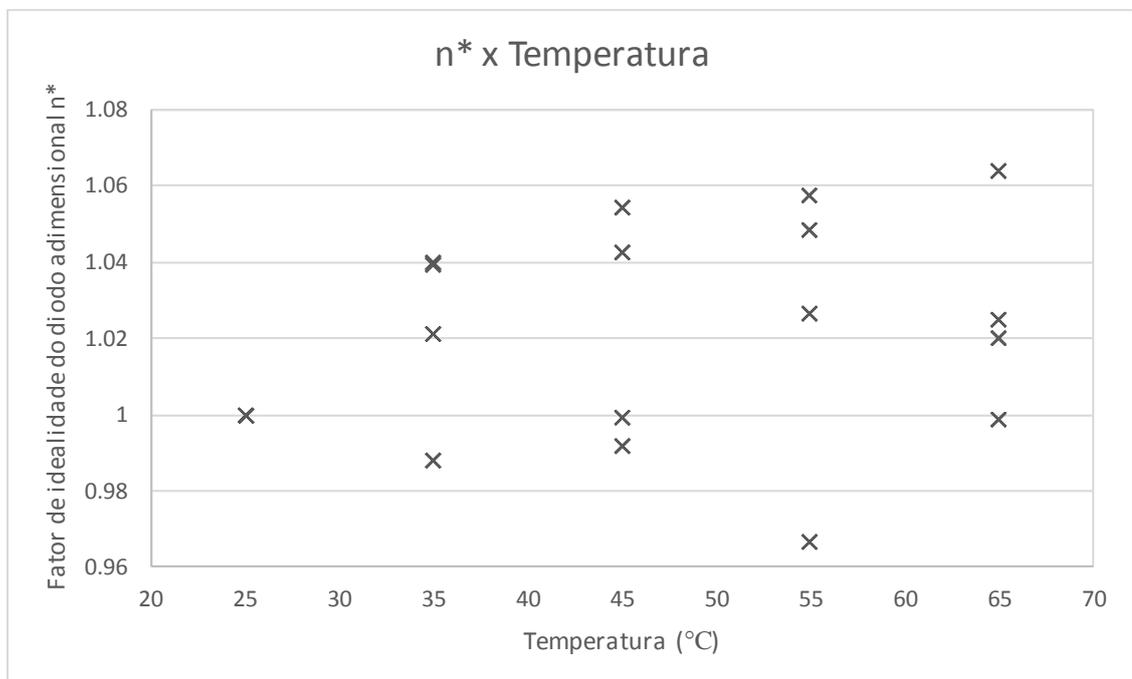


Figura 4.19 – Variação do fator de idealidade do diodo com a temperatura

Qualquer tentativa de ajuste de linha de tendência resulta em coeficientes de correlação de ordem de 0,1, com modesto incremento de  $n$  com a temperatura. Portanto, não parece adequado deixar de tratá-lo como uma constante na modelagem. Ainda, lembrando dos resultados da seção 4.2, e da melhoria na extração dos demais parâmetros ao aplicar o método considerando  $n$  constante, as análises seguintes consideram a extração com  $n$  constante em seu valor das condições STC.

#### 4.3.4. Corrente de saturação reversa ( $I_0$ )

A corrente de saturação reversa é fortemente dependente da temperatura, e tal dependência é considerada em praticamente todos os modelos de um diodo. Os dados obtidos experimentalmente, compilados na Figura 4.20, em escala logarítmica, corroboram essa tendência. A linha cheia representa a formulação adotada no modelo de De Soto et al., que resulta em uma variação aproximadamente exponencial, conforme descrito de maneira detalhada na seção 2.4.3.

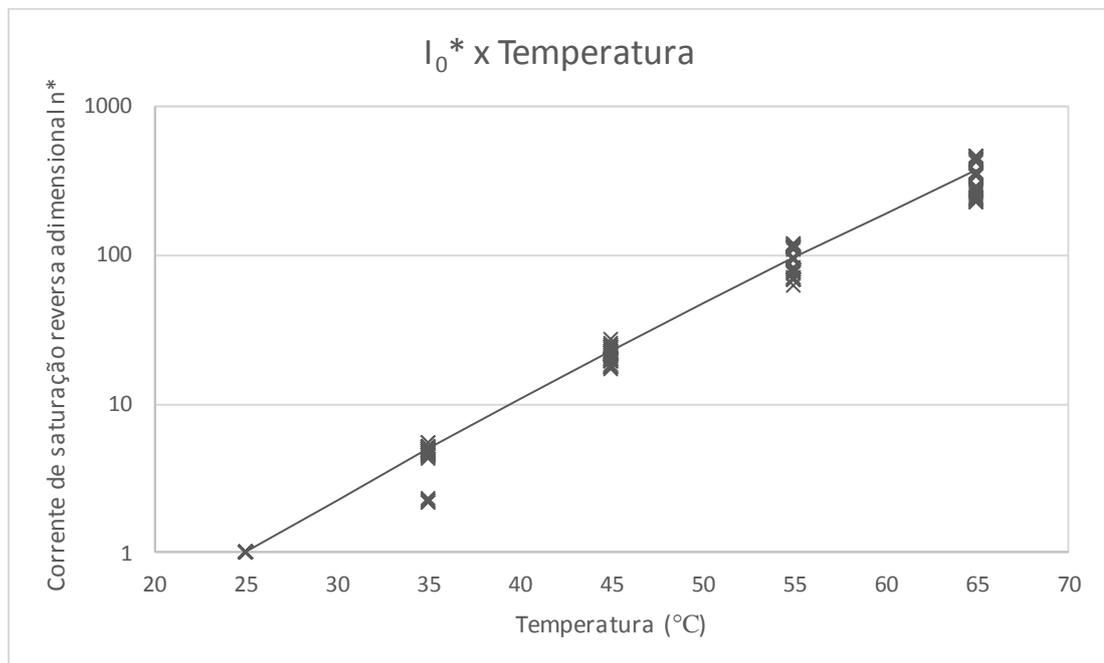


Figura 4.20 – Comportamento da corrente de saturação reversa no escuro  $I_0$  com a variação da temperatura

Pode-se notar que a proposta utilizada no modelo de De Soto et al. representa os dados medidos com boa precisão, com a comparação entre ambas fornecendo um coeficiente de correlação superior a 0,95, e, portanto, pode ser considerada na proposta de modelagem a ser adotada. Outra abordagem que deve ser considerada é o recálculo de  $I_0$  pela Equação 2.8, utilizando os valores atualizados de temperatura, de  $I_{fg}$ , com a variação dada pelo coeficiente  $\alpha$ ,  $V_{oc}$ , variando com o coeficiente  $\beta$ .

#### 4.3.5. Resistência paralela ( $R_p$ )

A resistência paralela obtida com o inverso da inclinação da curva na região de curto-circuito não apresentou correlação clara com a temperatura, sofrendo apenas dispersão, considerando a normalização a 25 °C a cada irradiância testada, o que isola apenas o efeito da temperatura. A Figura 4.21 mostra a magnitude dessas variações, indicando que, com poucas exceções, o valor calculado de  $R_p$  variou entre 50% e 150% daquele na temperatura de referência.

Tais flutuações, além de não apresentarem tendência clara, são de magnitude inferior à variação de  $R_p$  com a irradiância. Uma combinação dos dois efeitos é mostrada na Figura 4.22 para um dos quatro módulos testados, onde os dados foram normalizados pelo valor de  $R_p$  nas condições STC. Pode-se notar que há uma clara tendência de aumento da resistência paralela a baixas irradiâncias, enquanto as flutuações com a temperatura são menores e parecem aleatórias. Optou-se por mostrar os dados de apenas um módulo por facilidade de visualização, mas os resultados para os outros três são similares.

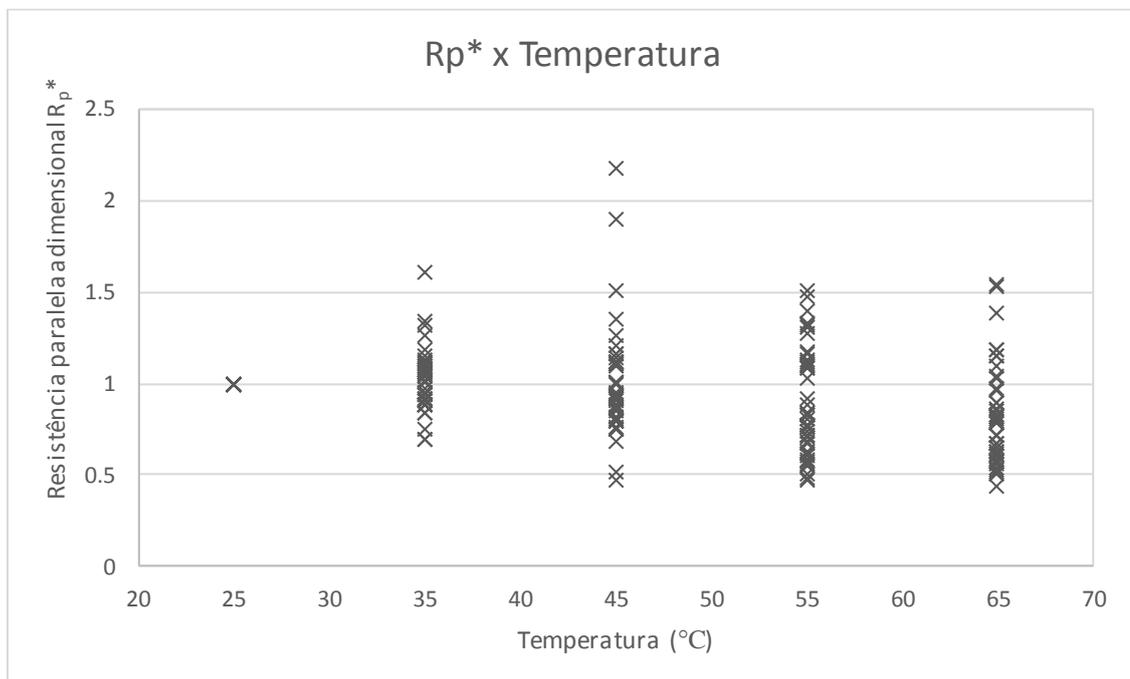


Figura 4.21 – Variação de  $R_p$  com a temperatura

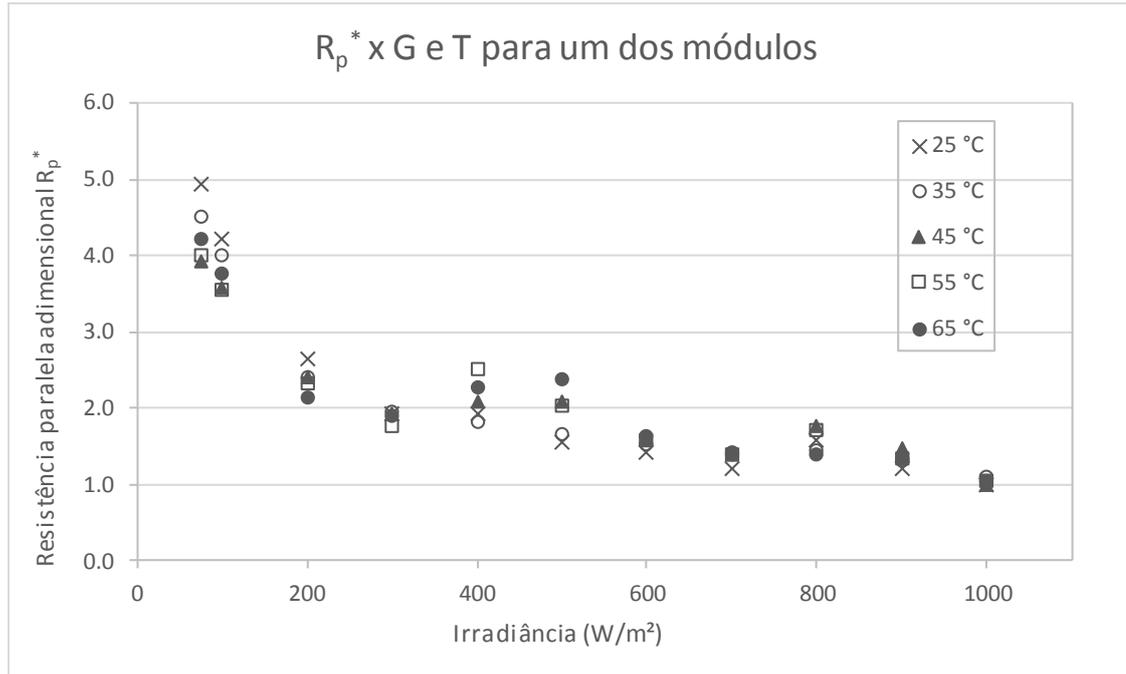


Figura 4.22 – Variação de  $R_p$  com a irradiância e com a temperatura para um dos módulos testados

#### 4.3.6. Resistência série ( $R_s$ )

De maneira similar à resistência paralela, a resistência série também apresentou dispersão quando extraída a diferentes temperaturas, mas sem nenhuma variação notável, com a linha de tendência possuindo uma inclinação próxima à horizontal, com um coeficiente de correlação baixo. A Figura 4.23 traz esses dados compilados.

A maior parte dos valores calculados para a resistência série a temperaturas mais altas foram relativamente próximos aos valores a 25 °C, com as flutuações mais significativas ocorrendo, em geral, na extração a baixas irradiâncias, conforme ilustra a Figura 4.24, que apresenta os dados de  $R_s$  para um dos módulos, normalizados para a condição padrão, de maneira similar à apresentada na Figura 4.22 para a resistência paralela.

É visível que, assim como para a resistência paralela, há uma tendência de aumento da resistência série a baixas irradiâncias, esta já discutida na seção 4.1.5, é mais significativa do que as flutuações que ocorrem com a variação de temperatura.

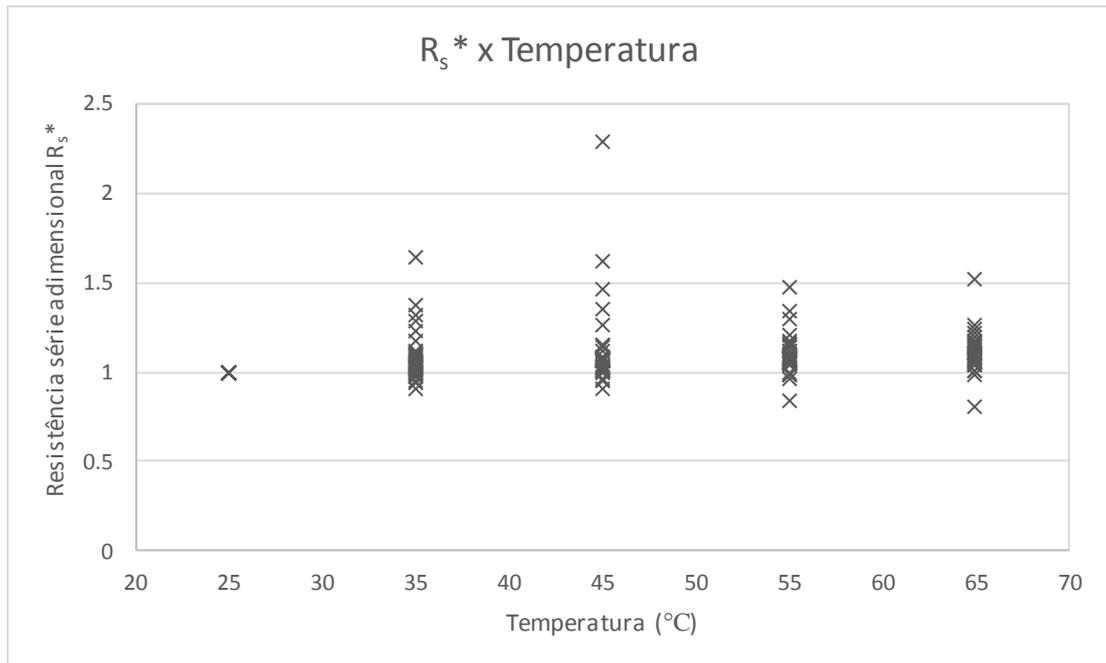


Figura 4.23 – Variação da resistência série  $R_s$  com a temperatura

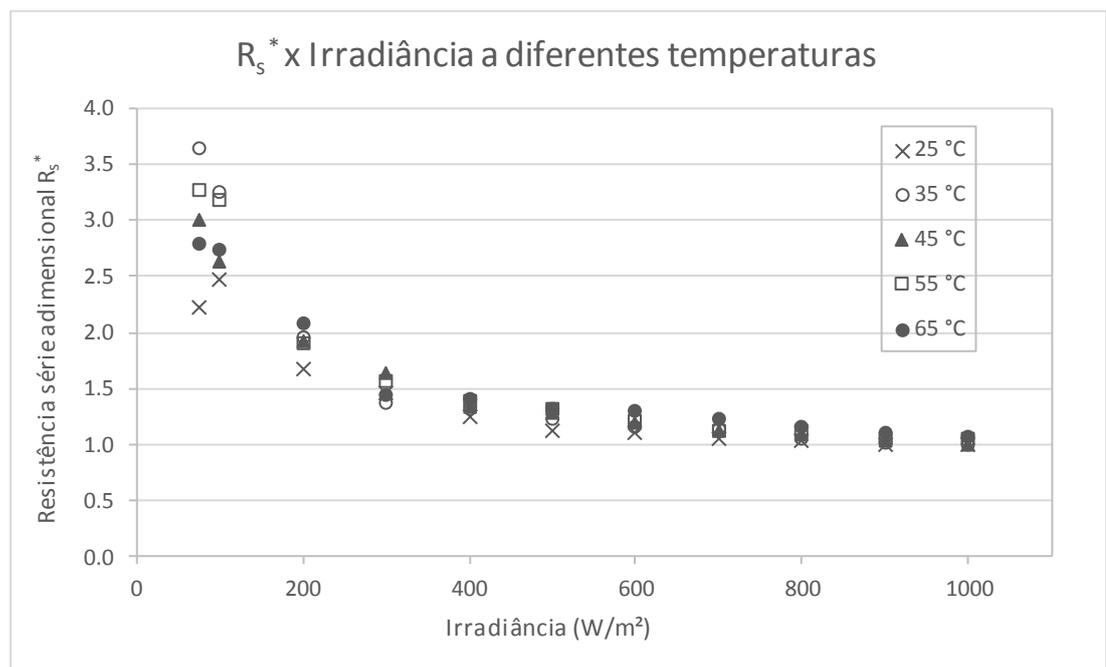


Figura 4.24 – Variação de  $R_s$  com a temperatura e com a irradiância para um dos módulos testados

## 5. AVALIAÇÕES E PROPOSTAS DE MODELAGEM

Com base nos experimentos e nos resultados apresentados no capítulo 4, objetiva-se propor aprimoramentos no modelo de um diodo que melhor se adequem à operação real de módulos fotovoltaicos. As alterações propostas visam principalmente a melhoria das curvas I-V em situações distintas à STC, já que nesses casos o modelo de um diodo tradicional reconhecidamente apresenta desempenho inferior. São introduzidas alterações sucessivas, e sua efetividade é comparada com modelos mais simples.

Inicia-se por propostas de aprimoramento com relação à irradiância, a temperatura constante, depois estuda-se a modelagem na irradiância de referência, variando-se a temperatura. Em uma terceira etapa, avalia-se a variação conjunta das duas condições. Por fim, é apresentado um teste do modelo proposto com experimentos em um módulo em condições externas.

### 5.1. Modelagem dos parâmetros com a irradiância

#### 5.1.1. Modelagem do comportamento de $I_{fg}$ e $n$ com a irradiância

Baseando-se nos resultados apresentados no Capítulo 4, julga-se não ser prioritário realizar alterações nos parâmetros  $I_{fg}$  e  $n$ . A abordagem tradicional, utilizada por boa parte dos autores, de se considerar  $n$  constante com o nível de irradiância e a corrente fotogerada diretamente proporcional à irradiâncias foi demonstrada experimentalmente como adequada, tendo em vista a ausência de tendências contrárias a este entendimento. O fato de a extração dos demais parâmetros apresentar resultados mais adequados quando se considera o fator de idealidade constante reforça essa opção.

#### 5.1.2. Modelagem do comportamento de $R_p$ com a irradiância

Embora o tratamento de  $R_p$  com a irradiância já tenha sido discutido em modelos anteriores, os resultados produzidos com os experimentos discutidos nos capítulos apresentados confirmam experimentalmente, a partir de testes em uma amostra de diferentes módulos fotovoltaicos, a dependência de  $R_p$  com a irradiância. Contudo, a Equação 4.1, obtida para os módulos cristalinos testados, difere da abordagem sugerida em De Soto et al., 2006 ou Lo Brano

et al., 2010 e, ao contrário destas, não mantém o valor de  $R_p$  na condição de referência. Portanto, a fim de evitar tal inconsistência, e dada a semelhança entre as duas, decidiu-se por utilizar a equação inversa com a irradiância para  $R_p$  nessa primeira avaliação. Ressalta-se ainda que, com a extração pelo método de Krenzinger, o modelo inverso apresentou-se bastante adequado.

Para avaliação do ganho de precisão na modelagem de curvas I-V ao se considerar esta e outras variações, as curvas I-V dos 27 módulos testados foram construídas nos 20 níveis de irradiância medidas. Para comparação da precisão das curvas, foram utilizados dois parâmetros: o desvio percentual no ponto de máxima potência e o desvio médio quadrático ponderado de todos os pontos da curva. A composição desses dois parâmetros é apresentada pois enquanto o desvio em  $P_{mp}$  representa desvios no ponto de maior interesse de sistemas fotovoltaicos, o desvio médio quadrático explicita deformações da curva I-V.

O resumo da comparação dessas variáveis para o modelo que considera os parâmetros  $I_0$ ,  $n$ ,  $R_s$  e  $R_p$  constantes, chamado de “Parâmetros Constantes” e o que considera  $R_p$  inversamente proporcional à irradiância e os demais constantes, chamado de “ $R_p$  Inverso”, é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Desvios para modelos Parâmetros Constantes e  $R_p$  Inverso

Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	Desvio Médio $P_{mp}$ (%)		Desvio médio quadrático ponderado	
	Parâmetros Constantes	$R_p$ Inverso	Parâmetros Constantes	$R_p$ Inverso
1000	-0,04%	-0,04%	0.40%	0.40%
950	-0,15%	-0,10%	0.45%	0.43%
900	-0,21%	-0,09%	0.47%	0.43%
850	-0,26%	-0,08%	0.46%	0.39%
800	-0,21%	0,05%	0.44%	0.35%
750	-0,12%	0,22%	0.39%	0.32%
700	-0,22%	0,23%	0.46%	0.36%
650	-0,31%	0,25%	0.54%	0.40%
600	-0,28%	0,42%	0.59%	0.48%
550	-0,38%	0,48%	0.69%	0.56%
500	-0,52%	0,53%	0.82%	0.64%
450	-0,48%	0,81%	0.95%	0.82%
400	-0,81%	0,76%	1.12%	0.88%
350	-1,00%	0,95%	1.30%	1.05%
300	-1,29%	1,15%	1.59%	1.25%
250	-1,56%	1,59%	1.90%	1.55%
200	-2,09%	2,09%	2.32%	1.96%
150	-3,39%	2,51%	3.14%	2.45%
100	-5,50%	3,83%	4.51%	3.62%
75	-7,94%	4,73%	5.93%	4.48%

Para facilitar o entendimento desse resultado, a Figura 5.1 e a Figura 5.2 apresentam, respectivamente, de forma gráfica, o desvio absoluto no ponto de máxima potência e o desvio médio quadrático ponderado para os dois modelos. Importante notar que a Figura 5.1 apresenta o valor absoluto do desvio em  $P_{mp}$ , enquanto a Tabela 5.1 apresenta seu valor com sinal. Tal distinção visa a facilidade de comparação da magnitude do desvio, mas oculta o fato de que, enquanto o modelo de parâmetros constante subestima o valor da potência máxima do módulo, o modelo  $R_p$  Inverso acaba por superestimá-lo. Tal comportamento é de certa forma esperado, pois, no conjunto de módulos testados, foi demonstrado que  $R_p$  a baixas irradiâncias tem um crescimento menor do que o modelo inverso sugere, quando considerado o método de extração de Phang et al.

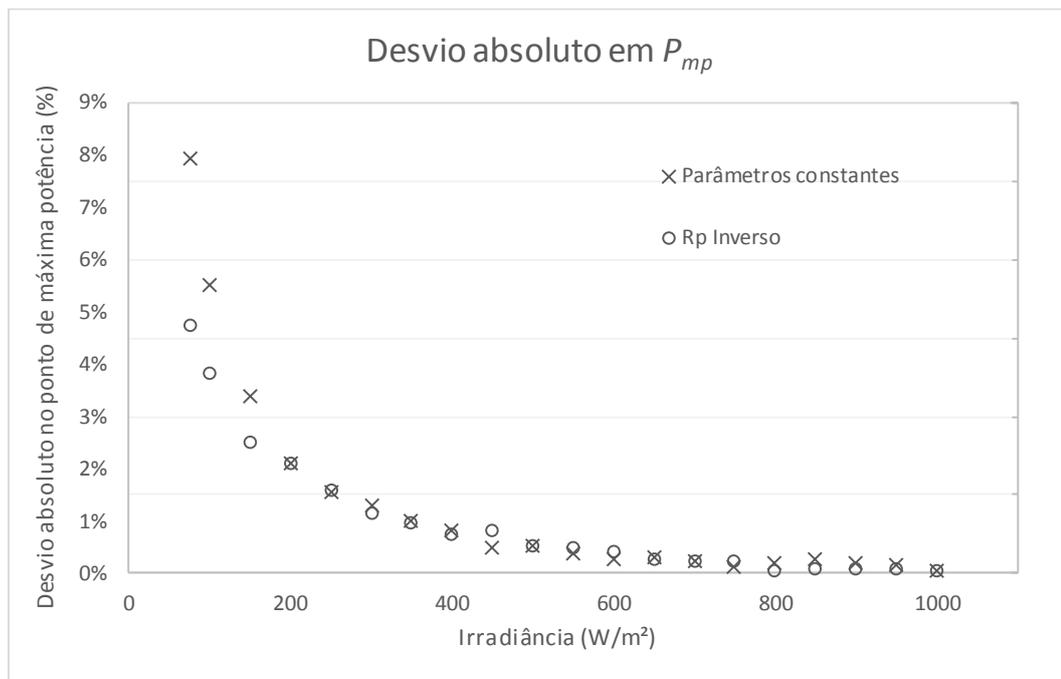


Figura 5.1 – Desvio em  $P_{mp}$  – modelos Parâmetros Constantes e  $R_p$  Inverso

O resultado de desvio médio quadrático ponderado demonstra haver um ganho ao se considerar a variação de  $R_p$ . Contudo, em ambos os modelos, ao utilizar-se a ponderação pela irradiância, percebe-se que as curvas construídas a irradiâncias mais baixas, especialmente abaixo de 200 W/m<sup>2</sup>, continuam apresentando desempenho bastante inferior àquelas nas condições próximas à STC.

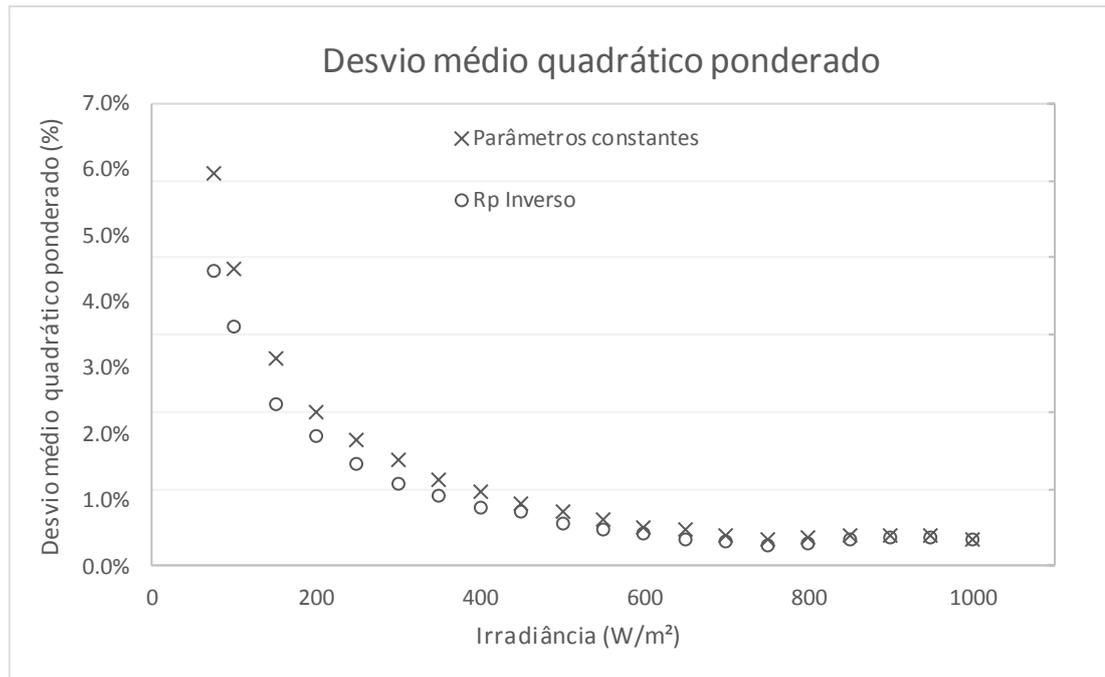


Figura 5.2 – Desvio médio quadrático ponderado – modelos Parâmetros Constantes e  $R_p$  Inverso

Apesar de, especialmente em usinas de grande porte, instaladas em locais de irradiação favorável, tais situações possuam impacto relativamente baixo na geração total de energia, em determinadas localidades estas acontecem com frequência elevada. Como exemplo, a Figura 5.3 apresenta a curva de permanência da irradiação no plano inclinado de 30 graus para o mês de junho de 2018 na cidade de Porto Alegre no período diurno. As medidas foram realizadas com um piranômetro *First Class*, MS-410 do fabricante EKO, instalado em uma estação solarimétrica na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, que cedeu os dados para uso neste trabalho.

Verifica-se que cerca de 60% das medidas obtidas no período diurno para o mês em questão apresentaram irradiações inferiores a  $200 \text{ W/m}^2$ , no plano de 30 graus de inclinação, representativa de instalações de pequeno porte para essa localidade. Assim, demonstra-se que as condições de baixa irradiação podem ser de grande relevância na estimativa de produção de energia de um sistema fotovoltaico, a depender da localidade considerada, reforçando a necessidade de se utilizar um modelo que forneça bons resultados também nessas condições de operação.

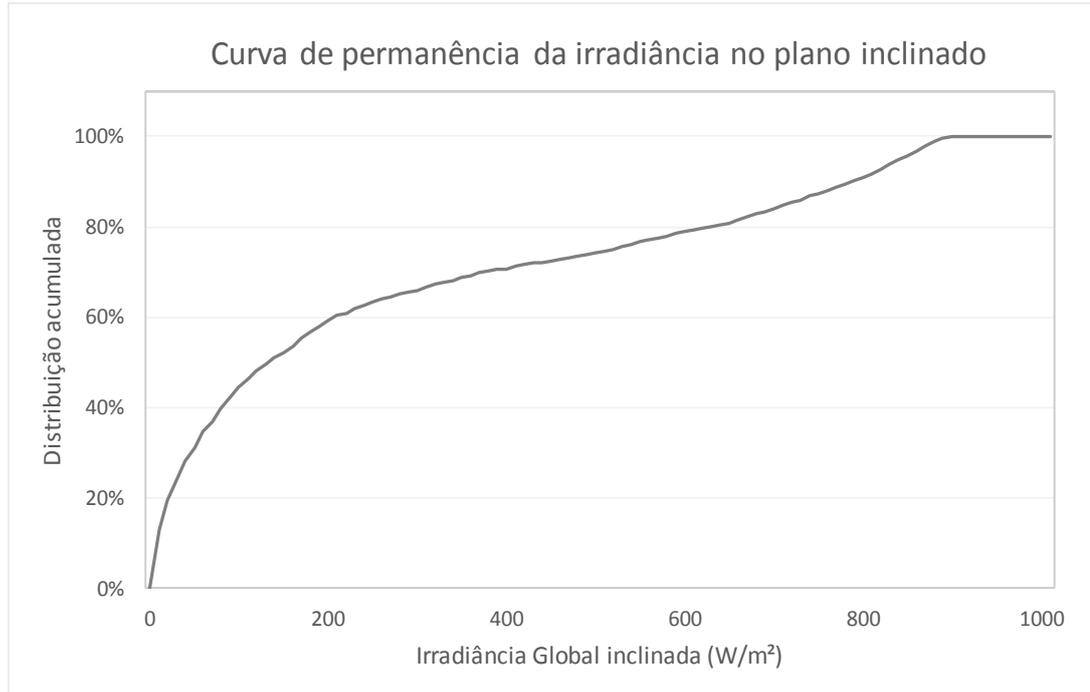


Figura 5.3 – Curva de permanência da irradiância no plano inclinado para o mês de junho de 2018 na cidade de Porto Alegre

### 5.1.3. Modelagem de $R_s$ e $I_0$ com a irradiância

Conforme demonstrado no Capítulo 4, a depender do procedimento utilizado para a extração,  $R_s$  apresenta comportamento variável com a irradiância. Foi visto que, ao se fixar tanto  $n$  quanto  $I_0$  durante a extração, a resistência série extraída apresenta grande dispersão com relação à irradiância, mas com uma linha de tendência de constância. Portanto, julga-se que, se a modelagem for feita com  $I_0$  constante,  $R_s$  também deve ser considerado da mesma maneira. Contudo, ao se recalculer  $I_0$  a cada irradiância com a Equação 2.8, incorporando as variações de  $R_p$ ,  $I_{fg}$  e  $V_{oc}$ , a resistência série apresentou uma tendência de acréscimo a baixas irradiâncias, e esta será considerada na modelagem.

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s n k T}\right) - 1} \quad (2.35)$$

A estratégia de recálculo de  $I_0$ , conforme foi discutido na revisão bibliográfica, é utilizada em diversos modelos, como os de Lo Brano et al., Krenzinger e Villalva et al. Nesta seção, está

sendo avaliado o comportamento dos modelos variando-se exclusivamente a irradiância, e o uso do recálculo de  $I_0$  na modelagem a diferentes temperaturas será estudado posteriormente.

Com essa consideração, é necessário primeiro extrair os parâmetros do módulo estudado, construir a curva I-V para a irradiância de interesse, e, com os novos valores calculados de  $I_{fg}$ ,  $V_{oc}$ , além de  $R_p$  atualizado pela Equação 2.26, e  $R_s$  obtido da Equação 4.2, calcula-se o novo valor de  $I_0$  com a Equação 2.8. A seguir, calcula-se a nova curva I-V, com a qual se calculam os desvios médios de  $P_{mp}$  e o desvio médio quadrático ponderado, denominando-se esse modelo de  $R_s$  e  $I_0$  Variáveis. A Tabela 5.2 apresenta as comparações desse modelo com o modelo  $R_p$  Inverso, representadas graficamente na Figura 5.4 e na Figura 5.5. O modelo  $R_p$  Inverso tende a superestimar a produção para a maioria condições de operação, enquanto o modelo  $R_s$  e  $I_0$  Variáveis subestima a geração para boa parte das irradiâncias, superestimando-a apenas nas mais baixas.

Tabela 5.2 – Desvios para modelos  $R_p$  Inverso e  $R_s$  e  $I_0$  Variáveis

Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	Desvio Médio $P_{mp}$		Desvio médio quadrático ponderado	
	$R_p$ Inverso	$R_s$ e $I_0$ Variáveis	$R_p$ Inverso	$R_s$ e $I_0$ Variáveis
1000	-0,04%	-0,04%	0.40%	0.40%
950	-0,10%	-0,27%	0.43%	0.53%
900	-0,09%	-0,42%	0.43%	0.62%
850	-0,08%	-0,57%	0.39%	0.67%
800	0,05%	-0,59%	0.35%	0.69%
750	0,22%	-0,56%	0.32%	0.64%
700	0,23%	-0,69%	0.36%	0.74%
650	0,25%	-0,80%	0.40%	0.80%
600	0,42%	-0,75%	0.48%	0.80%
550	0,48%	-0,80%	0.56%	0.82%
500	0,53%	-0,85%	0.64%	0.86%
450	0,81%	-0,68%	0.82%	0.82%
400	0,76%	-0,80%	0.88%	0.90%
350	0,95%	-0,68%	1.05%	0.91%
300	1,15%	-0,53%	1.25%	0.95%
250	1,59%	-0,12%	1.55%	1.04%
200	2,09%	0,40%	1.96%	1.26%
150	2,51%	0,88%	2.45%	1.64%
100	3,83%	2,32%	3.62%	2.61%
75	4,73%	3,33%	4.48%	3.41%

Pode-se notar que esse modelo tem como resultado um aumento dos desvios médios quadráticos ponderados e desvios absolutos para irradiâncias mais altas, e a redução destes para

os níveis de irradiância mais baixos. Assim, esse modelo tende a uniformizar os desvios ponderados em relação ao que considera apenas a resistência paralela como variável.

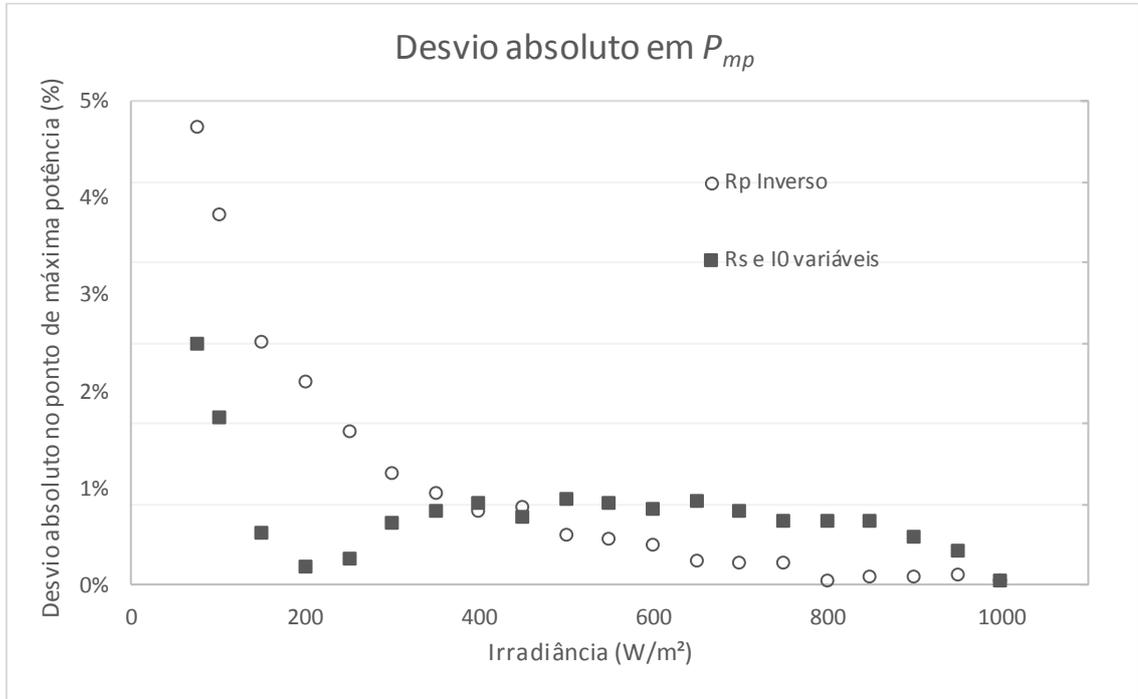


Figura 5.4 – Desvio absoluto no  $P_{mp}$  para os modelos  $R_p$  Inverso e  $R_s$  e  $I_0$  Variáveis

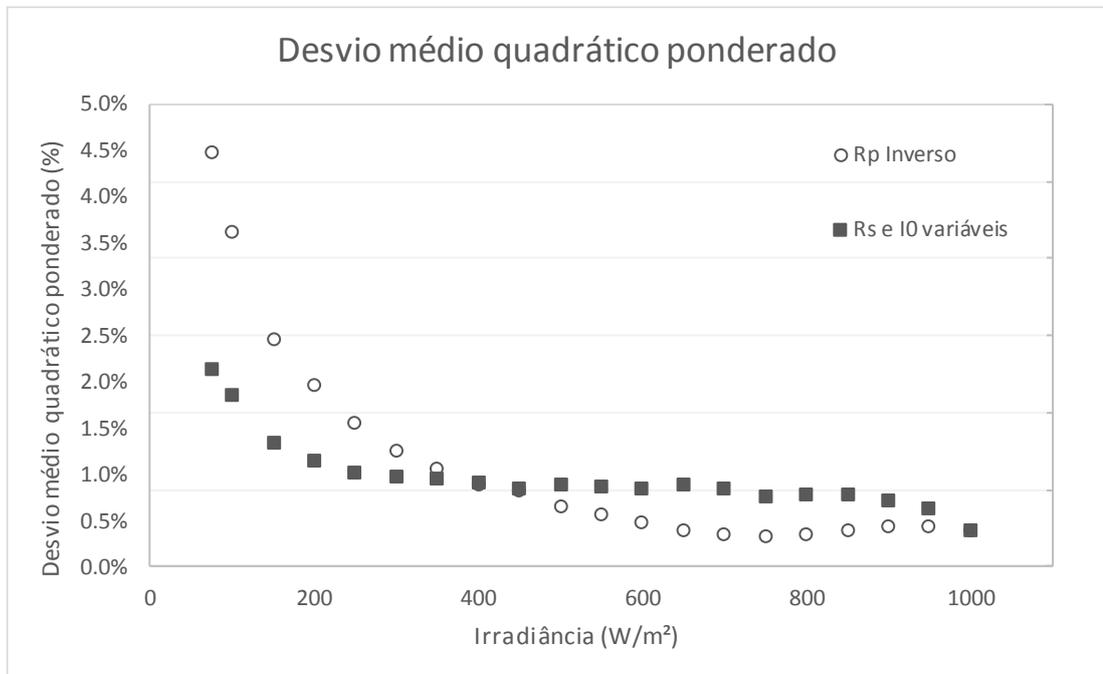


Figura 5.5 – Desvio médio quadrático ponderado para os modelos  $R_p$  Inverso e  $R_s$  e  $I_0$  Variáveis

### 5.1.4. Resumo das análises com a irradiância

Um resumo dos três modelos estudados, com seu respectivo tratamento de cada um dos cinco parâmetros do modelo de um diodo em relação à irradiância é apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resumo do tratamento dos parâmetros com a irradiância nos modelos estudados

Modelo	$I_{fg}$	$n$	$I_0$	$R_p$	$R_s$
Parâmetros Constantes	Proporcional	Constante	Constante	Constante	Constante
$R_p$ Inverso	Proporcional	Constante	Constante	Inverso	Constante
$R_s$ e $I_0$ variáveis	Proporcional	Constante	Eq. 2.8	Inverso	Eq. 4.2

Para comparação dos modelos, apresenta-se, na Figura 5.6 e na Figura 5.7, respectivamente, os desvios percentuais no ponto de máxima potência e o desvio médio quadrático ponderado para cada modelo. Na Figura 5.6, ao contrário das figuras anteriores onde se discutia o desvio no ponto de máxima potência em termos absolutos, apresenta-se seu valor com o sinal, permitindo uma visualização completa dos efeitos de cada modelo.

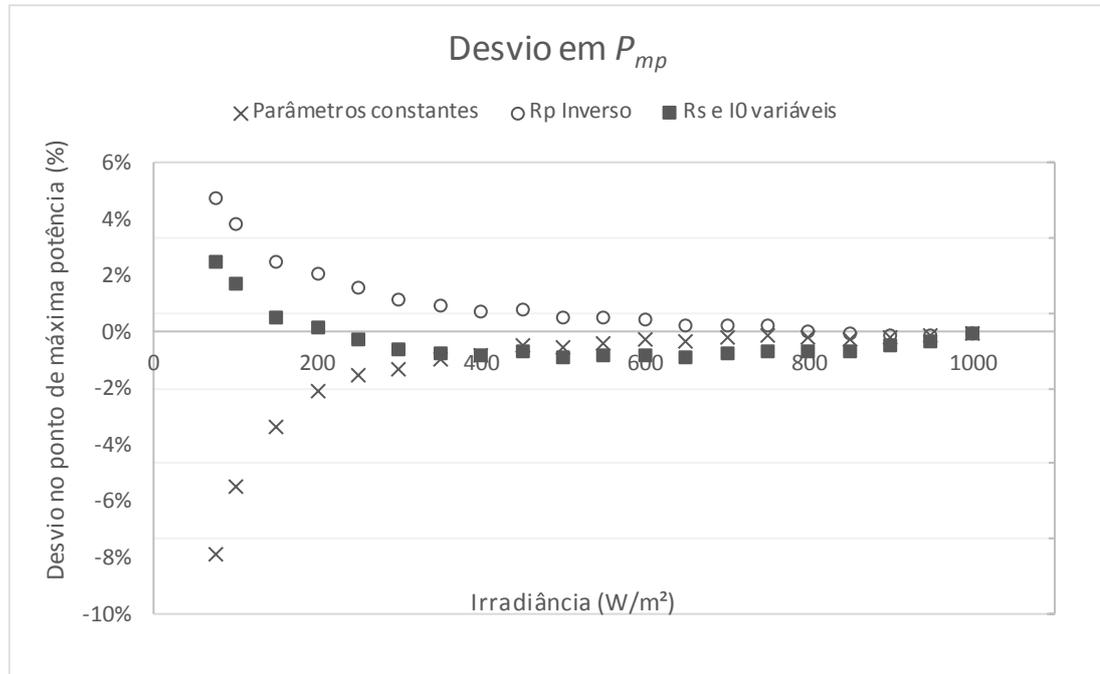


Figura 5.6 – Desvio percentual em  $P_{mp}$  para os três modelos estudados

Destaca-se da Figura 5.6 que o modelo original, de parâmetros constantes, apresenta os maiores desvios absolutos no ponto de máxima potência, e sempre subestima o valor de potência produzida. Já o modelo  $R_p$  Inverso apresenta desvios um pouco inferiores, mas tem

quase sempre uma tendência de superestimar a potência. O modelo que considera a variação de  $R_s$  e  $I_0$  subestima a potência em irradiâncias médias e altas, e superestima apenas em faixas mais baixas, além de apresentar em geral os valores absolutos mais baixos de desvios. O fato de os desvios não possuírem sempre a mesma tendência pode ser positivo em termos da simulação de sistemas em operação a diferentes condições, já que os desvios acabam em partes se compensando.

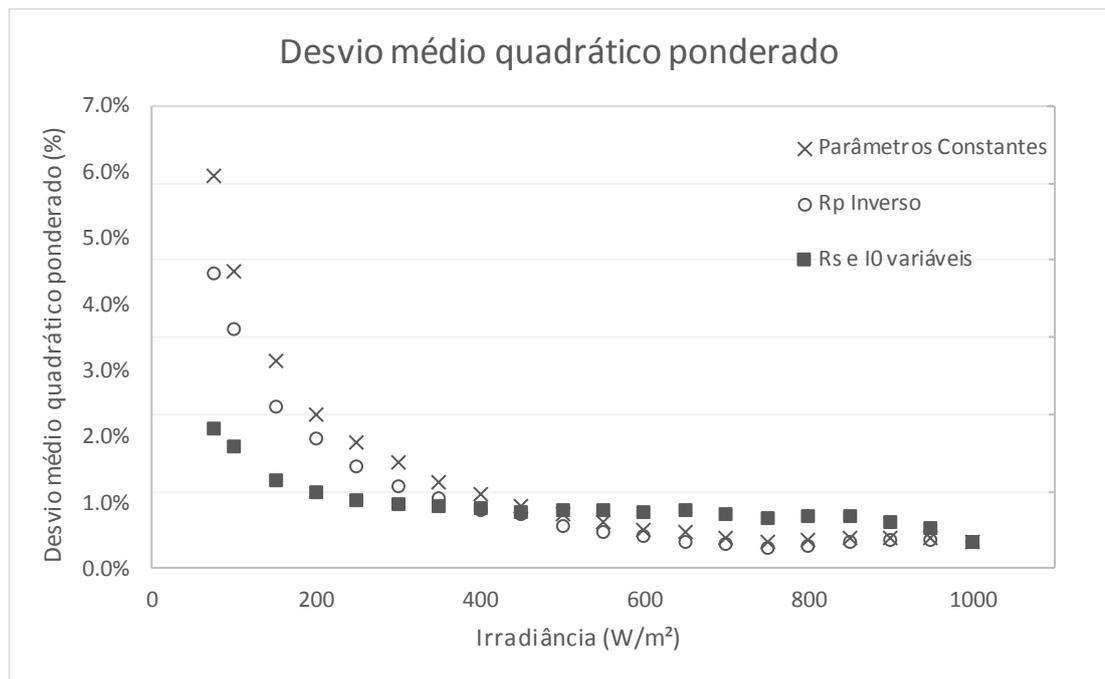


Figura 5.7 – Desvio médio quadrático ponderado para os três modelos estudados

Em termos de desvio médio quadrático, o modelo  $R_s$  e  $I_0$  Variáveis também apresenta os valores mais baixos, indicando que as curvas construídas com esse modelo são mais próximas das obtidas experimentalmente.

## 5.2. Modelagem dos parâmetros com a temperatura

### 5.2.1. Modelagem do comportamento de $I_{fg}$ com a temperatura

Conforme discutido na seção 4.3.1, o comportamento da corrente fotogerada segue o padrão conhecido, de pequeno incremento com a temperatura. Avaliou-se na seção 4.3.2 uma possível variação do coeficiente  $\alpha$  com a irradiância, mas concluiu-se que essa não é significativa dada sua magnitude, frente à já diminuta importância do coeficiente em si.

### 5.2.2. Modelagem do comportamento de $n$ , $R_s$ e $R_p$ com a temperatura

Os demais resultados do capítulo 4.3 indicaram que não há tendência de alteração dos parâmetros  $n$ ,  $R_s$  e  $R_p$  com a temperatura. Houve alguma flutuação, principalmente para as duas resistências, mas esta parece não seguir um padrão, e é relativamente pequena frente às variações desses parâmetros com a irradiância. Embora o fator de idealidade do diodo tenha assumido valores ligeiramente diferentes com a temperatura, julga-se mais adequado mantê-lo sempre constante após extraído, uma vez que este é característica intrínseca do material semiconductor, e que tal procedimento parece melhorar a qualidade dos dados extraídos, reduzindo a dispersão nos demais parâmetros e levando a curvas mais fidedignas às medidas.

### 5.2.3. Modelagem do comportamento de $I_0$ com a temperatura

A corrente de saturação reversa  $I_0$  é considerada como variável com a temperatura na maioria dos modelos. Avaliou-se no capítulo 4.3.4 esse comportamento, e demonstrou-se que o modelo utilizado no modelo de De Soto et al. é adequado para representação dessa variação. Outra possibilidade discutida, e que será testada a seguir, foi o recálculo de  $I_0$  com os valores atualizados de  $I_{fg}$  e  $V_{oc}$ , pelos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ . Para avaliação do modelo mais adequado às variações exclusivamente de temperatura, essas duas alternativas são comparadas para as medições realizadas na irradiância de referência, 1000 W/m<sup>2</sup>, nas cinco temperaturas para os quatro módulos fotovoltaicos.

A primeira alternativa será chamada de “De Soto”, por se tratar da abordagem utilizada nesse modelo. Após o cálculo da corrente de saturação reversa de referência, a 25 °C, obtida pelo método de extração descrito na seção 3.4, os valores nas demais temperaturas são calculados com a Equação 2.23, na qual  $E_g$  é dado pela Equação 2.25, ambas repetidas abaixo.

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \frac{1}{k} \left( \frac{E_g}{T} \Big|_{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \Big|_T \right) \right] \quad (2.23)$$

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - 0,0002677(T - T_{ref}) \quad (2.25)$$

No segundo teste, denominado de “ $I_0$  Recalculado”, o valor da corrente de saturação reversa do diodo é recalculado a cada nova temperatura, utilizando a Equação 2.8 com os valores atualizados de  $T$ ,  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ , de maneira similar à já realizada para as variações de irradiância no modelo  $R_s$  e  $I_0$  Variáveis, discutido na seção 5.1.3.

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s n k T}\right) - 1} \quad (2.8)$$

A Tabela 5.4 apresenta a comparação dos desvios médios quadráticos das curvas obtidas com ambos os modelos, além dos desvios médios no ponto de máxima potência em cada uma das temperaturas testadas para o conjunto de quatro módulos ensaiados conforme a descrição na seção 3.2.

Tabela 5.4 – Comparação dos modelos de variação de temperatura testados

Temperatura (°C)	Desvio Médio $P_{mp}$ (%)		Desvio médio quadrático ponderado (%)	
	De Soto	$I_0$ Recalculado	De Soto	$I_0$ Recalculado
25	0.03%	0.03%	0.31%	0.31%
35	0.40%	0.25%	0.68%	0.41%
45	0.75%	0.47%	1.07%	0.43%
55	1.14%	0.93%	1.43%	0.51%
65	1.36%	1.12%	1.88%	0.60%

Os resultados são apresentados de forma gráfica nas Figura 5.8 e Figura 5.9. Nota-se que a magnitude de ambos os desvios cresce para os dois modelos com o aumento da temperatura, com o modelo  $I_0$  Recalculado apresentando resultados com desvios inferiores aos do modelo De Soto. Avaliando os resultados de módulos individuais, percebe-se que, apesar de os resultados médios não terem sido tão discrepantes, fazendo com que o desvio no  $P_{mp}$  seja similar, no modelo De Soto ocorrem desvios individuais mais elevados, inclusive na forma da curva. O modelo  $I_0$  Recalculado, por sua vez, tende a apresentar resultados de qualidade mais constante, com um formato de curva mais adequado, como confirmado pela análise do desvio médio quadrático dos dados.

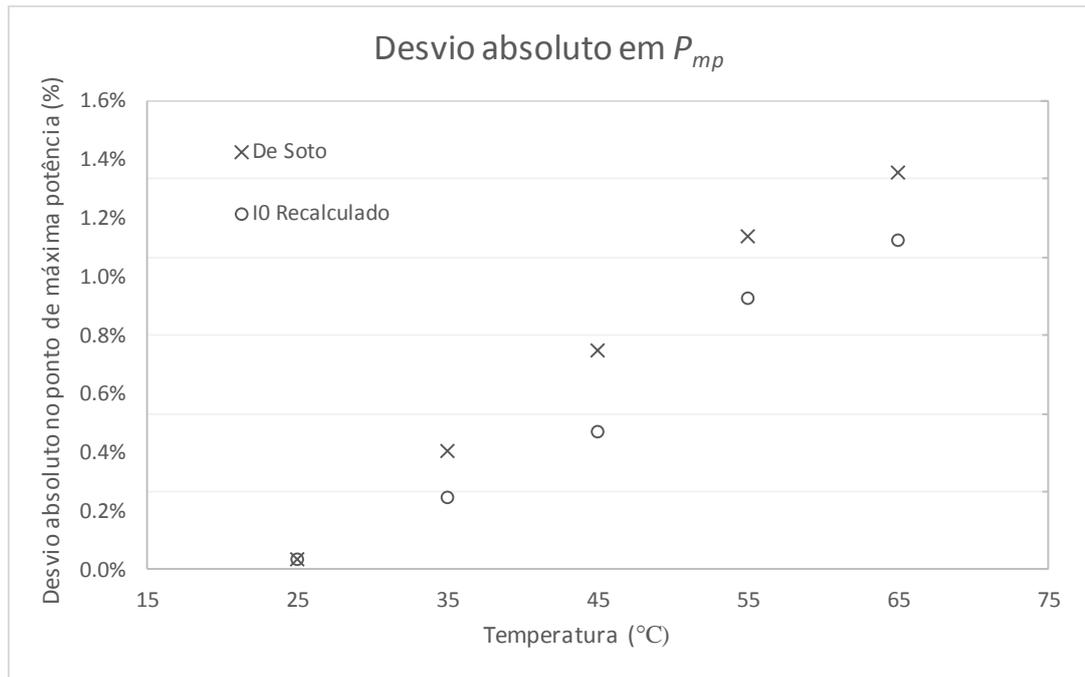


Figura 5.8 – Desvio absoluto no  $P_{mp}$  com ambos modelos testados

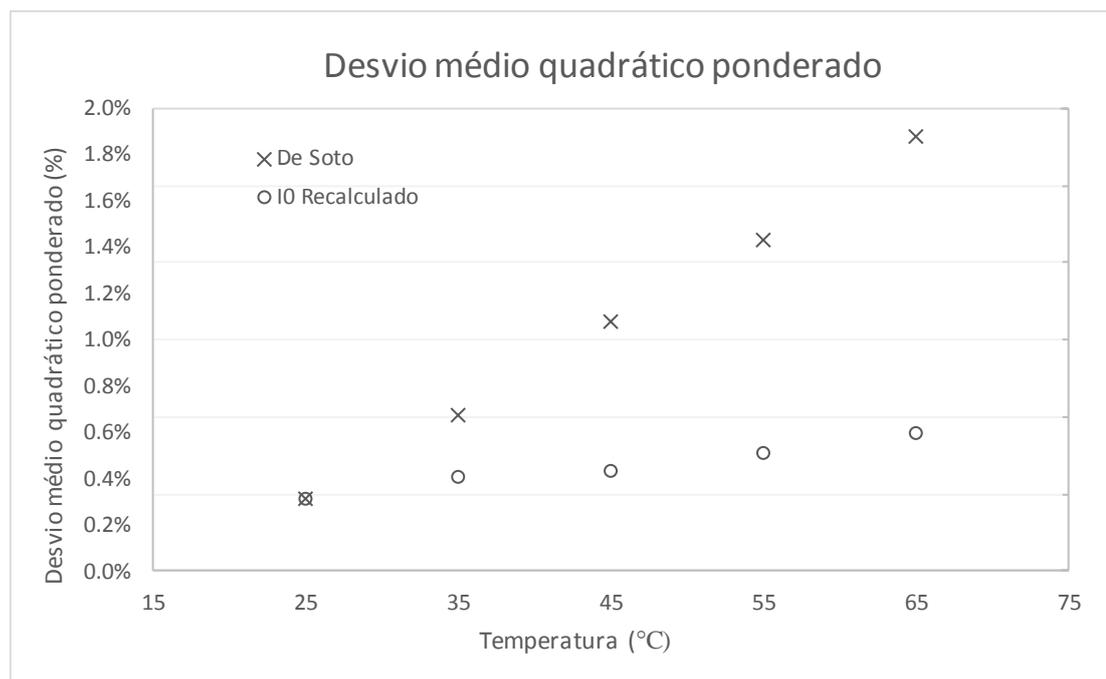


Figura 5.9 – Desvio médio quadrático para ambos modelos testados

Assim, julga-se mais adequado utilizar-se a Equação 2.8 para recalculer a corrente de saturação reversa do diodo com as alterações de temperatura. Tal recomendação simplifica a construção do modelo completo, já que nas análises anteriores também se concluiu que é adequado o recálculo de  $I_0$  com as alterações de irradiância.

### 5.3. Modelagem completa com temperatura e irradiância

As seções 5.1 e 5.2 estudaram separadamente as variações de temperatura e irradiância, e como estas influenciam no comportamento de módulos fotovoltaicos. Três alternativas de tratamento dos parâmetros com a irradiância foram avaliados, e duas com a temperatura. Demonstrou-se que a abordagem tradicional de variação da corrente fotogerada é adequada, bem como a manutenção do parâmetro  $n$  constante. Foram estipuladas equações empíricas para as duas resistências parasíticas, e demonstrou-se que o recálculo do valor de  $I_0$  a cada condição de temperatura e irradiância leva a melhores resultados. Assim, o modelo proposto até o momento pode ser descrito conforme a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resumo do comportamento dos parâmetros do modelo proposto até o momento

Variável	$I_{fg}$	$n$	$I_0$	$R_p$	$R_s$
<b>Irradiância</b>	Proporcional	Constante	Recalculado Eq. 2.8	Inverso	Eq. 4.2
<b>Temperatura</b>	Varição com $\alpha$	Constante	Recalculado Eq. 2.8	Constante	Constante

#### 5.3.1. Avaliação do coeficiente $\beta$

Conforme mostrado na seção 4.3.2, há uma tendência de a variação percentual no  $V_{oc}$  tornar-se mais acentuada a baixas irradiâncias, traduzindo-se num incremento do módulo do coeficiente  $\beta$ , dado pela Equação 4.3, repetida abaixo.

$$\beta^*(G) = -0,11274 \ln G + 1,7731 \quad (4.3)$$

A fim de avaliar o a influência da consideração dessa variação, foram selecionadas duas temperaturas, 45 °C e 65 °C, para as quais foram calculadas as curvas para todas as temperaturas e irradiâncias considerando-se: (a)  $\beta$  constante e (b)  $\beta$  variável com a Equação 4.3. São consideradas as métricas de desvio do ponto de máxima potência e desvio médio ponderado da corrente, como nos casos anteriores. A Tabela 5.6 resume os desvios no ponto de máxima potência para ambos os modelos a três diferentes temperaturas, 25 °C, 45 °C e 65 °C. Na temperatura de referência, ambos modelos fornecem resultados idênticos, e por isso são mostrados em apenas uma coluna.

Tabela 5.6 – Desvio no ponto de máxima potência com diferentes modelos de  $\beta$ 

Irradiância	25° C		45° C		65° C	
	$\beta$ Constante/ Variável	$\beta$ Constante	$\beta$ Variável	$\beta$ Constante	$\beta$ Variável	
1000	-0.34%	-0.11%	-0.11%	0.86%	0.86%	
900	-0.40%	-0.12%	-0.22%	0.74%	0.53%	
800	-0.38%	0.10%	-0.11%	0.87%	0.41%	
700	-0.45%	0.04%	-0.29%	1.12%	0.39%	
600	-0.31%	0.31%	-0.16%	1.29%	0.25%	
500	-0.17%	0.51%	-0.12%	1.70%	0.29%	
400	-0.47%	0.41%	-0.42%	1.71%	-0.27%	
300	0.56%	1.70%	0.60%	3.30%	0.73%	
200	0.67%	2.05%	0.57%	3.95%	0.67%	
100	1.72%	3.48%	1.36%	6.06%	1.32%	

Percebe-se que no modelo que considera  $\beta$  variável, os desvios são significativamente inferiores que no que considera esse parâmetro constante, indicando que essa alteração traz melhoria ao modelo. As condições onde há maior melhora são aquelas aparentemente menos usuais na operação de sistemas fotovoltaicos, de baixas irradiâncias em conjunto com altas temperaturas.

Contudo, essas condições são possíveis, e acontecem por exemplo quando há uma cobertura momentânea de nuvens em um sistema no qual os módulos já estão aquecidos. Em condições de temperatura mais usuais para baixas irradiâncias, como 45 °C, também se percebe alguma melhora, conforme ilustrado na Figura 5.10, na qual os desvios na temperatura de 25 °C são apresentados como referência. A Figura 5.11 apresenta o mesmo resultado para a temperatura de 65 °C.

Nota-se que ao utilizar-se os modelos com  $\beta$  variável, os desvios em temperaturas mais elevadas tornam-se inclusive inferiores àqueles verificados na temperatura de referência em algumas das irradiâncias, em geral nas mais baixas.

A análise do desvio médio quadrático ponderado da corrente, apresentado na Tabela 5.7 leva a conclusões semelhantes, indicando que há uma melhora de adequação da curva simulada à medida em praticamente todas as condições, em especial nas de baixa irradiância e alta temperatura, que, ao não considerar a variação de  $\beta$ , apresentam por vezes desvios elevados. Tais desvios decorrem da estimativa de um  $I_0$  inadequado quando se utiliza o coeficiente  $\beta$  constante nas temperaturas mais elevadas. Na equação de recálculo da corrente  $I_0$ , Equação 2.8, a tensão de circuito aberto, que por sua vez é dependente de  $\beta$ , é componente de uma

exponencial. Portanto, pequenos desvios no coeficiente  $\beta$  podem levar a grandes alterações em  $I_0$ , que por sua vez causam distorções significativas na curva I-V.

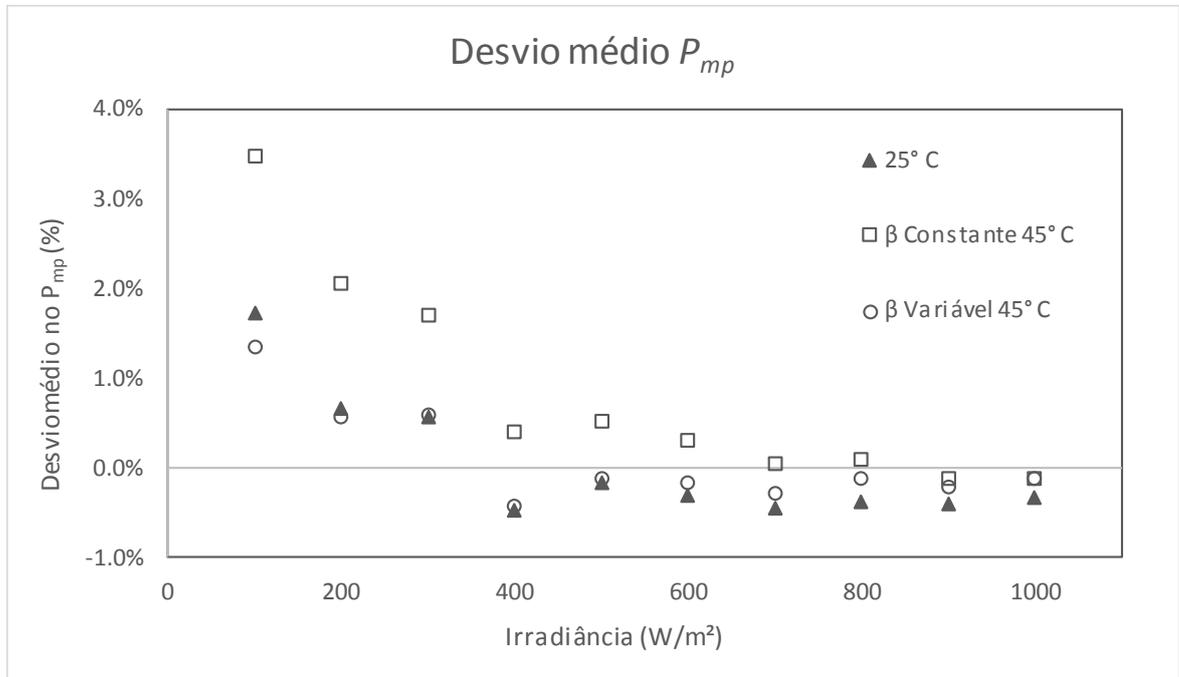


Figura 5.10 – Desvio médio no  $P_{mp}$  a 45 °C com diferentes modelos de  $\beta$

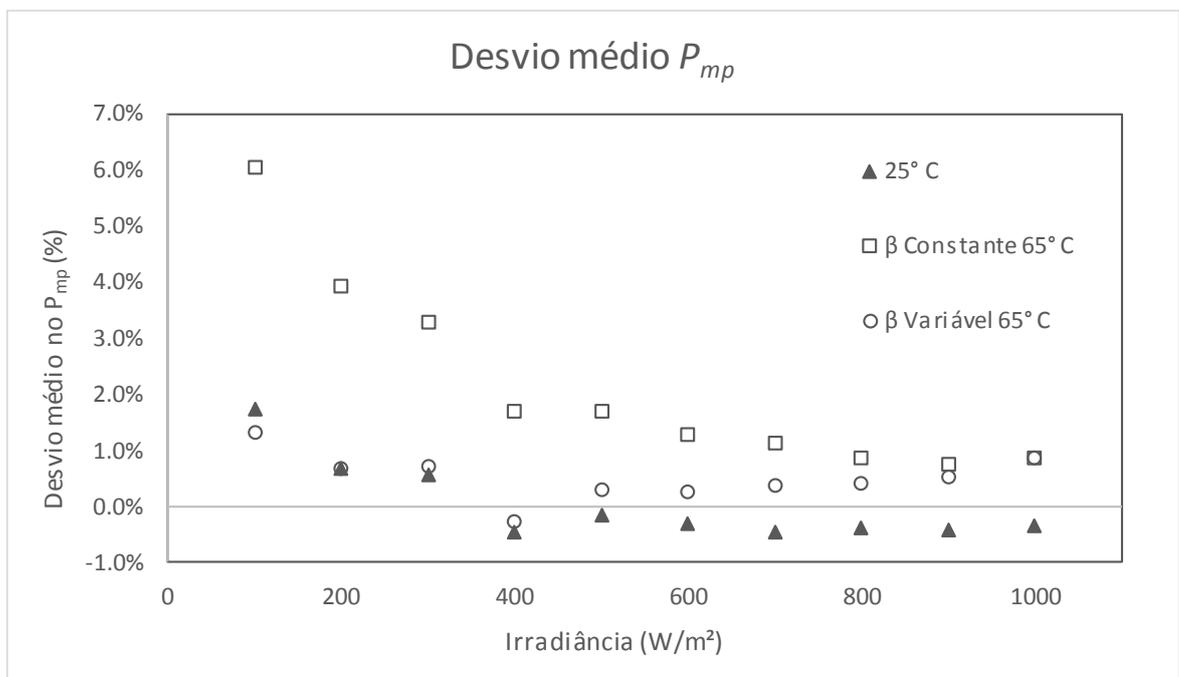
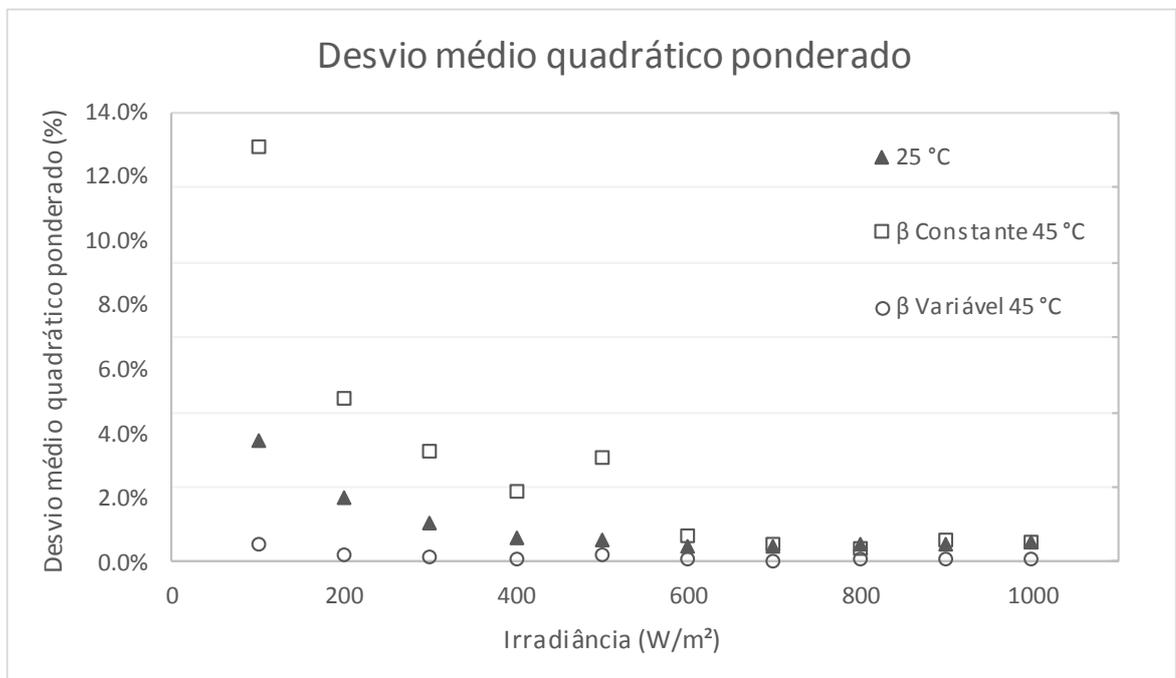


Figura 5.11 - Desvio médio no  $P_{mp}$  a 65 °C com diferentes modelos de  $\beta$

Tabela 5.7 - Desvio médio quadrático ponderado da corrente com diferentes modelos de  $\beta$ 

Irradiância	25° C		45° C		65° C	
	$\beta$ Constante/ $\beta$ Variável	$\beta$ Constante	$\beta$ Constante	$\beta$ Variável	$\beta$ Constante	$\beta$ Variável
1000	0.93%	0.62%	0.62%	0.62%	0.64%	0.64%
900	0.91%	0.68%	0.68%	0.84%	0.55%	0.58%
800	0.83%	0.42%	0.42%	0.57%	0.90%	0.58%
700	0.76%	0.58%	0.58%	0.45%	1.37%	0.49%
600	0.86%	0.84%	0.84%	0.54%	2.01%	0.50%
500	1.01%	3.28%	3.28%	2.14%	2.90%	0.69%
400	1.14%	2.17%	2.17%	0.94%	3.78%	0.71%
300	1.48%	3.46%	3.46%	1.41%	6.24%	1.19%
200	2.29%	5.12%	5.12%	1.72%	11.30%	1.99%
100	4.24%	12.95%	12.95%	4.65%	16.04%	3.76%

De forma gráfica, a Figura 5.12 e a Figura 5.13 apresentam, respectivamente, os resultados dos desvios médios quadráticos ponderados pela corrente para ambos os modelos a 45 °C e 65 °C, presentes na Tabela 5.7, utilizando os desvios a 25 °C como referência. Novamente, nota-se que o modelo com  $\beta$  variável apresenta desvios inferiores mesmo ao caso modelado na temperatura de referência.

Figura 5.12 - Desvio médio quadrático da corrente a 45 °C com diferentes modelos de  $\beta$

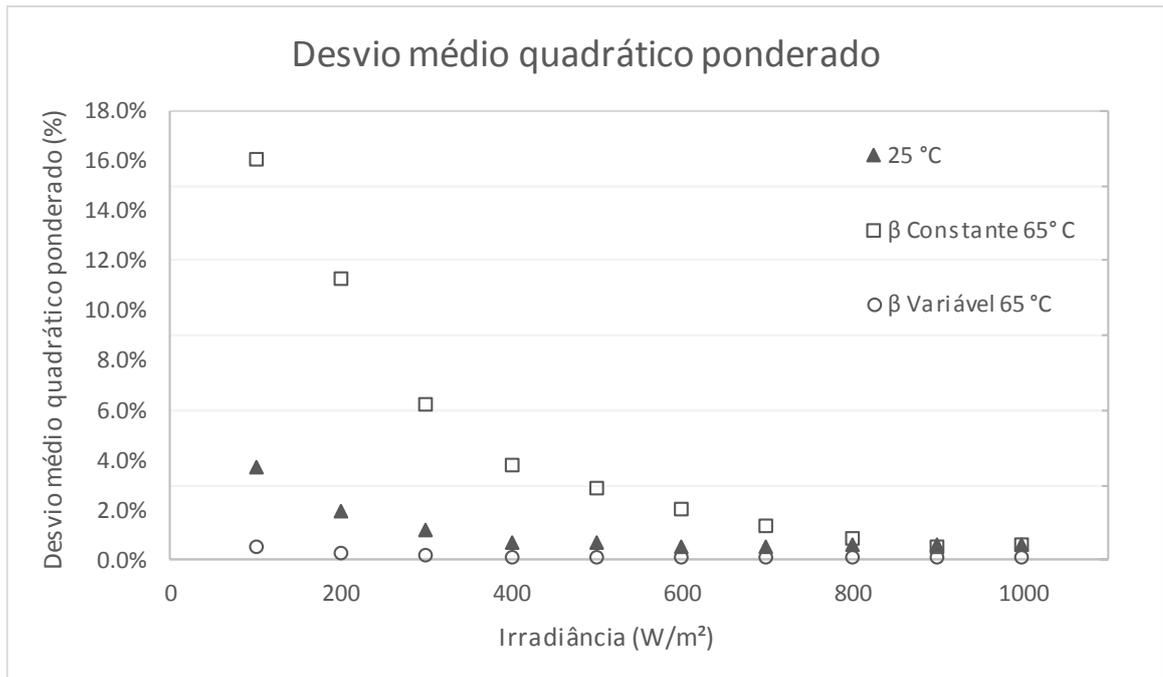


Figura 5.13 - Desvio médio quadrático da corrente a 65 °C com diferentes modelos de  $\beta$

Assim, embora seja uma variação relativamente pequena, a consideração da mudança do coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto  $\beta$  leva a uma melhoria significativa no modelo, sendo recomendada sua adoção para a correção das curvas a baixas irradiâncias e altas temperaturas. Dessa maneira, o modelo completo fica conforme descrito na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Resumo do comportamento dos parâmetros do modelo proposto

Variável	$I_{fg}$	$n$	$I_0$	$R_p$	$R_s$	$\beta$
Irradiância	Proporcional	Cte.	Recalculado Eq. 2.8	Inverso	Eq. 4.2	Eq. 4.3
Temperatura	Varição com $\alpha$	Cte.	Recalculado Eq. 2.8	Cte.	Cte.	Cte.

#### 5.4. Avaliação do modelo em medidas externas

Demonstrou-se até aqui o comportamento dos parâmetros com a temperatura e a irradiância em medidas realizadas no simulador solar. A partir dessa observação, foi construído um modelo de um diodo que objetiva uma melhor representação do comportamento de módulos fotovoltaicos em operação. A fim de avaliar a adequação do modelo em medidas externas, foi tomado um módulo policristalino como base, para o qual tentou-se reproduzir diferentes condições ambientais, conforme detalhado na seção 3.3.

Alguns dos modelos discutidos nas seções anteriores são testados, para compreender os efeitos individuais das alterações propostas. Como há variações de temperatura, não é possível utilizar modelos que considerem  $I_0$  constante, sendo este parâmetro sempre recalculado conforme descrito na seção 5.2.3. Assim, o modelo Parâmetros Constantes, utilizado quando do estudo das variações com a irradiância, à temperatura constante, foi modificado, a fim de incluir essa conclusão. Tal modelagem é similar à utilizada nos modelos de Krenzinger e Villalva et al.

São testadas quatro alternativas: (i) Parâmetros Constantes, que considera todos os parâmetros constantes com a temperatura e a irradiância, à exceção da corrente de saturação reversa; (ii) Resistências Variáveis, que inclui as variações das resistências série e paralela com a irradiância; (iii)  $\beta$  Variável, que considera a variação do coeficiente  $\beta$  com a irradiância, mas sem considerar a variação das resistências parasíticas; e (iv) Modelo Completo, que combina os dois anteriores.

Foram realizadas medidas em condições de irradiância próximas a  $1000 \text{ W/m}^2$ , e, com a utilização de filtros de 70% e 50%, fornecendo dados em níveis de irradiância próximos a  $700 \text{ W/m}^2$  e  $500 \text{ W/m}^2$ . Adicionalmente, foi realizada uma medição no simulador solar, da qual se obteve os parâmetros para posterior uso nos modelos, com o método analítico de Phang et al.

No decorrer do estudo, foram realizadas também medidas a irradiâncias mais baixas, em diferentes horários. Contudo, foram verificadas distorções nas curvas I-V que decorreram provavelmente da não-uniformidade da irradiância no módulo medido devido ao albedo do solo e a reflexões do entorno. Como os ajustes propostos são refinamentos no modelo, de magnitude relativamente baixas, pequenas interferências impossibilitam uma comparação adequada. Assim, essas medidas foram descartadas, e foram utilizadas apenas as obtidas com os filtros, que possuem ângulo de incidência mais baixo, e similar entre si, minimizando os efeitos citados.

As condições ambientais das sete medições, com os respectivos desvios médios quadráticos ponderados de curva I-V para cada modelo, são apresentadas na Tabela 5.9, enquanto a Figura 5.14 resume essas informações de forma gráfica. No caso das medidas externas, como foram realizadas duas medições para cada condição, há a indicação de cada medida por um número (1) ou (2) entre parênteses. Percebe-se que o modelo com parâmetros constantes possui tendência de aumento dos desvios em irradiâncias mais baixas, enquanto o modelo completo tende a apresentar melhor desempenho nessas situações. Os dois modelos intermediários apresentam ambos resultados melhores do que o modelo original com

parâmetros constantes, indicando que tanto as mudanças nas resistências parasíticas quanto a variação do coeficiente  $\beta$  auxiliam na melhoria da curva I-V.

Tabela 5.9 – Desvio médio quadrático ponderado de corrente para cada modelo e condição testados

Medida	Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Parâmetros Constantes	Resistências Variáveis	$\beta$ Variável	Modelo Completo
Simulador	1003.0	24.4	0.33%	0.33%	0.33%	0.33%
Sem Filtro (1)	1055.3	50.5	2.63%	2.78%	2.71%	2.86%
Sem Filtro (2)	1019.7	53.6	1.89%	1.93%	1.91%	1.95%
Filtro 70% (1)	728.9	49.1	2.80%	2.10%	2.25%	1.58%
Filtro 70% (2)	687.5	55.8	1.81%	0.96%	1.02%	0.43%
Filtro 50% (1)	514.2	52.2	2.98%	2.18%	1.63%	1.02%
Filtro 50% (2)	504.2	54.9	3.49%	2.53%	2.18%	1.74%

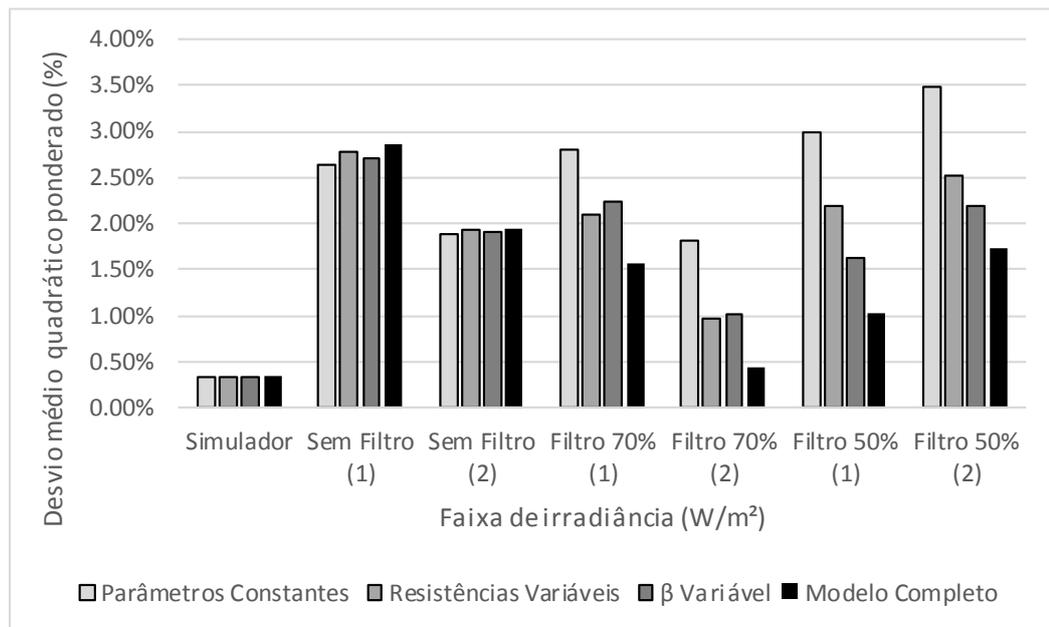


Figura 5.14 – Desvio médio quadrático ponderado para cada modelo nas medidas realizadas

Com relação ao desvio no ponto de máxima potência, este é apresentado para cada condição medida e modelo na Tabela 5.10, com o gráfico correspondente na Figura 5.15.

De maneira semelhante aos desvios médios ponderados da curva, as proposições de modelo também reduziram os desvios no ponto de máxima potência nas irradiâncias menores que a de referência. Nota-se que todos os modelos apresentaram comportamento semelhante, de superestimar a potência máxima do módulo, e que essa tendência foi reduzida com o modelo proposto.

Tabela 5.10 – Desvio no ponto de máxima potência para cada modelo e condições testados

Medida	Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Parâmetros Constantes	Resistências Variáveis	$\beta$ Variável	Modelo Completo
Simulador	1003.0	24.4	0.35%	0.35%	0.35%	0.36%
Sem Filtro (1)	1055.3	50.5	2.01%	2.22%	2.08%	2.29%
Sem Filtro (2)	1019.7	53.6	1.31%	1.39%	1.34%	1.42%
Filtro 70% (1)	728.9	49.1	3.65%	2.78%	3.27%	2.40%
Filtro 70% (2)	687.5	55.8	2.39%	1.39%	1.80%	0.79%
Filtro 50% (1)	514.2	52.2	3.19%	2.11%	2.30%	1.21%
Filtro 50% (2)	504.2	54.9	4.18%	2.87%	3.14%	1.83%

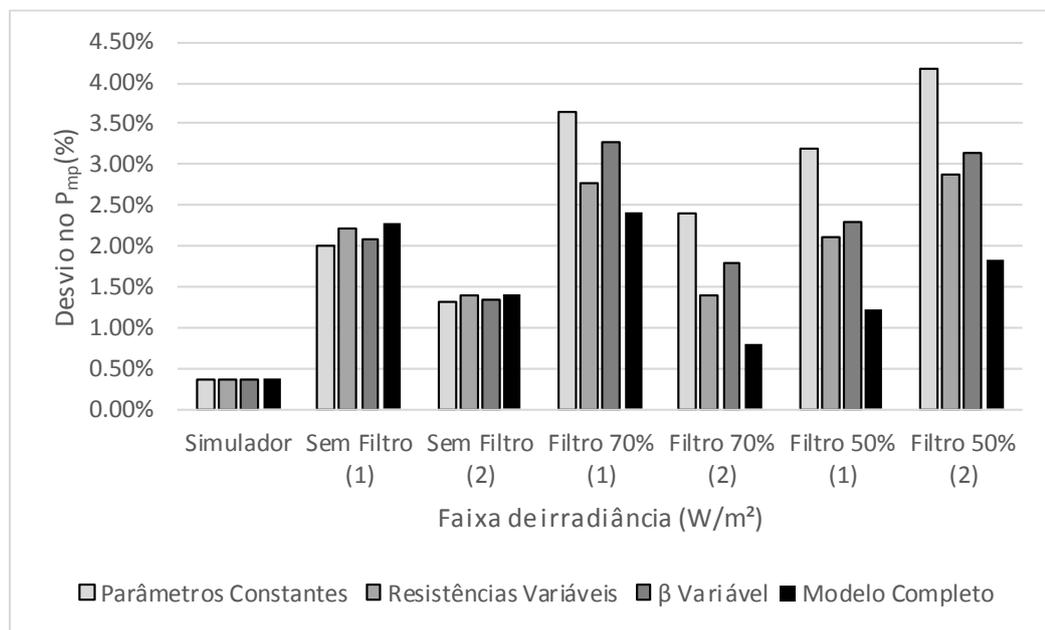


Figura 5.15 - Desvio no ponto de máxima potência para cada modelo nas medidas realizadas

As medidas obtidas sem filtro apresentaram irradiâncias um pouco superiores à de referência de 1000 W/m<sup>2</sup>, e, como as alterações propostas são todas dependentes da irradiância, os quatro modelos testados têm desempenhos bastante próximos. Ainda, é importante ressaltar que as condições de irradiância acima da de referência não foram estudadas na etapa de concepção do modelo, e, assim, não se pode afirmar que este seja superior ao de parâmetros constantes nessa faixa.

Portanto, a inclusão desses pontos serve como referência para as demais medições externas, a fim de avaliar se os desvios dos modelos crescem ou são reduzidos em irradiâncias mais baixas. Percebe-se que, apesar da irradiância ser similar à da medida no simulador, os desvios são bastante superiores. Além da variação de temperatura em relação à de referência, outros fatores podem influenciar: a incerteza da própria temperatura, menos controlada que no

simulador (ver seção 3.3), as diferenças de espectro, ângulo de incidência não-nulo e possíveis reflexões do entorno nas medidas externas.

A análise dos resultados terá foco nas medidas com irradiância reduzida, a fim de compreender os ajustes da curva simulada decorrentes das mudanças do modelo proposto. Sendo as diferenças sutis para serem visualizadas graficamente, serão apresentadas apenas as curvas I-V medidas, e dos modelos Parâmetros Constantes e Modelo Completo. A Figura 5.16 apresenta essas três curvas para a primeira medição com o filtro 70%, que apresentou de 728,9 W/m<sup>2</sup> de irradiância e 49,1 °C de temperatura.

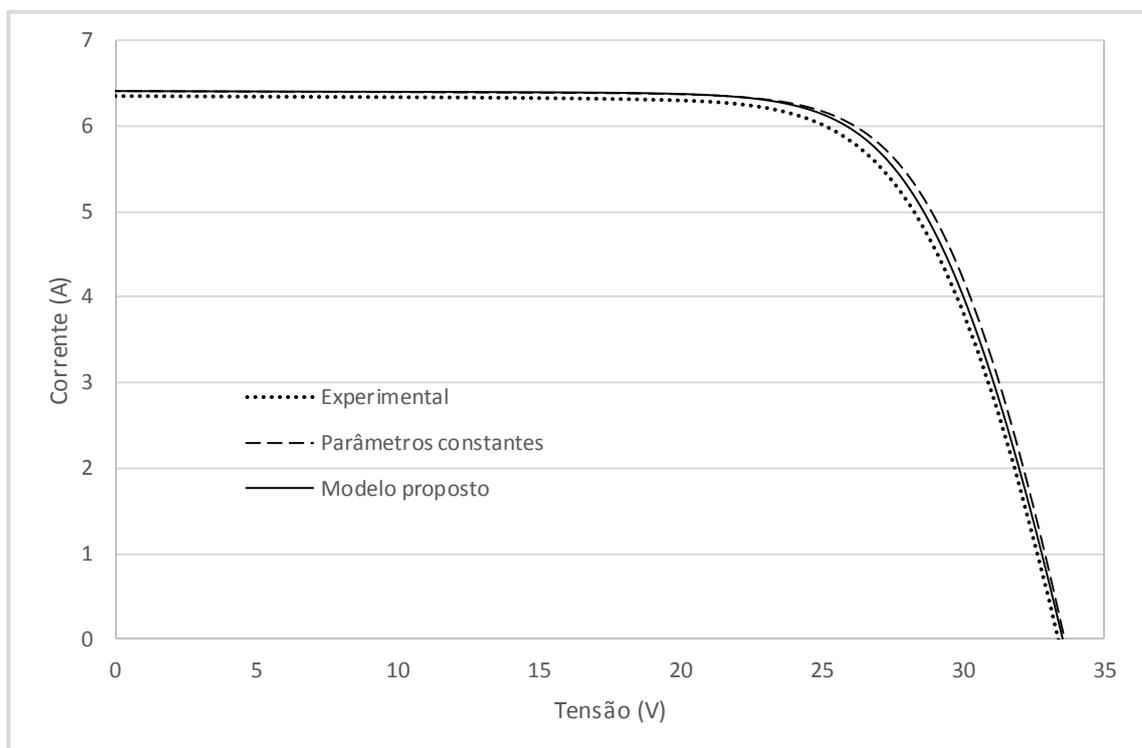


Figura 5.16 – Curvas medida e simuladas na medição Filtro 70% (1)

Apesar da diferença ser pequena em termos visuais, percebe-se que a curva do modelo proposto se aproxima mais da experimental. O aumento da resistência série faz com que o joelho de curva se desloque um pouco para baixo e para a esquerda, conforme discutido na seção 2.3.5, e a alteração no  $\beta$  causa uma redução na tensão de circuito aberto, ambos fatores que levam a curva para mais próximo da experimental.

A segunda curva medida com o filtro de 70% apresentou irradiância de 687,5 W/m<sup>2</sup>, e a temperatura medida do módulo foi de 55,8 °C. Nesse caso, a curva obtida com o Modelo Proposto ficou bastante próxima à experimental, enquanto a curva obtida com o modelo

Parâmetros Constantes superestimou a corrente em parte da curva, incluindo o ponto de máxima potência, conforme mostrado na Figura 5.17.

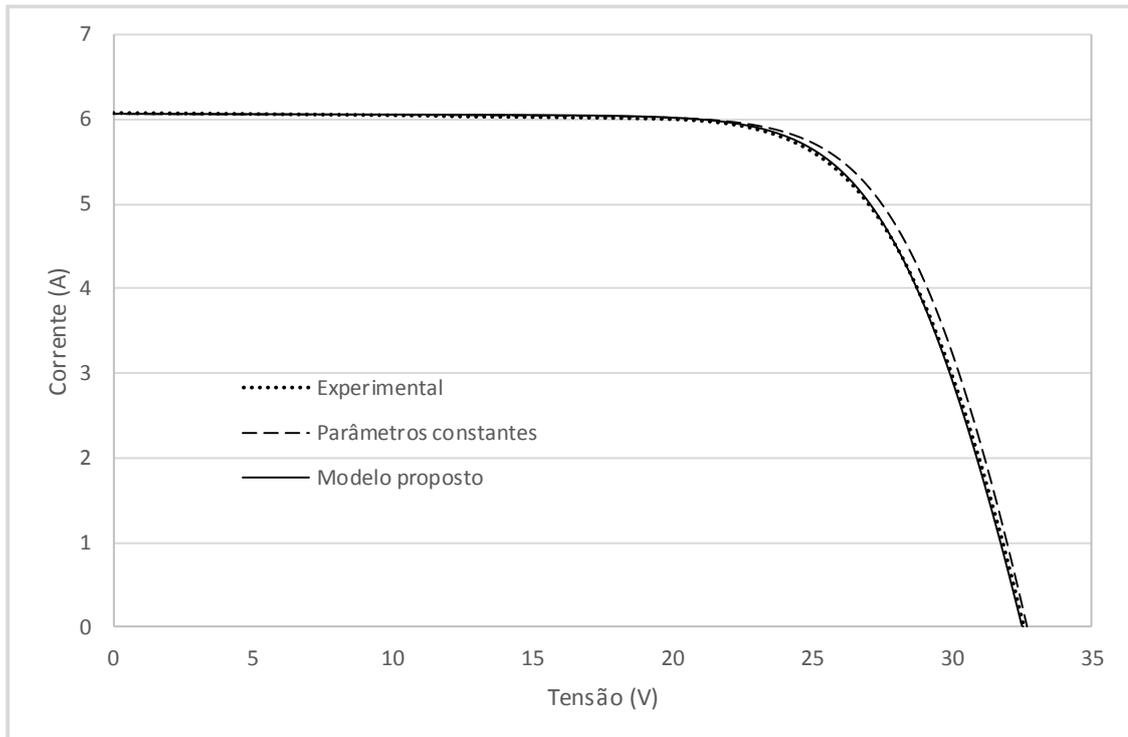


Figura 5.17 - Curvas medida e simuladas na medição Filtro 70% (2)

Nas medidas com o filtro de 50%, as diferenças também foram visíveis, e em sentido similar. Enquanto o aumento da resistência série ajusta o formato da curva, melhorando a precisão do ponto de máxima potência, a variação do coeficiente  $\beta$  reduz a tensão de circuito aberto, aumentando a conformidade com a curva experimental. Os resultados para as duas medidas com irradiância mais baixa, nas condições de 514,2 W/m<sup>2</sup> e 504,2 W/m<sup>2</sup> de irradiância e 52,2 °C e 54,9 °C de temperatura, respectivamente, são mostrados na Figura 5.18 e na Figura 5.19.

Na última medida, houve uma diferença de cerca de 1,5% no valor da corrente fotogerada calculada pelos modelos em relação à experimental. Tais diferenças podem estar associadas às incertezas das medidas, à possível diferença de comportamento entre o módulo medido e a célula de referência, além dos outros fatores já discutidos anteriormente. Ainda assim, a curva I-V construída com o Modelo Completo apresentou boa concordância nas faixas de tensão mais elevadas, incluindo o ponto de máxima potência.

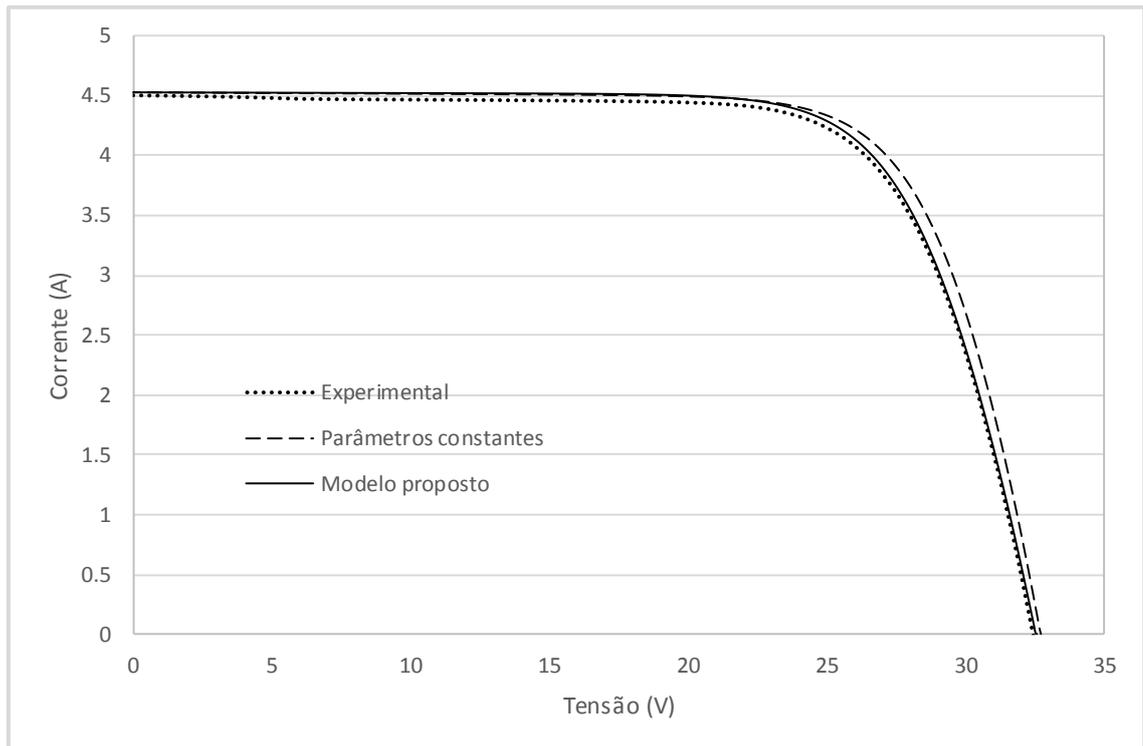


Figura 5.18 - Curvas medida e simuladas na medição Filtro 50% (1)

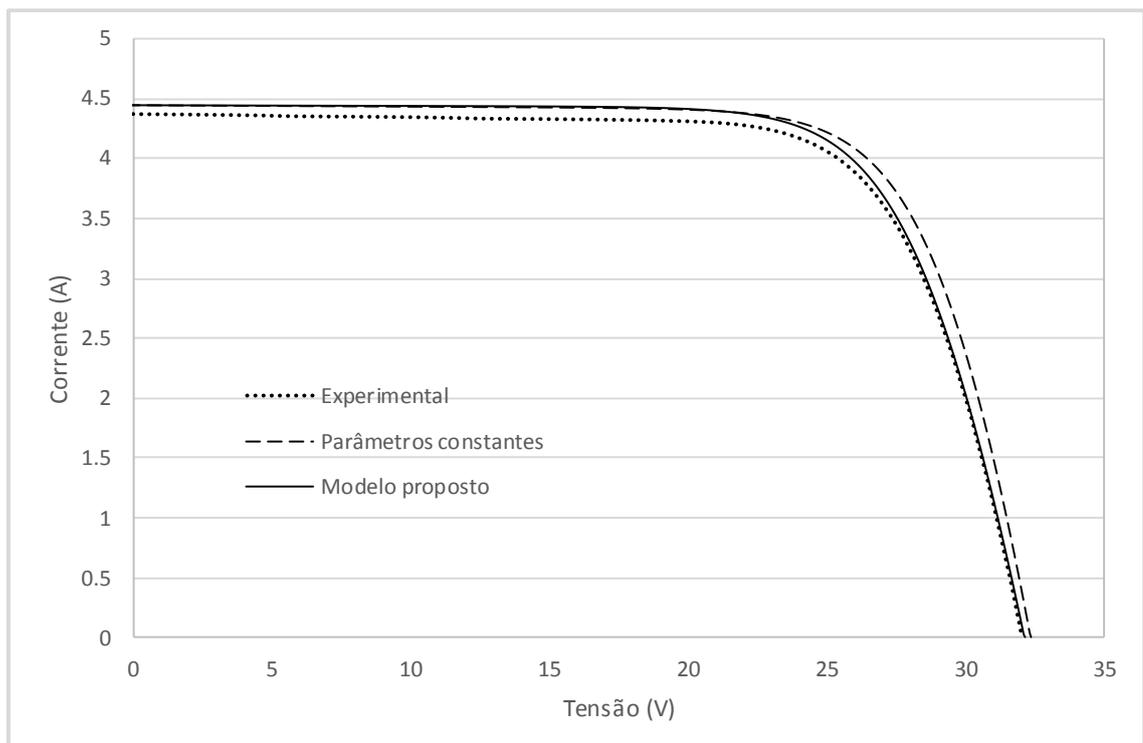


Figura 5.19 - Curvas medida e simuladas na medição Filtro 50% (2)

Embora os ganhos sejam relativamente pequenos, e a faixa de condições operativas testada não tenha sido tão ampla como nas medidas no simulador, os resultados indicam que as

alterações propostas ao longo do trabalho, de se considerar variação nas resistências parasíticas e no coeficiente  $\beta$  com a irradiância parecem ter validade também para as medições externas, em condições de operação reais. Um estudo mais abrangente, cobrindo mais condições de operação, em termos de irradiância, temperatura e ângulo de incidência, é necessário para confirmar essa conclusão. Contudo, avalia-se que dada à similaridade dos resultados das medidas externas com relação àqueles do estudo dos dados do simulador, a tendência é de que o modelo proposto se mostre adequados também a irradiâncias inferiores às testadas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de um diodo, e algumas de suas implementações, foram discutidos nesse trabalho. A avaliação da influência de cada parâmetro na construção da curva I-V foi realizada, ajudando na compreensão do modelo, e foi visto que diferentes ajustes no conjunto dos parâmetros podem ter efeitos similares.

A revisão da literatura demonstrou que há divergência entre os modelos na questão do comportamento de alguns dos parâmetros com a variação da irradiância e da temperatura. Embora para os parâmetros  $I_{fg}$  e  $n$  exista praticamente uma unanimidade no tratamento (variações conhecidas para a corrente fotogerada, e constância do fator de idealidade), para os três parâmetros restantes há propostas por vezes divergentes. Estudos experimentais de extração dos parâmetros a diferentes condições são ainda mais conflitantes. Para a resistência série, por exemplo, há propostas em todos os sentidos: aumento, redução ou constância, tanto com irradiância quanto com a temperatura.

Foram realizados três conjuntos de estudos experimentais com o intuito de estudar o modelo de um diodo: o primeiro à temperatura de 25 °C a 20 níveis de irradiância, o segundo em 5 temperaturas (25 °C a 65 °C) e 11 irradiâncias, ambos em um simulador solar, e o terceiro realizado ao Sol natural, com dois filtros de irradiância. A partir dos dados dos dois primeiros experimentos, avaliou-se o comportamento de cada parâmetro com a temperatura e a irradiância e propôs-se alterações sucessivas no modelo de um diodo tradicional, analisando-se os desvios em relação aos dados medidas em cada uma.

O primeiro experimento demonstrou que as resistências parasíticas, ao serem extraídas com o método proposto por Phang et al., 1984, tem seu valor incrementado a baixas irradiâncias. A corrente fotogerada, conforme conhecido da literatura, apresenta comportamento perfeitamente linear, e os dois parâmetros do diodo,  $n$  e  $I_0$  não possuem nenhuma tendência.

Nesse ponto, foi realizado um estudo da influência do método de extração na obtenção dos parâmetros do modelo de um diodo. Com o segundo método utilizado, proposto em Krenzinger, 1994, embora as resistências tenham seguido no geral e mesma tendência que com o método de Phang et al., em alguns casos houve descontinuidades nesse comportamento, com mudanças por vezes de ordem de grandeza dos parâmetros. Mesmo com tais mudanças, percebeu-se os parâmetros encontrados representavam a curva medida com precisão adequada. Esse comportamento decorre do fato de haver diferentes conjuntos dos parâmetros ( $n$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ) que fornecem a mesma curva, consideradas margens de tolerância de desvios, dado que na prática

cada parâmetro realiza um ajuste na curva, e estes podem ser combinados de diferentes maneiras.

Assim, um importante ponto levantado nos estudos realizados nesse trabalho é a versatilidade do modelo de um diodo. Verificou-se que o fato de haver divergência entre diversos estudos experimentais na literatura quanto a comportamentos dos parâmetros deve-se à interdependência destes, com diferentes conjuntos fornecendo resultados bastantes similares. Modelos de otimização, por exemplo, podem chegar a diferentes conjuntos de dados em cada uma das medidas, ou talvez inclusive na mesma medida, a depender das condições iniciais utilizadas.

Dessa maneira, pode não haver um modelo de um diodo definitivo, mas sim diferentes formulações possíveis que permitam representar com adequada precisão o comportamento de módulos fotovoltaicos. Ciente dessa conclusão, buscou-se a partir encontrar uma formulação que seja mais adequada para a representação do comportamento de módulos fotovoltaicos em diferentes condições de operação do que as utilizadas tradicionalmente, tentando ao mesmo tempo manter sua simplicidade.

A partir dos ajustes de curvas dos parâmetros extraídos das medições a diferentes irradiâncias, foram propostas equações para os comportamentos das resistências parasíticas. Um critério para as equações propostas foi de manter o valor de referência, que levou a uma mudança na formulação da resistência série, enquanto para a resistência paralela decidiu-se por adotar a formulação proposta por De Soto et al., 2006, que vem sendo utilizada também por outros autores. Avaliou-se que há ganho ao se considerar as variações nas resistências, e ao se recalculer o  $I_0$  para cada condição de  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ , principalmente para as condições de irradiância mais baixa.

Destaca-se que, a depender da localidade considerada, a ocorrência dessas condições pode ser elevada em determinados períodos. Em uma análise da frequência acumulada das medições por nível de irradiância para o mês de junho de 2018 no município de Porto Alegre obteve-se que 60% das medidas foram inferiores a  $200 \text{ W/m}^2$ , faixa que mais se beneficia das alterações propostas. Importante ressaltar que essa fração foi obtida das medições a uma inclinação de 30 graus Norte, considerada representativa para sistemas instaladas nesse município, sendo igual à sua latitude.

Com relação às variações de temperatura, o segundo experimento demonstrou que não há tendência nos comportamentos do fator de idealidade do diodo, nem das duas resistências parasíticas, enquanto a corrente fotogerada varia conforme o coeficiente  $\alpha$  dado pelos

fabricantes em seus catálogos. A corrente de saturação reversa  $I_0$  sofre grande aumento com a temperatura. Dos dois modelos testados, o recálculo desse parâmetro com a mesma equação considerada no modelo da irradiância foi superior ao uso de um comportamento exponencial específico.

Ainda, verificou-se que o comportamento de  $V_{oc}$  com a temperatura não segue o coeficiente  $\beta$  de maneira constante para todas as faixas de irradiância, sendo o comportamento experimental mais condizente com um  $\beta$  crescente, em módulo, a baixas irradiâncias. Demonstrou-se que, ao considerar essa alteração os resultados a temperaturas elevadas e irradiâncias baixas são significativamente aprimorados. Tais condições possuem ocorrências relativamente curtas durante a operação de sistemas fotovoltaicos, já que a temperatura de operação dos módulos em regime permanente é proporcional à irradiância. Assim, essas são verificadas em situações transientes, por exemplo, na ocorrência de uma cobertura de nuvens quando a temperatura de operação do módulo já está elevada.

O modelo proposto, portanto, considera as variações dos parâmetros segundo a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resumo do comportamento dos parâmetros do modelo proposto

Variável	$I_{fg}$	$n$	$I_0$	$R_p$	$R_s$	$\beta$
Irradiância	Proporcional	Cte.	Recalculado Eq. 2.8	Inverso	Eq. 4.2	Eq. 4.3
Temperatura	Varição com $\alpha$	Cte.	Recalculado Eq. 2.8	Cte.	Cte.	Cte.

O terceiro experimento, com o uso de medições externas, indicou que os resultados obtidos no simulador são válidos também na operação a Sol real. Embora a faixa de irradiâncias testadas tenha sido menor do que no simulador, a tendência foi de o modelo proposto trazer cada vez mais benefícios em relação a um modelo de parâmetros constantes com menores valores de irradiância, sendo esse resultado consistente com as medições em simulador.

Assim, a partir de um conjunto extensivo de medições a diferentes níveis de temperatura e irradiância, foi possível a proposição de aprimoramentos no modelo de um diodo que melhoram o seu desempenho a baixas irradiâncias, situação na qual o modelo tradicional possui desempenho inferior. Tais aprimoramentos são de simples implementação, tratando-se de equações explícitas para alguns dos parâmetros, dependendo da irradiância, além do recálculo de  $I_0$  com as variações das condições ambientes. Além da proposta de modelo modificado, outra contribuição desse trabalho foi a demonstração de que o modelo de um diodo de cinco

parâmetros possui múltiplas soluções, explicando a existência de conclusões distintas na literatura quanto ao comportamento dos parâmetros em diferentes condições de operação.

### **6.1. Sugestões para trabalhos futuros**

- Avaliar o desempenho do modelo proposto em outras operativas em medidas externas;
- Avaliação da distribuição da irradiância no território nacional, a fim de identificar as frações de energia anual em cada nível de irradiância;
- Realizar estudo semelhante para proposição de modelos para outras tecnologias de módulos fotovoltaicos.
- Propor, a partir dos dados medidos, uma abordagem baseada no modelo de dois diodos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acharya, Y.B. Effect of temperature dependence of band gap and device constant on I-V characteristics of junction diode. **Solid State Electronics**, vol. 45 p. 1115-1119, 2001.

ANEEL. **Banco de Informações da Geração**. <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>, 2019a, acesso em 27/04/2019.

ANEEL. **Unidades Consumidoras com Geração Distribuída**. [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp), 2019b, acesso em 27/04/2019.

ASTM. **ASTM E1036M - Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells**. 1996.

Bashahu, M., Nkundabakura, P., Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors, **Solar Energy**, vol. 81, p. 856-863, 2007.

Bätzner, D.L., Romeo, A., Zogg, H., Tiwari, A.N. CdTe/CdS solar cell performance under low irradiance. **Proceedings of the 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, paper VB1.40. Munique, Alemanha, 2001.

Bensalem, S., Chegaar, M.. Thermal behavior of parasitic resistances of polycrystalline silicon solar cells. **Revue des Energies Renouvelables**, vol. 16, p. 171-176, 2013.

Biswas, P.P, Suganthan, P.N., Wu, G., Amaratunga, G.H.J., Parameter estimation of solar cells using datasheet information with the application of an adaptative differential evolution algorithm. **Renewable Energy**, vol. 132, p. 425-438, 2019.

Boyd, M. T., Klein, A. S., Reindl, D.T., Dougherty, B.P. Evaluation and Validation of Equivalent Circuit Photovoltaic Solar Cell Performance Models. **Journal of Solar Energy Engineering**, vol. 133, 2011.

Breitenstein, O., Rakotoniaina, J.P., Al Rifai, M.H., Werner, M. Shunt type crystalline silicon solar cells. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, vol. 12, p. 529-538, 2004.

Breitenstein, O., Bauer, J., Rakotoniaina, J.O. Material-Induced Shunts in Multicrystalline Silicon Solar Cells. **Semiconductors**, vol. 41(4), p. 440-443, 2007.

Bühler, A.J.. **Estudo de Técnicas de Determinação Experimental e Pós-Processamento de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

Bühler, A.J., Gasparin, F.P., Krenzinger, A. Post-processing data of measured I-V curves of photovoltaic devices. **Renewable Energy**, vol. 68, p. 602-610, 2014.

Celik, A.N., Acikgoz, N. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. **Applied Energy**, vol. 84, p. 1-15, 2007.

Chan, D.S.H., Phillips, J.R. Phang, J.C.H. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters. **Solid-State Electronics**, vol. 29, p. 329-337, 1986.

Cheegar, M., Hamzaoui, A., Namoda, A., Petit, P., Aillerie, M., Herguth, A., 2013. Effect of illumination intensity on solar cells parameters. **Energy Procedia**, vol. 36, p. 722-729, 2013.

Chenni, R., Makhlouf, M., Kerbache, T., Bouzid, A. A detailed modeling method for photovoltaic cells. **Energy**, vol. 32, p. 1724-1730, 2007.

Chin, V.J., Salam, Z., Ishaque, K. Cell modeling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. **Applied Energy**, vol. 154 p. 500-519, 2015.

Cuce E., Cuce, P.M., Bali, T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. **Applied Energy**, vol. 111, p. 374-382, 2013.

De Soto, W. **Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Wisconsin-Madison, 2004.

De Soto, W., Klein, S.A., Beckman, W.A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. **Solar Energy**, vol. 80, p. 78-88, 2006.

Dongue, S.B., Njomo D., Tamba, J.G., Ebengai, L. Modeling of electrical response of illuminated crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, vol. 2, p. 612-619, 2012.

Dongue, B.S., Njomo, D., Ebengai, L. An Improved Nonlinear Five-Point Model for Photovoltaic Modules, **International Journal of Photoenergy**, vol. 2013, 11p., 2013.

Eikelboom, J.A., Reinders, A.H.M.E. Determination of the irradiation dependent efficiency of multicrystalline Si PV modules on basis of IV curve fitting and its influence on the annual performance. **Proceedings of the 14<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference**, Barcelona, Spain p. 293-296, 1997.

Ennes, L.S., **Análise da Distribuição de Frequência da Radiação Global Diária de 34 Cidades no Estado do Rio Grande do Sul**. Monografia de Conclusão de Curso. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2018.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Rio de Janeiro, 2018.

Fraunhofer ISE. **Recent Facts about Photovoltaics in Germany**. [www.pv-fakten.de](http://www.pv-fakten.de), versão de 14/06/2018. Acesso em 27/06/2018.

Gasparin, F.P. **Análise de Efeitos Transientes na Caracterização Elétrica de Módulos Fotovoltaicos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

Ghani, F., Rosengarten, G., Duke, M., Carson, J.K.. On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters. **Solar Energy**, vol. 112, p. 437-445, 2015.

Greentech Media. **Saudi Solar Bid Makes Solar Cheapest Electricity in the World, but There's a Catch**. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/saudi-solar-bid-makes-solar-cheapest-electricity-in-world#gs.YyASn2U>, 2017, acesso em 27/06/2018.

IEC. **IEC 60904-9:2007 Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements**. 2007.

IEC. **IEC 60891:2009 Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics**. 2009.

Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H. 2011. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 95, p. 586-594, 2011.

Karatepe, E., Boztepe, M., Colak, M. Neural network based solar cell model. **Energy Conversion and Management**, vol. 47, p. 1159-1178, 2006.

Krenzinger, A. Modelos Matemáticos para la Simulación de Sistemas Fotovoltaicos por Ordenador. **Energías para América Latina**, vol. 1, p. 27-35, 1994.

Kurobe, K., Matsunami, H. New Two-Diode Model for Detailed Analysis of Multicrystalline Silicon Solar Cells. **Japanese Journal of Applied Physics**, vol. 144, 2005.

La Parra, I., Munoz, M., Lorenzo, E., García, M., Marcos, J., Martínez-Moreno, F.. PV performance modelling: A review in the light of quality assurance for large PV plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 78, p. 780-797, 2017.

Lo Brano, V., Orioli, A., Ciulla, G., Di Gangi, A. An improved five-parameter model for photovoltaic modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol 94, p. 1358-1370, 2010.

Ma, T., Yang, H., Lu., L. Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays. **Solar Energy**, vol. 100, p. 31-41, 2014.

McIntosh, K.R., Altermatt, P.P., Heiser, G. Depletion-region recombination in silicon solar cells: when does  $m_{DR} = 2$  ? **Proceedings of the 16th European photovoltaic Solar Energy Conference**, p. 251-254., 2000.

Mermoud, A., Lejeune, T., Performance Assessment of a Simulation Model for Pv Modules of any Available Technology. **25<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Valencia, Espanha, 2010.

Messenger, R.A., Ventre, J. 2004. **Photovoltaic Systems Engineering**. CRC Press LLC, Boca Raton, Estados Unidos da América, 2<sup>a</sup> Edição, 2004.

Nishioka, K., Sakitani, N., Uraoka, Y., Fuyuki, T. Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, vol. 91, p. 1222-1227, 2007.

ONS. **Boletim Mensal de Geração Solar Fotovoltaica**. [http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim\\_Solar\\_201901.pdf](http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim_Solar_201901.pdf), 2019, acesso em 05/03/2019.

Orioli, A., Di Gangi, A. A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data, **Applied Energy**, vol. 102, p. 1160-1177, 2013.

Phang, J.C.H., Chan, D.S.H, Phillips, J.R. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters. **Electronics Letters**, vol. 20, p. 406-408, 1984.

Polverini, D., Tzamalís, G., Müllejans, H. A validation study of photovoltaic module series resistance determination under various operating conditions according to IEC 60891. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, vol. 20, p. 650–660, 2012.

Priyanka, Mohan Lal, S.N. Singh. A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, vol. 91, p.137–142, 2007.

PVsyst SA. **User's Guide – Pvsyst Contextual Help**. Satigny, Suíça, 2012.

Reich, N.H., van Sark, W.G.J.H.M., Alsema, E.A., Lof, R.W., Schropp, R. E.I., Sinke, W.C., Turkenburg, W.C. Crystalline silicon cell performance at low light intensities. **Solar Energy**, vol. 93, p. 1471–1481, 2009.

RenewEconomy. **Stunning new low for solar PV as even IEA hails “age of solar”**. <https://reneweconomy.com.au/stunning-new-low-for-solar-pv-as-even-iea-hails-age-of-solar-43509/>, 2017a, acesso em 27/06/2018.

RenewEconomy. **Chile solar auction sets new record low for solar PV**. <https://reneweconomy.com.au/chile-solar-auction-sets-new-record-low-for-solar-pv-85114/>, 2017b, acesso em 27/06/2018.

Rhouma, M.H.B., Gastli, A., Brahim, L.B., Touati, F., Benammar, M. A simple method for extracting the parameters of the PV cell single-diode model. **Renewable Energy**, vol. 113, p. 885-894, 2017.

Ruschel, C.S. **Desenvolvimento de software para supervisão de usinas solares fotovoltaicas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Ruschel, C.S., Gasparin, F.P., Costa, E.R., Krenzinger, A. Assessment of PV modules shunt resistance dependence on solar irradiance. **Solar Energy**, vol. 133, p. 35–43, 2016.

Sandia National Laboratories. **Parameters Estimation for Single Diode Models of Photovoltaic Modules**. Sandia Report, Albuquerque, Estados Unidos da América, 2015.

Schroeder, D.K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. John Wiley & Sons Inc, Nova Iorque, Estados Unidos da América, Segunda Edição, 1998.

Shockley, W.. **Electrons and holes in semiconductors**. Van Nostrand, Nova Iorque, Estados Unidos da América, 1950.

Silva, E.A., Bradaschia, F., Cavalcanti, M.C., Nascimento, A.J., Michels, L., Pietta, L.P. 2017. An Eight-Parameter Adaptive Model for the Single Diode Equivalent Circuit Based on the Photovoltaic Module’s Physics. **IEEE Journal of Photovoltaics**, vol. 7, p. 1115-1123, 2017.

Sites J.R., Mauk, P.H. Diode Quality Factor Determination for Thin-Film Solar Cells. **Solar Cells**, vol. 27, p. 411-417, 1989.

SolarPower Europe. **Global Market Outlook for Solar Power / 2018 – 2022**. Bruxelas, Bélgica, 2018.

Soon, J. J., Low, K-S, Goh, S.T. Multi-dimension diode photovoltaic (PV) model for different PV cell technologies. **IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**, Istanbul, Turquia, 2014.

Townsend, T.U. **A Method for Estimating the Long Term Performance of Photovoltaic Modules**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Wisconsin-Madison, 1989.

Van Zeghbroeck, B. **Principles of Semiconductor Devices**, [http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/book/chapter2/ch2\\_3.htm](http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/book/chapter2/ch2_3.htm), 2004, acesso em 14/03/2018.

Villalva M.G., Gazoli, J.R., Filho E.R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 24 (5), p. 1198-1208, 2009.

Williams, S.R., Betts, T.R., Helf, T., Gottschalg, R., Beyer, H.G., Infield, D. G. Modeling Long-Term Module Performance Based on Realistic Reporting Conditions with Consideration to Spectral Effects. **3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Osaka, Japão, 2003.

Xiao, W., Dunford, W.G., Capel, A. A novel modeling method for photovoltaic cells. **Proceedings of IEEE 35<sup>th</sup> Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC)**, vol. 3, p. 1950-1956, 2004.