

LUZ ELENA PEÑARANDA CHENCHE

**AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE MODELAGEM E
PARAMETRIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS
FOTOVOLTAICOS MONO E MULTI JUNÇÃO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2015

LUZ ELENA PEÑARANDA CHENCHE

**AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE MODELAGEM E
PARAMETRIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS MONO E
MULTI JUNÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Transferência de calor e Mecânica dos fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA - MG

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P397a Peñaranda Chenche, Luz Elena, 1989-
2015 Avaliação dos métodos de modelagem e parametrização de
dispositivos fotovoltaicos mono e multi junção / Luz Elena Peñaranda
Chenche. - 2015.
139 f. : il.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Energia solar - Teses. 3.
Desenvolvimento energético - Teses. I. Bandarra Filho, Enio Pedone. II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

*Dedico este trabalho aos meus pais
por serem exemplo de amor e humildade
e às minhas mãs,
que Deus ilumine o seu caminho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por fazer tudo isto possível.

À minha família, pela motivação, apoio e amor incondicional que sempre estiveram dispostos a me mostrar, mesmo na distância.

À o meu melhor amigo, e companheiro de vida Abdul Cárdenas, por sua imensa compreensão, paciência e amor que tornaram minha vida um pouco mais feliz durante cada dia.

Ao professor e amigo Dr. Oscar Saul Hernandez Mendoza, pela confiança que sempre depositou em mim, assim como também por ser exemplo de esforço e dedicação na vida acadêmica.

Ao professor e orientador Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, pela orientação recebida no transcurso desta pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, LEST-nano, pela ajuda oferecida nos dias difíceis e pelas alegrias compartilhadas nos bons momentos.

Ao professor Arno Krenzinger e à toda sua equipe do LABSOL (UFRGS), especialmente à Fabiano Perin Gasparin, pela breve mas valiosa orientação.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

À CAPES, pelo apoio financeiro recebido durante o curso do mestrado.

A empresa Rio Verde Energia S.A pelo apoio financeiro recebido nesta pesquisa.

PEÑARANDA, L. E. C., **Avaliação dos métodos de modelagem e parametrização de dispositivos fotovoltaicos mono e multi junção**. 2015. 139f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

Resumo

Esta dissertação apresenta uma análise aplicada às principais metodologias encontradas na literatura que permitem determinar as propriedades físicas relativas aos fenômenos que ocorrem nos dispositivos fotovoltaicos (etapa de parametrização), assim como dos modelos matemáticos de maior importância utilizados no cálculo das características elétricas operacionais destes dispositivos (etapa de caracterização). Tais dispositivos referem-se às tecnologias mono e multi junção quando submetidos à variações de temperatura e radiação solar. Portanto, foram apresentados quatro métodos de parametrização, entre eles três analíticos e cinco modelos de caracterização elétrica, sendo dois especificamente para dispositivos multi junção. Assim, estabeleceram-se vários estudos de caso para os quais foram definidas diferentes situações que permitiram comparar o desempenho de cada um dos métodos avaliados. Em consequência, foram identificados os procedimentos que melhor se ajustaram a cada tipo de tecnologia fotovoltaica. Dessa forma, de acordo com os resultados obtidos na parametrização, a metodologia baseada na aplicação do algoritmo de Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) não linear, demonstrou maior exatidão para todos os estudos de caso e para todos os dispositivos fotovoltaicos. Já para a caracterização, foram determinadas as principais vantagens e desvantagens entre os modelos aplicados, destacando o modelo de Domínguez, et al. (2010), que apresentou maior robustez e ampla faixa de aplicação.

Palavras-chave: Energia solar, Parametrização, Caracterização, Células multi junção, Modulo fotovoltaico, Concentração.

PEÑARANDA, L. E. C., **Evaluation of methods for parameterization and modeling of mono and multi-junction photovoltaic devices**. 2015. 138f. M.Sc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

Abstract

This work deals with the analysis applied to the main methodologies found in literature for estimating the properties related to the physical phenomena in photovoltaic devices (parametrization), as well as the most important mathematical models used in the calculation of operating electrical characteristics of these devices (characterization). These devices are related to the mono and multi-junction technologies, when they are exposed to a condition where the temperature and solar radiation vary. Therefore, four parametrization methods were shown, including three analytical, and five models of electrical characterization, where two of them are specifically for multi-junction devices. Thus, several case studies were proposed which defined different situations for comparing the performance of the methods evaluated. In this way, the procedures that best fit to each type of photovoltaic technology were identified. Finally, according to the results obtained in the parameterization, the method based on the Generalized Reduced Gradient (GRG) nonlinear algorithm showed greater accuracy for all case studies and for all photovoltaic devices. As for the characterization, the main advantages and disadvantages of all models were determined, highlighting Domínguez, et al. (2010) model, due to the highest robustness and wide application range.

Keywords: Solar energy, Parameters determination, Characterization, Multi-junction solar cells, Photovoltaic module, Solar concentration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução global de capacidade de energia fotovoltaica instalada (2008-2013) ..	8
Figura 2.2 – Definição da constante solar	9
Figura 2.3 – Declinação da superfície terrestre.....	10
Figura 2.4 – Componentes da radiação solar	10
Figura 2.5 – Massa do ar atravessada pela radiação solar	11
Figura 2.6 – Espectro de radiação solar para diferentes massas de ar.....	12
Figura 2.7 – Condutividade intrínseca na estrutura cristalina do silício	13
Figura 2.8 – Dopagem da estrutura de silício.....	14
Figura 2.9 – Zona de depleção na junção PN e difusão de elétrons e lacunas	15
Figura 2.10 – Geração de energia elétrica devido ao efeito fotovoltaico	15
Figura 2.11 – Linha de tempo de eficiência das células fotovoltaicas	17
Figura 2.12 – Célula fotovoltaica de silício cristalino: a. Estrutura básica b. Célula comercial	18
Figura 2.13 – Processo de fabricação de células solares mono e policristalinas de silício... ..	19
Figura 2.14 – Células coloridas de c-Si.....	20
Figura 2.15 – Célula fotovoltaica de telureto de cádmio.....	21
Figura 2.16 – Células Fotovoltaicas de Cobre-Índio e Cobre-Índio-Gálio	22

Figura 2.17 – Célula fotovoltaica de silício amorfo hidrogenado	23
Figura 2.18 – Funcionamento de uma célula multi junção	24
Figura 2.19 – Configurações comerciais para células multi junção: a). Célula MJ b). Célula MJ com conexões e diodo de proteção c). Célula MJ com conexões, diodo de proteção e homogeneizador.	25
Figura 2.20 – Concentrador de espelho plano (baixa concentração)	26
Figura 2.21 – Concentração media: Espelho parabólico e espelho parabólico composto	27
Figura 2.22 – Concentração Alta: Lentes de Fresnel	27
Figura 2.23 – Esquema de conexões das células em um modulo fotovoltaico	28
Figura 2.24 – Curva caraterística de um módulo fotovoltaico	29
Figura 2.25 – Variação da curva caraterística de um modulo fotovoltaico em função da radiação incidente.....	31
Figura 2.26 – Variação da curva caraterística de um modulo fotovoltaico em função da temperatura da célula	32
Figura 2.27 – Curva característica I-V de um modulo fotovoltaico para diferentes ligações (serie-paralelo) de células solares.	33
Figura 3.1 – Circuito elétrico do modelo ideal de uma célula fotovoltaica.....	37
Figura 3.2 – Influência do fator de idealidade na curva característica I-V.....	38
Figura 3.3 - Condição de curto circuito para o modelo ideal de uma célula fotovoltaica.....	39
Figura 3.4 - Condição de circuito aberto para o modelo ideal de uma célula fotovoltaica.....	39
Figura 3.5 - Circuito elétrico do modelo de quatro parâmetros para uma célula fotovoltaica	40
Figura 3.6 - Influência da resistência em serie na curva característica I-V	41
Figura 3.7 - Circuito elétrico do modelo de quatro parâmetros para uma célula fotovoltaica	42
Figura 3.8 - Influência da resistência em paralelo na curva característica I-V	42

Figura 3.9 - Circuito elétrico do modelo de dois diodos para uma célula fotovoltaica	43
Figura 3.10 - Circuito elétrico do modelo de cinco parâmetros para uma célula fotovoltaica tripla junção	44
Figura 3.11 – Algoritmo para implementar o modelo de Fernandez para caracterização de células fotovoltaicas multi junção	52
Figura 3.12 – Curvas características do modulo fotovoltaico de c-Si Kyocera KC85T.....	54
Figura 3.13 – Variação dos parâmetros intrínsecos de uma célula tripla-junção para diferentes condições de temperatura e concentração	57
Figura 3.14 - Esquema do sistema fotovoltaico final	58
Figura 3.15 – Curva característica de um modulo fotovoltaico processada para 25°C fornecida pelo fabricante	60
Figura 3.16 – Exemplo de ajuste de curvas realizado no <i>cftool</i> de Matlab®.....	61
Figura 3.17 – Algoritmo para o cálculo de n e R_s na parametrização de Xiao, et al.....	64
Figura 3.18 – Exemplo de cálculo das propriedades de um dispositivo fotovoltaico utilizando o <i>solver</i> de Excel ®.....	65
Figura 3.19 – Configurações da ferramenta <i>solver</i> de Excel ®	66
Figura 3.20 – Parametrização aplicando o <i>solver</i> de Excel ®	67
Figura 3.21 – Regiões da curva característica sob influência de diferentes parâmetros	67
Figura 4.1 – Curvas características digitalizadas do modulo fotovoltaico de c-Si Kyocera KC85T	69
Figura 4.2 - Curvas características digitalizadas comparadas com as fornecidas pelo fabricante do modulo fotovoltaico de c-Si Kyocera KC85T.....	69
Figura 4.3 – Comparação entre as curvas I-V digitalizadas e as geradas pelo modelo ideal para várias temperaturas e radiação padrão.....	70

Figura 4.4 - Comparação entre as curvas I-V digitalizadas e as geradas pelo modelo ideal para vários níveis de radiação e temperatura padrão.	70
Figura 4.5 – Curva característica digitalizada e geradas a partir dos métodos de parametrização para a condição de temperatura e radiação padrão.....	72
Figura 4.6 – Média dos erros dos métodos de parametrização para diferentes condições de temperatura e radiação padrão.....	73
Figura 4.7 – Média dos erros dos métodos de parametrização para diferentes condições de radiação e temperatura padrão.....	73
Figura 4.8 – Variação do fator de idealidade do diodo sob mudanças de radiação e temperatura para cada método de parametrização.....	74
Figura 4.9 – Variação da resistência em série sob mudanças de radiação e temperatura para cada método de parametrização.....	74
Figura 4.10 – Variação da resistência em paralelo sob mudanças de radiação e temperatura para cada método de parametrização.....	75
Figura 4.11 - Curvas características geradas a partir dos parâmetros da literatura (SEGEV, et al., 2012), (OTA, et al., 2010).....	76
Figura 4.12 - Curvas características para cada junção da célula tripla junção na temperatura padrão	78
Figura 4.13 - Curvas características de cada junção da célula tripla junção geradas a partir dos métodos de parametrização a 25 °C e um sol.....	79
Figura 4.14 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula GaInP (T=25 °C, X=1).....	80
Figura 4.15 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula GaInAs (T=25 °C, X=1).....	81
Figura 4.16 - Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula Ge (T=25 °C, X=1).....	81
Figura 4.17 - Curva característica da célula tripla junção sob 25 °C e 1000W/m ²	82

Figura 4.18 – Erro relativo dos métodos de parametrização da célula tripla junção ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=1$) para o primeiro estudo de caso	83
Figura 4.19 - Curvas características para cada junção da célula tripla junção a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 350 sóis.	84
Figura 4.20 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula GaInP ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=350$).....	85
Figura 4.21 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula GaInAs ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=350$).....	86
Figura 4.22 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula Ge ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=350$).....	86
Figura 4.23 - Curva característica da célula tripla junção sob $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 350 sóis para o primeiro estudo de caso	87
Figura 4.24 – Erro relativo dos métodos de parametrização da célula tripla junção ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=350$).....	88
Figura 4.25 – Curva característica para uma célula tripla junção para diferentes modelos ..	89
Figura 4.26 – Dependência do ponto de máxima potência com o fator de idealidade do diodo para o modelo de Fernández (2012) no primeiro estudo de caso	89
Figura 4.27 – Comparação da curva característica da célula tripla junção geradas pelos modelos especializados para $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 350 sóis.....	91
Figura 4.28 – Curva caraterísticas da célula tripla junção para várias condições de temperatura e concentração (segundo estudo de caso).	94
Figura 4.29 – Curva caraterísticas da célula tripla junção para várias condições de temperatura.	95
Figura 4.30 – Resistência em paralelo de uma célula tripla junção sob mudanças de radiação e temperatura (método de parametrização do Solver)	96
Figura 4.31 – Fator de idealidade do diodo de uma célula tripla junção sob mudanças de radiação e temperatura.....	97

Figura 4.32 – Resistência em série de uma célula tripla junção sob mudanças de radiação e temperatura	98
Figura 4.33 – Curva caraterística I-V da célula tripla junção obtida do modelo de Domínguez.	100
Figura 4.34 – Curva caraterística I-V da célula tripla junção gerada a partir dos métodos de parametrização	101
Figura 4.35 – Curva caraterística I-V da célula tripla junção gerada a partir do modelo de Domínguez para o terceiro estudo de caso.....	104
Figura 4.36 – Curva caraterística I-V da célula tripla junção para concentrações diferentes às preestabelecidas para o terceiro estudo de caso	105
Figura 4.37 – Curva caraterística I-V do modulo multi junção estimada pelo modelo de Domínguez para o terceiro estudo de caso.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação do espectro de onda de radiação solar ($MA=1.5$)	12
Tabela 2.2 – Eficiência das células fotovoltaicas	16
Tabela 3.1 - Comparação Modelo de dois diodos vs. Modelo de cinco parâmetros	43
Tabela 3.2 – Características operacionais de um modulo fotovoltaico de silício cristalino ...	54
Tabela 3.3 – Características operacionais uma célula fotovoltaica tripla junção ($T=25^{\circ}\text{C}$)...	55
Tabela 3.4 – Propriedades intrínsecas de uma célula fotovoltaica tripla junção ($T=25^{\circ}\text{C}$, $X=1$).	55
Tabela 3.5 – Propriedades intrínsecas de uma célula fotovoltaica tripla junção ($T=25^{\circ}\text{C}$, $X=350$).....	55
Tabela 3.6 – Características operacionais de uma célula fotovoltaica tripla junção sob diferentes condições de temperatura e concentração.	56
Tabela 3.7 – Características operacionais de uma célula fotovoltaica tripla junção sob diferentes de concentração ($T=25^{\circ}\text{C}$).	58
Tabela 4.1 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos do modulo fotovoltaico Kyocera KC85T	72
Tabela 4.2 – Comparação das características elétricas de uma célula tripla junção obtidas a partir modelos gerais ($X=1$, $T=25^{\circ}\text{C}$) para o primeiro estudo de caso	77
Tabela 4.3 – Comparação das características elétricas de uma célula tripla junção obtidas a partir modelos gerais ($X=350$, $T=25^{\circ}\text{C}$) no primeiro estudo de caso	77

Tabela 4.4 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos de cada subcélula para 25°C e $X=1$	79
Tabela 4.5 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos da célula tripla junção para 25°C e $X=1$ para o primeiro estudo de caso	82
Tabela 4.6 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos de cada subcélula para 25°C e $X=350$ para o primeiro estudo de caso.....	84
Tabela 4.7 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos da célula tripla junção para 25°C e $X=350$	87
Tabela 4.8 – Comparação dos resultados obtidos entre os métodos de estimação do fator de idealidade do diodo no modelo de Fernández (2012) da célula tripla junção para 25°C e $X=1$	90
Tabela 4.9 – Comparação dos resultados obtidos entre os métodos de estimação do fator de idealidade do diodo no modelo de Fernández (2012) da célula tripla junção para 25°C e $X=350$	90
Tabela 4.10 – Características elétricas da célula tripla junção para 25°C e $X=350$ obtidas do modelo especializado de DOMÍNGUEZ, et al. (2010)	92
Tabela 4.11 – Características operacionais da célula tripla junção obtidas a partir modelos de cinco parâmetros para diferentes condições de temperatura e concentração	93
Tabela 4.12 – Condições de trabalho para o modelo de Domínguez	99
Tabela 4.13 – Características operacionais da célula tripla junção para diferentes condições de temperatura e concentração obtidas do modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) no segundo estudo de caso	99
Tabela 4.14 – Características operacionais da célula tripla junção para diferentes condições de concentração geradas a partir dos métodos de parametrização para o terceiro estudo de caso.....	102
Tabela 4.15 – Propriedades intrínsecas da célula tripla junção para diferentes condições de concentração calculadas pelos métodos de parametrização para o terceiro estudo de caso	102

Tabela 4.16 – Características operacionais da célula tripla junção para diferentes condições de temperatura e concentração obtidas do modelo Domínguez	103
--	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

a	Constante de variação da energia do gap em relação à temperatura
A	Área (m^2)
AM	Massa de ar
AU	Distância média entre as superfícies normais do sol e a Terra (m)
b	Constante de variação da energia do gap em relação à temperatura
B	Constante de incremento da corrente de saturação reversa em relação à temperatura
E	Espectro da radiação solar
E_g	Energia do gap (eV)
FF	Fator de forma
G	Radiação (W/m^2)
G_{dif}	Radiação difusa (W/m^2)
G_{dir}	Radiação direta (W/m^2)
G_{glob}	Radiação global (W/m^2)
G_r	Radiação solar padrão (W/m^2)
G_{sc}	Radiação fora da atmosfera (W/m^2)
I_d	Corrente do diodo (A)

I_{mp}	Corrente de máxima potência (A)
I_o	Corrente de saturação reversa (A)
I_{ph}	Corrente elétrica fotogerada (A)
I_{sc}	Corrente de curto-circuito (A)
I_{scr}	Corrente de curto-circuito de referência (A)
k	Constante de Boltzmann (J/K)
m	Fator de idealidade equivalente do diodo
m_c	Fator de idealidade calculado
m_f	Fator de idealidade final
m_i	Fator de idealidade inicial
n	Fator de idealidade do diodo
N	Dopagem de portadores com cargas negativas
N_p	Número de células em paralelo
N_s	Número de células em série
p	Constante proporcional da tensão de circuito aberto da subcélula equivalente
P	Dopagem de portadores com cargas positivas
P_{mp}	Potência máxima (W)
q	Carga elementar do elétron (C)
R_s	Resistência em série (Ω)
R_{sh}	Resistência em paralelo (Ω)
R_{sr}	Resistência em série para a temperatura de referência (Ω)
T_c	Temperatura da célula $^{\circ}\text{C}$
T_r	Temperatura padrão ou de referência $^{\circ}\text{C}$

V_{mp}	Tensão de máxima potência (V)
V_{oc}	Tensão de circuito aberto (V)
V_{ocr}	Tensão de circuito aberto de referência (V)
V_{th}	Diferença de potencial ganho devido à temperatura (V)
X	Concentração solar (sol =1000 W/m ²)
X_o	Concentração solar ótica (sol =1000 W/m ²)

Letras gregas

α	Coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura
β	Coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura
γ	Termo de terceira ordem de um ajuste polinomial da razão entre o coeficiente de difusão de portadores minoritários e a temperatura
δ	Declinação solar (°)
η	Eficiência (%)
λ	Comprimento de onda do espectro (μm)

Abreviações

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	Antirreflexivo
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSF	Back Surface Field (face posterior das células fotovoltaicas)
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua

CIGS	Células fotovoltaicas de índio e gálio
CIS	Células fotovoltaicas de cobre e índio
CPC	Compound Parabolic Concentrator (Concentrador parabólico composto)
CPV	Concentrated photovoltaics (Concentrador Fotovoltaico)
DSSC	Dye Sensitized Solar Cells (células solares sensibilizadas por corantes)
FV	Fotovoltaico
LEST-nano	Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e nanotecnologia
MJ	Multi junção
NREL	National Renewable Energy Laboratory
SFIE	Sistema Fotovoltaico Integrado à Edificação
WRC	World Radiation Center (Centro Mundial de Radiação)

Subscritos

e	Equivalente
in	Condição de entrada
j	Subscrito para indicar a posição de um vetor
M	Modulo fotovoltaico
out	Condição de saída
r	Referencia
T	Total

Sobrescritos

i	Sobrescrito para indicar a subcélula de calculo
---	---

SUMARIO

CAPÍTULO 1 - Introdução	1
1.1. Motivação.....	2
1.1. Objetivos	3
1.2. Considerações iniciais	3
1.3. Organização do texto	5
 CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica	6
2.1. Tecnologias fotovoltaicas	6
2.2. Princípios de radiação solar	9
2.2.1. <i>Distribuição da radiação solar</i>	10
2.3. Efeito fotovoltaico	12
2.4. Células fotovoltaicas	16
2.4.1. <i>Células de silício cristalino</i>	18
2.4.2. <i>Células de filme fino</i>	21
2.4.3. <i>Células multi junção</i>	23
2.4.4. <i>Células de polímeros orgânicos</i>	25
2.4.5. <i>Células de nanocristais de silício</i>	25
2.5. Dispositivos de concentração fotovoltaica	25
2.5.1. <i>Baixa concentração</i>	26
2.5.2. <i>Concentração média</i>	26
2.5.3. <i>Alta concentração</i>	27
2.6. Módulos ou painéis fotovoltaicos	28
2.7. Características operacionais dos dispositivos fotovoltaicos	29
2.7.1. <i>Influência da radiação incidente</i>	31

2.7.2. <i>Influência da Temperatura</i>	32
2.7.3. <i>Influência das ligações entre células</i>	33
2.8. Componentes de um sistema de energia fotovoltaica	33
2.8.1. <i>Conversores de energia elétrica</i>	34
2.8.2. <i>Dispositivos de armazenamento de energia</i>	34
2.8.3. <i>Controladores de carga</i>	35
CAPÍTULO 3 - Metodologia	36
3.1. Modelagem das células fotovoltaicas	36
3.1.1. <i>Modelo Ideal</i>	36
3.1.2. <i>Modelo de quatro parâmetros</i>	40
3.1.3. <i>Modelo de cinco parâmetros</i>	41
3.1.4. <i>Modelo de dois díodos</i>	42
3.2. Modelagem de células fotovoltaicas multi junção	44
3.2.1. <i>Modelo de Geoffrey S. Kinsey, et al.</i>	45
3.2.2. <i>Modelo de Domínguez et al.</i>	47
3.2.3. <i>Modelo de Fernandez</i>	49
3.3. Modelagem de módulos fotovoltaicos.....	53
3.4. Dispositivos fotovoltaicos utilizados na simulação	53
3.5. Métodos de estimação dos parâmetros das células fotovoltaicas.....	59
3.5.1. <i>Ajuste de curvas</i>	59
3.5.2. <i>Métodos analíticos</i>	62
3.5.3. <i>Microsoft Solver Excel ® - Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) não linear</i>	64
CAPÍTULO 4 - Resultados	68
4.1. Módulo fotovoltaico c-Si	68
4.1.1. <i>Parametrização e caracterização</i>	70
4.2. Célula Tripla-junção (Primeiro estudo de caso)	75
4.2.1. <i>Parametrização sem concentração</i>	78
4.2.2. <i>Parametrização para concentração de 350 sóis</i>	83
4.2.3. <i>Caracterização (modelos especializados)</i>	88

4.3. Célula Tripla-junção (Segundo estudo de caso)	92
4.3.1. <i>Parametrização</i>	92
4.3.2. <i>Caracterização pelo modelo de Domínguez</i>	99
4.4. Célula Tripla-junção (Terceiro estudo de caso)	101
4.4.1. <i>Parametrização</i>	101
4.4.2. <i>Caracterização pelo modelo de Dominguez</i>	103
 CAPÍTULO 6 - Conclusões e trabalhos futuros	107
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Atualmente, devido à crescente preocupação da população mundial, com o aquecimento global e a poluição ambiental, o desenvolvimento de tecnologias que visam o aproveitamento de energias renováveis estabeleceu-se como uma necessidade que ganhou grande destaque no cenário mundial. Segundo (CARPENDER, 2014), no Brasil cerca de 85% da energia elétrica consumida vem de fontes renováveis. As hidrelétricas representam 77% desse total de acordo com o ministério de Minas e Energia. Como é possível discernir desses dados, a matriz energética do Brasil está completamente desbalanceada por conta da elevada dependência da energia hidráulica. Atualmente, as 10 maiores usinas hidrelétricas estão operando com seus reservatórios abaixo da metade de sua capacidade, ameaçando sua produção de energia elétrica.

O fato da energia hidráulica ser dominante no Brasil se deve ao fato que o mesmo é um dos países mais ricos do mundo em recursos hídricos, entretanto em outubro de 2012 praticamente todas as termoeletricas brasileiras foram acionadas a plena carga por conta dos níveis baixos dos reservatórios, provocando assim a emissão de milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera e o incremento nas tarifas pagas pelos usuários. Assim, observa-se uma fragilidade nesse sistema de geração (hidrelétricas), visto a dependência do balanço hídrico e que as mesmas não são constantes ao longo do tempo (VIEIRA, 2014). O futuro do desenvolvimento econômico brasileiro depende da diversificação da sua matriz energética.

Nessas condições, os dispositivos que funcionam como geradores de energia elétrica fotovoltaica aparecem no cenário como uma das opções mais atrativas na tentativa da diversificação da matriz energética brasileira. Ainda mais quando hoje, dispõe-se de células fotovoltaicas que apresentam eficiências superiores a 45% (NREL, 2015), como é o caso da tecnologia multi junção, que deve seu alto índice de eficiência ao maior aproveitamento do

espectro da radiação solar. Nesse sentido, estes dispositivos se apresentam como uma proposta promissora para a redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos de energia solar.

Em particular, uma célula de multi junção é projetada de forma que cada junção absorva uma determinada porção do espectro solar. As junções são interligadas em série e, portanto, as correntes geradas em cada junção devem ser similares (BURNETT, 2002). Para o maior aproveitamento desta tecnologia, este tipo de células está sendo utilizada em combinação com elementos ópticos (concentradores) que aumentam a quantidade de radiação que atinge a célula. Em consequência, estes dispositivos também são conhecidos como dispositivos de alta concentração. Estas células tem sido amplamente utilizadas durante muito tempo em aplicações espaciais (satélites). Não obstante, as possibilidades de aproveitamento tanto destas células como de outras que utilizam tecnologias tradicionais (monojunção), são numerosas (FARRET, 2010). Entre elas se destacam as seguintes: iluminação residencial e pública, sinalizador estroboscópio, iluminação de embarcações fluviais e marítimas, telecomunicações, controle de pragas, suprimento de água e sistemas de microirrigação, conservação de alimentos e medicamentos, suprimento de energia elétrica em regiões desprovidas de redes de distribuição de energia, etc.

1.1. Motivação

À medida que o mercado de geradores fotovoltaicos cresce, a necessidade de informações confiáveis a respeito de suas características elétricas e físicas, tais como a potência efetivamente desenvolvida quando em funcionamento, aumenta para fabricantes e projetistas. Do lado do fabricante, conhecer esses parâmetros permite a classificação dos módulos e a geração de documentação técnica (catálogos, manuais) de maior qualidade. Para os projetistas de sistemas, o incremento da confiabilidade nessas especificações permite a otimização dos projetos, a comparação entre fabricantes, além de servir como base de sustentação para aspectos comerciais nos contratos de fornecimento.

Assim, a determinação dos parâmetros ou características operacionais de células e módulos fotovoltaicos é essencial para que possam ser aplicados modelos que permitam simular o comportamento destes dispositivos nas mais diversas situações, a fim de compreender de uma melhor maneira a natureza do funcionamento dos mesmos.

Além disso, este é um estudo complementar ao projeto de parceria entre o Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LEST-nano) e a empresa Rio Verde

Energia S.A., o qual visa o desenvolvimento de um novo tipo de módulo fotovoltaico mediante o desenvolvimento e aplicação de tecnologias vanguardistas no campo da energia solar no Brasil, razão pela qual a estimativa das características elétricas destes dispositivos torna-se indispensável, tanto para otimizar a capacidade de fornecimento de energia, como para o desenho dos demais elementos que compõem o sistema fotovoltaico (controladores de carga, baterias, etc.).

No entanto, os modelos e métodos de parametrização aplicados a tecnologias fotovoltaicas tradicionais contam com uma ampla aceitação por parte da comunidade científica. No caso das tecnologias multi junção ainda estão sendo desenvolvidas pesquisas que permitam estabelecer modelos que reproduzam fielmente o comportamento destes dispositivos.

1.1. Objetivos

Calcular os valores correspondentes às principais propriedades físicas de dispositivos fotovoltaicos mono e multi junção (parametrização), a partir de dados coletados na literatura em pesquisas teóricas e experimentais, mediante a aplicação de modelos teóricos desenvolvidos por diferentes autores para tal fim.

Analisar as mudanças que possam ocorrer nas características elétricas dos dispositivos fotovoltaicos (caracterização), quando aplicadas alterações nas condições de temperatura, radiação e espectro, além de determinar as principais diferenças no comportamento para cada tecnologia (mono e multi junção)

Avaliar as diferentes metodologias existentes para a estimativa dos parâmetros físicos e das características operacionais dos dispositivos fotovoltaicos e determinar se estas são válidas para todas as tecnologias fotovoltaicas utilizadas no presente estudo.

1.2. Considerações iniciais

Para a aplicação de métodos de avaliação dos parâmetros dos dispositivos fotovoltaicos é necessário, primeiramente, conhecer o funcionamento e as características dos mesmos.

As células e módulos fotovoltaicos são fabricados a partir de materiais semicondutores, na prática, os módulos fotovoltaicos são compostos por várias células solares conectadas

entre si. Os materiais mais utilizados são silício monocristalino (módulos com 30 a 36 células), silício policristalino (módulos com 36 células), silício amorfo (módulos com 27 ou 28 células) e arseneto de gálio (ainda não foi estabelecido um tamanho padrão). Assim, o funcionamento, a modelagem e a construção das células solares são baseados na física dos semicondutores.

Para o aumento da potência são utilizados vários módulos fotovoltaicos associados em série e/ou em paralelo, obtendo-se assim níveis de tensões e potências adequados para satisfazer as necessidades diárias de uma determinada aplicação. Além disto, a potência do módulo fotovoltaico depende das condições de irradiância, temperatura e da carga.

Os dispositivos fotovoltaicos são representados por circuitos elétricos equivalentes, que o descrevem de forma detalhada ou simplificada. Esta última é mais utilizada para os estudos dos módulos fotovoltaicos, devido à sua simplicidade. A representação de um módulo ou célula na forma detalhada é um modelo complexo composto por um ou dois diodos (difusão e/ou recombinação), uma resistência em paralelo e uma resistência em série. Na forma simplificada são desconsiderados alguns componentes, como as resistências série e paralelo.

Para a determinação dos parâmetros que descrevem o modelo na forma de circuito elétrico é necessária, inicialmente, a caracterização da célula ou módulo fotovoltaico. Esta caracterização é feita pela curva corrente-voltagem (I-V), que é fornecida pelos fabricantes ou obtida por meio de ensaios feitos em laboratório (*indoor*) ou em campo (*outdoor*). Estes ensaios seguem procedimentos ditados por normas que determinam os valores de temperatura, radiação e espectro que devem ser utilizados, além de outras condições. Com o levantamento da curva característica I-V, podem ser determinados alguns parâmetros operacionais. Entretanto, existem parâmetros intrínsecos do material cuja determinação necessita de ensaios especiais, como no caso das propriedades utilizadas na modelagem matemática.

Uma maneira de se evitar os ensaios especiais é usar metodologias para estimar todos os parâmetros do dispositivo fotovoltaico, por intermédio da curva característica, mesmo aqueles parâmetros que necessitam de ensaios específicos. Entre estas metodologias, as mais utilizadas são o ajuste de curvas e expressões analíticas. Porém, frequentemente estas técnicas apresentam complexidade nas equações requeridas, alguns termos possuem aproximações que induzem a um maior erro no resultado, além da falta de coerência entre os autores para as equações utilizadas no cálculo de alguns parâmetros.

Além disso, a não linearidade da maioria dos modelos que descrevem o comportamento destes dispositivos, torna necessária a aplicação de métodos matemáticos e algoritmos iterativos para conseguir encontrar uma solução satisfatória dos mesmos.

1.3. Organização do texto

Resumidamente, a presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

No Capítulo II é apresentada a revisão bibliográfica que objetiva os principais fenômenos e características que se apresentam nos diferentes dispositivos fotovoltaicos, onde é também estudada a natureza da fonte que abastece de energia estas tecnologias, sem deixar de lado os acontecimentos históricos que impulsionaram as pesquisas nesta área. São, também, descritos os outros dispositivos que conformam um sistema fotovoltaico funcional.

No Capítulo III são descritos os modelos empregados na caracterização operacional dos dispositivos fotovoltaicos, fazendo a diferenciação entre os que são mais comumente utilizados em tecnologias monojunção e os que são especialmente propostos para dispositivos de junção múltipla. Da mesma forma, são definidos os principais métodos de parametrização destes dispositivos de maneira geral e são expostas as metodologias utilizadas para a aplicação de cada um dos anteriores. São também estabelecidos os dados pertencentes aos dispositivos fotovoltaicos aqui utilizados, e as condições de análise para cada um deles.

O Capítulo IV apresenta, primeiramente os resultados da parametrização, onde são mencionadas as maiores dificuldades e erros de alguns dos métodos aplicados, avaliando assim quais são os mais recomendados. Serão apresentados, ainda, os resultados da caracterização dos diferentes modelos expostos para condições operacionais diferentes daquelas definidas pelas normas, para cada um dos tipos de células e módulos estabelecidos no Capítulo III.

Finalmente, o Capítulo V reúne as principais conclusões derivadas desta dissertação a partir dos resultados obtidos das simulações. Encontram-se também, neste capítulo, algumas sugestões para trabalhos futuros que pretendam versar sobre o tema aqui abordado.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de apresentar da melhor forma possível os tópicos de maior relevância na pesquisa bibliográfica realizada no transcurso desta dissertação, inicialmente é definida de maneira breve o panorama do estado da arte das tecnologias fotovoltaicas, explorando as causas e motivos que incentivaram o desenvolvimento de pesquisas nessa área.

São também explicados os princípios da radiação solar, o que contribui na construção de uma base de dados de maior solidez para a compreensão dos fenômenos que acontecem no interior dos materiais utilizados na fabricação de dispositivos fotovoltaicos.

Posteriormente, descrevem-se os conceitos fundamentais do efeito físico responsável da conversão de energia solar em energia elétrica. Além de uma análise detalhada dos diferentes dispositivos fotovoltaicos existentes, destacando as qualidades intrínsecas de cada um deles e do processo de fabricação dos dispositivos de maior importância.

É também realizada uma análise das principais características na avaliação dos dispositivos fotovoltaicos, ressaltando o desempenho de cada um em relação às condições ambientais, tema de grande interesse neste trabalho.

Finalmente, far-se-á a exposição de outros tipos de dispositivos que compõem um sistema fotovoltaico.

2.1. Tecnologias fotovoltaicas

Em 1954 (CHAPIN, et al. 1954) foi apresentada a primeira célula solar moderna. Ela tinha apenas dois centímetros quadrados de área e uma eficiência de 6%, gerando 5 mW de potência elétrica.

Durante a segunda metade da década de 1970 logo após a primeira grande crise do petróleo, o uso e a exploração das diferentes energias renováveis experimentou um grande impulso, porém naquele tempo as questões econômicas foram o fator mais importante e por isso o interesse nesses tipos de processos diminuiu quando os preços do petróleo caíram (LUQUE e HEGEDUS, 2003).

Depois os problemas ambientais, principalmente o aquecimento global, que ocorre principalmente devido aos gases de efeito estufa lançados na atmosfera, foi um dos motivos cruciais que impulsaram de novo o interesse na pesquisa de fontes alternativas de energia. Uma vez que uma das maiores fontes de poluição eram as usinas termoeletricas, que usavam combustíveis fósseis como o carvão, óleo diesel, gás natural, entre outros (BRAGA, 2008).

Assim, os tipos de energia alternativas mais pesquisadas foram energia solar, eólica, biomassa, etc. sendo que a mais abundante fonte sustentável de energia é o Sol, que oferece mais de 150 mil TW de energia para a Terra (DUFFIE e BECKMAN, 1980). Desta forma, quase todas as fontes de energia (hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos) são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar tem a vantagem de poder ser utilizada diretamente como energia elétrica por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoeletrico e o fotovoltaico (ANEEL, 2005). Entretanto, a solução mais popular é a energia fotovoltaica, principalmente por se tratar de um tipo de tecnologia de baixo custo quando comparada com as demais.

Desta forma, cinquenta anos depois da fabricação da primeira célula fotovoltaica, em 2004 as células solares já ultrapassavam o rendimento de 16% e a capacidade instalada mundial de energia solar era de 2,6 GW, aproximadamente 18% da capacidade instalada da usina de Itaipu. Os principais países produtores eram o Japão (com 1132 MW instalados), seguido da Alemanha (com 794 MW) e Estados Unidos (365,2 MW) (IEA, 2009). Até o final de 2010, a capacidade mundial de geração de energia fotovoltaica era de aproximadamente 17 GW, três anos depois, registrou-se um crescimento superior a 50%, registrando-se a marca de 38 GW, (EPIA, 2015). A Fig. 2.1 mostra o crescimento da capacidade de geração instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo do 2008 até 2013.

O Brasil é um país privilegiado no seu potencial energético solar, pois os valores de irradiação solar global diária incidente, média anual, em qualquer região do território brasileiro (4200-6700 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²). O potencial energético solar do Brasil também é maior que boa parte dos Estados Unidos da América (EUA) (3500-5000 kWh/m²), exceto a região sudoeste dos EUA (5000-6800

kWh/m²), e equivalente ao continente Africano (2000-7500 kWh/m²), sendo que a maior incidência está no deserto do Saara (6500-7500 kWh/m²) (NREL, 2011)

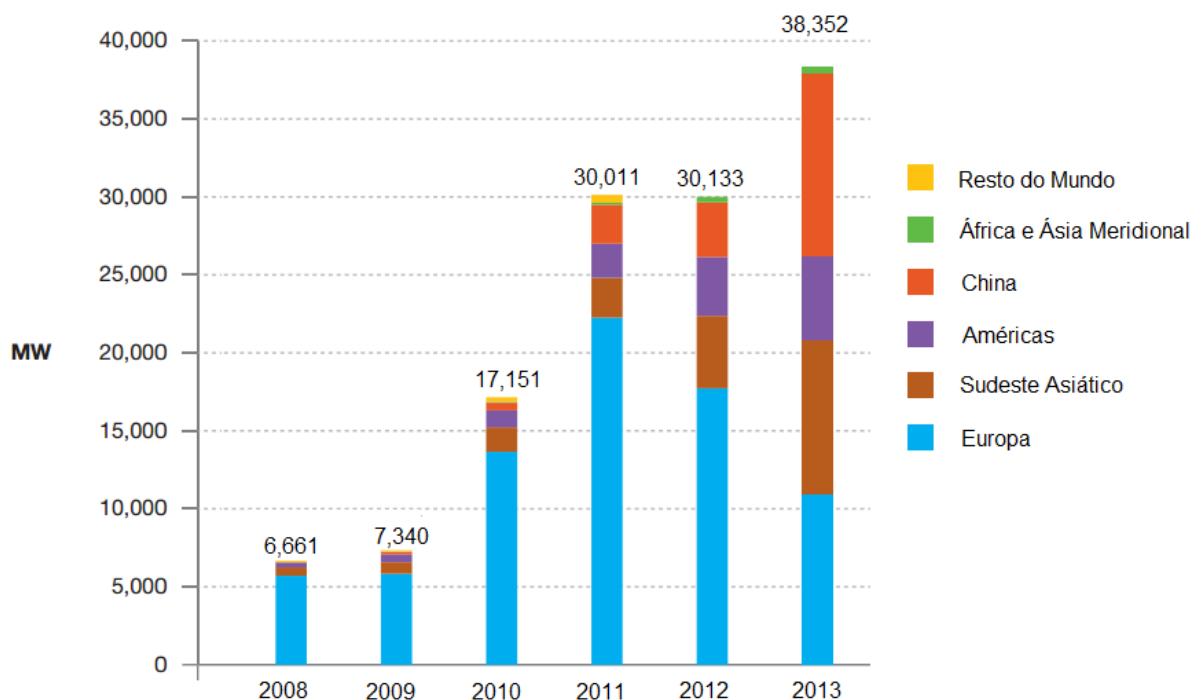


Figura 2.1 – Evolução global de capacidade de energia fotovoltaica instalada (2008-2013)

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015), no presente ano a capacidade brasileira de geração de energia fotovoltaica fiscalizada pela agência reguladora é de aproximadamente 15,8 MW, sendo que novembro de 2011, era somente 1MW, isto demonstra o rápido crescimento que tem experimentado a aplicação deste tipo de sistemas em território brasileiro.

Porém, ainda não é conhecida a capacidade de geração de energia fotovoltaica total somando os sistemas isolado da rede. Num trabalho recente (ZILLES, 2010), foi estimado que a energia fotovoltaica produzida no Brasil em sistemas isolados, até março de 2010, era de aproximadamente 20 MW. Assim, segundo a EPIA, estima-se que ainda neste ano, a capacidade global de energia fotovoltaica instalada será de aproximadamente 131 GW e se, forem adotadas políticas públicas que estimulem o crescimento do setor, esse número pode chegar a quase 196 GW.

2.2. Princípios de radiação solar

O sol é uma esfera feita de gases em combustão, maiormente composto por hidrogênio (70%) e hélio (27%) que são gases nobres, por esta razão sua densidade de $1,4 \text{ g/cm}^3$ é relativamente baixa (CAMACHO, *et al.*, 2012). A massa do sol representa o 99,9% da massa total do sistema solar e 330.000 vezes a massa da Terra. O sol tem uma temperatura de efetiva de 5777 K, entretanto a temperatura em seu centro é estimada entre $8 \times 10^6 \text{ K}$ e $40 \times 10^6 \text{ K}$ (DUFFIE e BECKMAN, 1980). O Sol produz por segundo uma quantidade de energia da ordem de $3,90 \times 10^{26} \text{ J}$ (PARKER, 1994), proporcionados por reações term nucleares que ocorrem no seu núcleo, isto é, quatro átomos de hidrogênio se fundem nuclearmente para formar um átomo de hélio, liberando assim uma grande quantidade de energia.

A intensidade de radiação na superfície solar é de aproximadamente 63 MW/m^2 (CAMACHO, *et al.*, 2012), porém, como a distância média entre as superfícies normais do sol e a Terra é de $1496 \times 10^{11} \text{ m}$, a energia solar que atinge à Terra resulta numa intensidade fixa de radiação chamada “constante solar” como mostrado na Fig. 2.2.

O valor da constante solar, foi determinado por repetidas medidas com balões meteorológicos e satélites, encontrando um valor de 1.367 W/m^2 com incerteza de $\pm 1\%$. Este é o valor adotado pelo WRC (World Radiative Center) desde 1983 (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

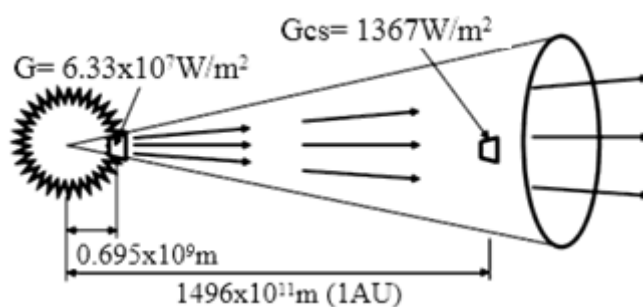


Figura 2.2 – Definição da constante solar

A Terra percorre uma trajetória elíptica ao redor do Sol, sendo que o plano formado pelas posições da Terra durante o ano é chamado de plano eclíptico e a Terra leva um período de um ano para percorrer este trajeto (IQBAL, 1983).

O plano da eclíptica em relação ao equador terrestre forma um ângulo entre $23,45^\circ$ e $-23,45^\circ$, chamado de declinação solar (δ). Como é possível observar na Fig. 2.3, a declinação

varia em média $0,5^\circ$ por dia, sendo que quando o valor é zero corresponde aos equinócios (primavera ou outono) e o valor máximo ($23,45^\circ$) ocorre no solstício de verão e quando o valor é mínimo ($-23,45^\circ$) corresponde ao solstício de inverno no hemisfério norte e inversamente no hemisfério sul.

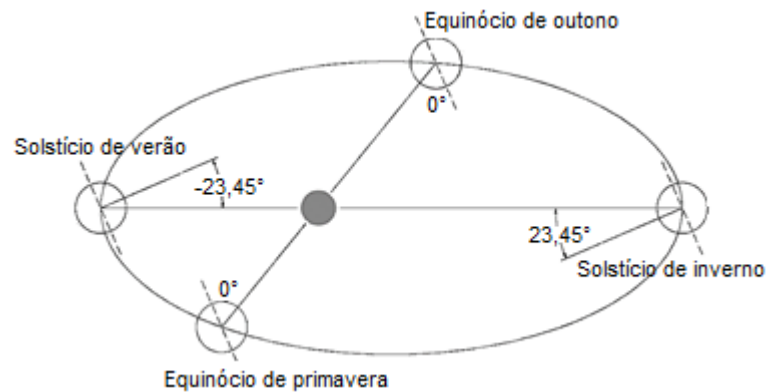


Figura 2.3 – Declinação da superfície terrestre

2.2.1. Distribuição da radiação solar

Quando a radiação solar atinge a atmosfera, uma parte é refletida, outra parte é espalhada e outra parte é absorvida pelo ar. A radiação que consegue chegar diretamente na superfície é chamada *radiação direta* e a radiação espalhada é conhecida como *radiação difusa*, conforme indicado pela Fig. 2.4.

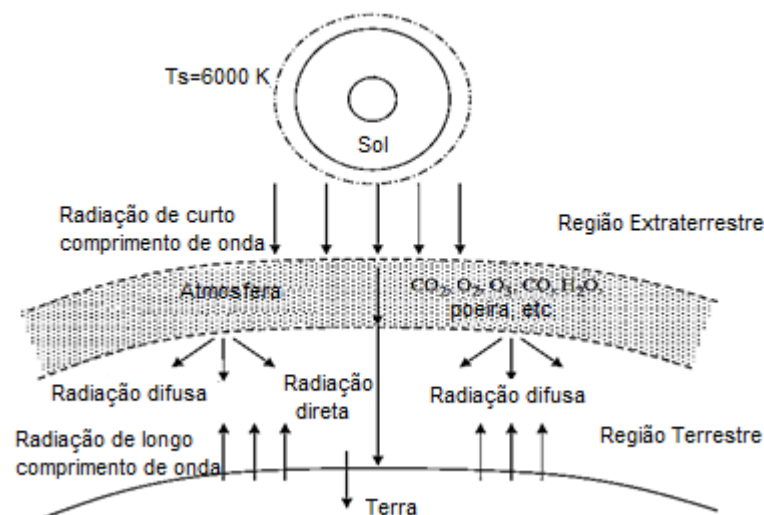


Figura 2.4 – Componentes da radiação solar

O albedo é um indicativo da quantidade de radiação solar refletida pela superfície terrestre de acordo com o tipo de vegetação ou constituição da região. Este parâmetro é definido como a razão entre a radiação difusa refletida pelo solo e a radiação incidente.

Num dia com céu parcialmente nublado, os valores de radiação direta e difusa se alternam de acordo com as condições climáticas. Entretanto em um dia de céu limpo e próximo ao meio dia, a radiação direta é a predominante.

Assim, a radiação global (G_{glob}) é definida mediante a Eq.(2.1), como a soma da radiação direta (G_{dir}) e a difusa (G_{dif}).

$$G_{glob} = G_{dir} + G_{dif} \quad (2.1)$$

Os gases (vapor de água, ozônio e dióxido de carbono) e as impurezas (poeira, fuligem, etc.) presentes no ar, responsáveis pela dispersão da radiação solar, são também conhecidas como massa de ar. Riordan e Hulstron (1990), definiram a massa de ar como uma porção individualizada do ar atmosférico que possui características e propriedades das condições gerais do tempo dos locais onde se formam.

O deslocamento da massa de ar é provocado pela diferença de pressão e temperatura entre as diversas áreas da superfície. Na Fig. 2.5 é mostrada a forma de calcular a quantidade de massa de ar dependendo da declinação da posição do sol.

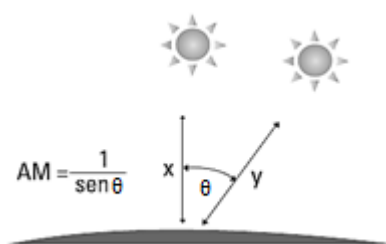


Figura 2.5 – Massa do ar atravessada pela radiação solar

A massa de ar tem efeitos na radiação solar incidente, o ângulo de incidência dos raios solares através da atmosfera terrestre faz com que estes possuam um percurso com maior ou menor massa de ar atravessada. A massa de ar muda em relação à inclinação da Terra em relação ao Sol (LIMA MORAIS, 2009). Assim, o espectro de radiação solar sobre uma superfície determinada da Terra, dependerá diretamente da massa de ar no local, conforme mostra a Fig. 2.6.

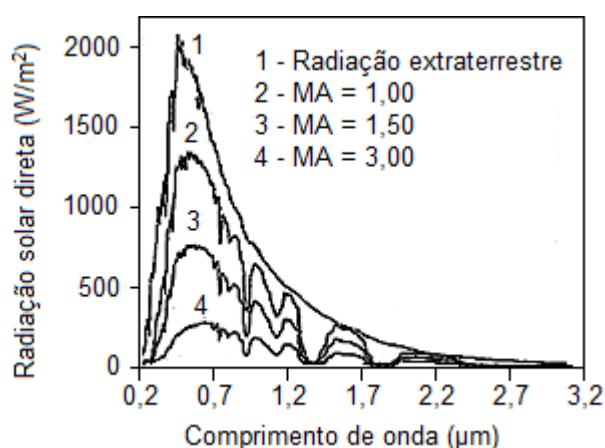


Figura 2.6 – Espectro de radiação solar para diferentes massas de ar.

Fonte: Duffie e Beckman, 1980

No continente europeu, a média do espectro de radiação solar durante o ano foi estabelecida para uma massa de ar de 1.5 (RIORDAN e HULSTRON, 1990).

O espectro de radiação solar, ainda pode ser classificado em diferentes faixas dependendo do comprimento de onda. Na Tab. 2.1, é mostrado essa classificação da energia relativa contida em cada faixa.

Tabela 2.1 – Classificação do espectro de onda de radiação solar (MA=1.5)

Faixa do espectro	Ultravioleta	Visível	Infravermelho
Comprimento de onda (μm)	<0,38	0,38 - 0,78	>0,78
Energia disponível (%)	7	47,3	45,7

Fonte: Drummond e Thekaekara (1993)

2.3. Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico descoberto pelo físico Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, consiste no surgimento de uma diferença de potencial entre dois materiais semicondutores de propriedades elétricas diferentes devido à incidência de luz na região de junção entre os mesmos (COPELAND, BLACK e GARRETT, 1942).

A seguir é exemplificado o efeito fotovoltaico que ocorre nos materiais semicondutores, mediante o silício monocristalino (por ser o material mais usado para fabricação de células), entretanto é interessante ressaltar que com outros materiais ocorrem situações semelhantes.

O efeito fotovoltaico é um fenômeno de natureza atômica, quando os átomos de silício (tetravalente) se ligam uns aos outros em redes cristalinas e todos os elétrons de valência são usados em ligações do tipo covalente, não restando, a princípio, elétrons responsáveis pela condução eletrônica. Entretanto, em temperaturas acima de 0 K alguns elétrons absorvem energia térmica e se libertam da estrutura cristalina, passando para a camada de condução como elétrons livres, sendo chamado de condutividade intrínseca (MAPSET LTD.; GATESHEAD, UK, 2008). Um esquema representativo desse fenômeno é mostrado na Fig. 2.7. Nota-se que cada elétron libertado da estrutura cristalina deixa um átomo com uma carga positiva em excesso, que pode ser interpretado como cargas positivas também responsáveis pela condução elétrica (COMETTA, 2004). Estas ligações incompletas são chamadas de “buracos” ou lacunas. A energia necessária para que um elétron salte da camada de valência para a de condução é denominada energia do gap.

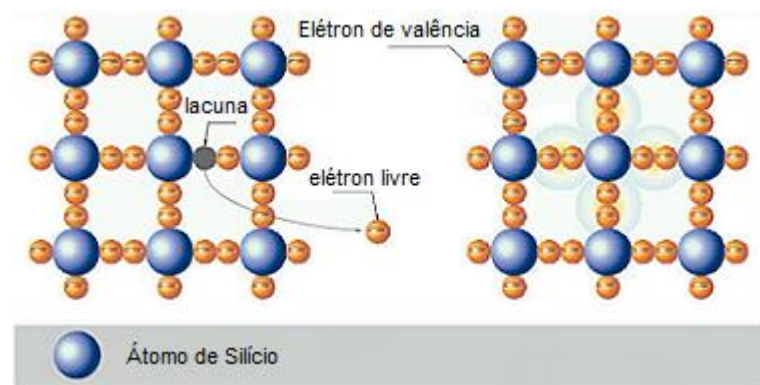


Figura 2.7 – Condutividade intrínseca na estrutura cristalina do silício

Fonte: Men at work GmbH & Co. KG, 2014

A energia do gap está relacionada à temperatura mediante a seguinte expressão:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{aT}{T + b}, \quad (2.2)$$

onde, $E_g(0)$ é a energia do gap em 0 K, a e b são constantes tabeladas que dependem do material da célula.

A condutividade adquirida devido à temperatura é, no entanto, muito pequena, podendo ser drasticamente aumentada segundo um processo conhecido como dopagem.

A dopagem consiste na adição controlada de átomos de elementos com mais ou com menos de quatro elétrons na camada de valência. Como pode ser visto na Fig. 2.8, se uma amostra de silício for contaminada com átomos de boro, que possuem três elétrons na camada

de valência, existirá um elétron a menos na estrutura cristalina para cada átomo de boro acrescentado. Interpretando de outra forma, tal contaminação faria surgir uma carga positiva em excesso para cada átomo de boro. A região na qual seria feita essa inserção de átomos de boro é chamada de região P. Se, por outro lado, fossem acrescentados átomos de um material pentavalente como o fósforo, haveria um elétron a mais na estrutura cristalina para cada átomo de fósforo inserido. A região na qual seriam acrescentados tais átomos de fósforo passa a ser chamada de região N.

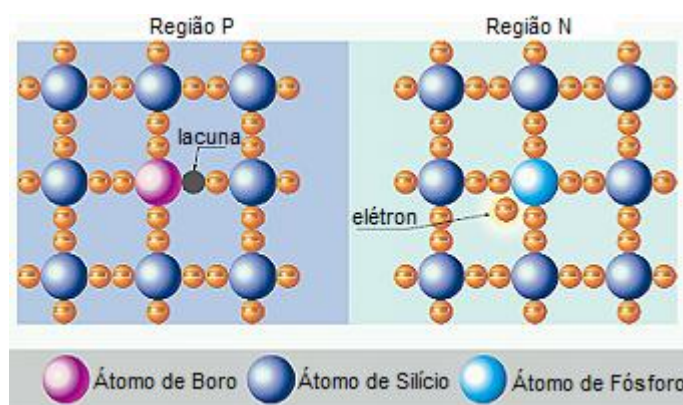


Figura 2.8 – Dopagem da estrutura de silício

Fonte: Men at work GmbH & Co. KG, 2014

O tipo de dopagem, N ou P, indica o tipo de portadores (cargas negativas ou positivas) responsáveis pelo transporte de corrente no material (MARQUES, 2005).

Portanto, se uma amostra de silício puro for dopada de um lado com átomos pentavalentes e do outro lado com átomos trivalentes, tem-se então o que é chamado de junção PN, nesta junção ocorre uma migração de elétrons do lado N para o lado P e uma migração de lacunas no lado P para o lado N, conhecido como difusão.

A migração de cargas elétricas gera um campo elétrico que vai aumentando a medida que mais cargas se deslocam para o lado contrário da junção até que o valor desse campo se torne suficientemente forte para contrabalancear a força de atração elétrica, a responsável pela migração das cargas. A região na qual ocorre o acúmulo de íons positivos não neutralizados do lado P e íons negativos não neutralizados do lado N é chamada de região de depleção (Fig. 2.9).

O aumento dos componentes de corrente de difusão dos portadores (lacunas do lado P para o lado N e de elétrons do lado N para o lado P) faz com que haja um aumento na concentração de lacunas (minoritários) na borda da região de depleção no lado N e de elétrons

(minoritários) na borda da região de depleção no lado P. Comumente chama-se este processo de injeção de portadores majoritários, que atravessam a barreira de potencial da junção. Nestas regiões, fora da região de depleção, próximo às suas bordas, teremos continuidade de corrente pela combinação dos mecanismos de difusão e de recombinação (concentração de portadores minoritários acima do seu valor de equilíbrio, devido ao portadores injetados) (SWART, 2002).

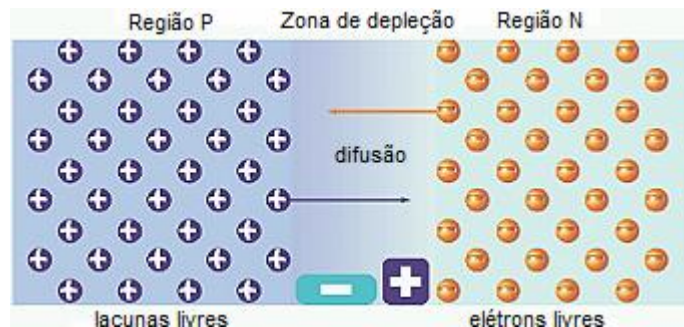


Figura 2.9 – Zona de depleção na junção PN e difusão de elétrons e lacunas

Fonte: Men at work GmbH & Co. KG, 2014

Devido ao campo elétrico gerado na região de depleção, não há diferença de potencial entre as superfícies do lado P e do lado N. Entretanto se a junção for exposta à luz (fótons com energia maior do que o gap) ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna, dando origem a uma corrente através da junção e por sua vez a uma diferença de potencial entre as superfícies das regiões P e N, como é mostrado na Fig. 2.10.

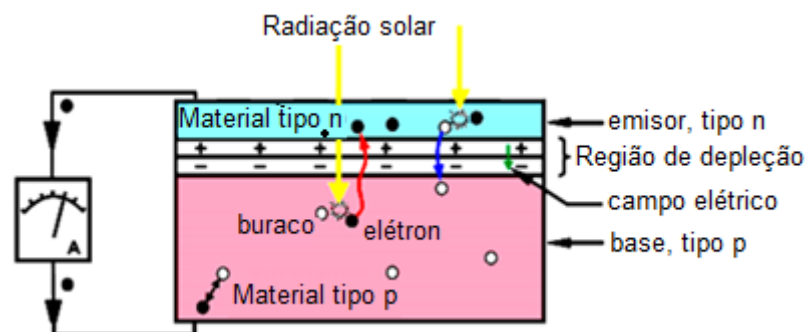


Figura 2.10 – Geração de energia elétrica devido ao efeito fotovoltaico

2.4. Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são os dispositivos conversores de energia radiante em energia elétrica que funcionam segundo o efeito fotovoltaico. Na sua grande maioria, as células usadas em aplicações comerciais podem ser encaradas como diodos de junção PN de grande área. As células fotovoltaicas podem ser divididas em relação a estrutura de ligação dos átomos dos quais são constituídas. Desta forma a estrutura atômica pode ser do tipo cristalina ou do tipo amorfa. A estrutura cristalina pode ser ainda monocristalina ou multicristalina.

Quanto ao material utilizado para a fabricação das células, este pode ser composto por ligas, como telureto de cádmio e arseneto de gálio entre outros ou por apenas um elemento como o silício, germânio ou selênio. Na parte frontal das células é acrescentada uma camada de um material, geralmente TiO_2 ou SiO_2 , a fim de minimizar as perdas por reflexão. Apesar da crescente produção de células de filmes finos, bem como de multicamadas, o silício nas suas diferentes formas ainda representa mais de 90% de toda a tecnologia fotovoltaica produzida anualmente. A Tab. 2.2 apresenta as maiores eficiências das diferentes células fotovoltaicas fabricadas com diferentes materiais e tecnologias. Na Fig. 2.11 pode ser encontrada uma linha de tempo do desenvolvimento das células fotovoltaicas com suas respectivas eficiências.

Tabela 2.2 – Eficiência das células fotovoltaicas

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,6±0,5
	Policristalino	20,4±0,5
	Filmes finos	20,1±0,4
Compostos III A-VA	GaAs (filme fino)	28,8±0,9
	GaAs (policristalino)	18,4±0,5
	InP (monocristalino)	22,1±0,7
Calcogênios compostos II B-VA	CIGS ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$) filme fino	20,8±0,6
	CdTe (filme fino)	20,4±0,5
Silício amorfo/nanocristalino	Amorfo (a-Si) filme fino	13,4±0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1±0,2
Células sensibilizadas por corantes (DSSC)		11,9±0,4
Células orgânicas (filme fino)		10,7±0,3
Multi junção	InGaP/GaAs/Ge	44,4±0,9
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4±0,4

Best Research-Cell Efficiencies

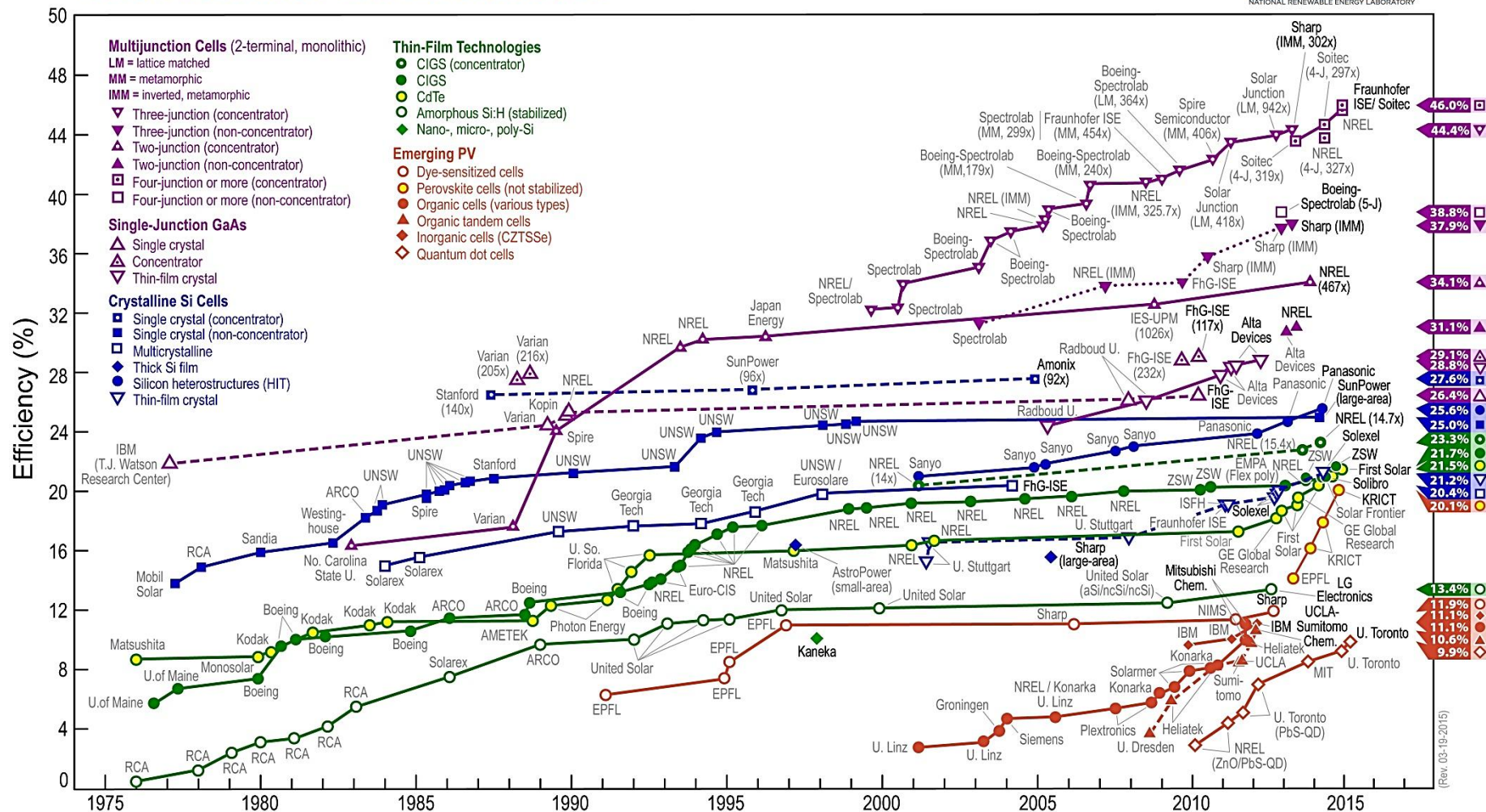


Figura 2.11 – Linha de tempo de eficiência das células fotovoltaicas

Fonte: NREL, 2015

2.4.1. Células de silício cristalino

O material mais importante na fabricação de células solares cristalinas é o silício. Depois do oxigênio, este é o segundo elemento mais abundante na Terra e isso faz que esteja disponível em quantidades quase ilimitadas.

As células de c-Si corresponderam em 2011 a 87,9% do mercado mundial. Para sua fabricação, a matéria prima utilizada é o silício ultrapuro. Pode ser utilizada a mesma matéria prima da indústria eletrônica (*chips*) o chamado silício grau eletrônico (Si-gE), com uma pureza de 99,99%, também denominada 9N (nove noves), ou então o silício grau solar (Si-gS), com 99,99% (6N), de menor custo (este último não pode ser usado na indústria eletrônica) (TAVARES e GALDINO, 2014).

O Si-gE é obtido, por meio de uma rota denominada processo *Siemens*, a partir do silício impuro, que é o silício grau metalúrgico (Si-gM), com pureza de ~99%. Já o Si-gS é obtido por meio do processo chamado *Siemens modificado*, ou por meio de outras rotas alternativas.

O Si metalúrgico (Si-gM), por sua vez, é obtido da sílica (SiO_2) em fornos a arco elétrico numa temperatura que pode atingir 1780 °C, utilizando como matéria prima quartzo ou areia e o carvão.

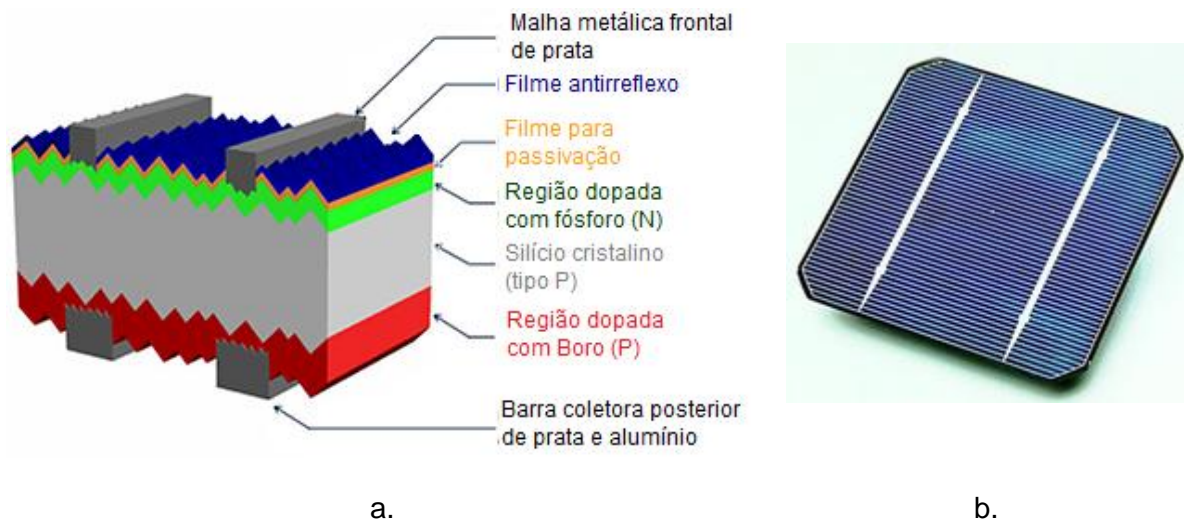


Figura 2.12 – Célula fotovoltaica de silício cristalino: a. Estrutura básica b. Célula comercial

A Fig. 2.12 resume a estrutura completa da célula fotovoltaica industrial de c-Si tipo p, constituída de: 1) lâmina de silício cristalino tipo p dopada com boro, 2) região n⁺ dopada com

fósforo (o índice $+$ significa que a concentração de dopante é superior a 1×10^{19} átomos/cm³), 3) região p^+ dopada com alumínio, para reduzir a recombinação na face posterior, denominada de campo retrodifusor ou BSF (*back surface field*), 4) malha metálica frontal fabricada com prata, 5) barras coletoras ou malha metálica traseira de alumínio-prata, 6) filme antirreflexivo (AR) e 7) filme para passivação.

Os contatos metálicos colocados em ambas faces da célula também conhecidos como eletrodos, tem como objetivo obter um dreno adequado na corrente gerada. Assim, estes eletrodos ocupam toda a área da face não exposta à luz e formam uma grade na face que recebe a radiação solar. Em células convencionais de silício cristalino, tanto o desenho da grade frontal, quanto a metalização na parte posterior da célula são comumente impressos por um processo de serigrafia, que envolve diversas etapas (BÜHLER, 2011).



Figura 2.13 – Processo de fabricação de células solares mono e policristalinas de silício.

O silício usado na fabricação das células fotovoltaicas pode ser monocristalino (m-Si) ou policristalino (p-Si). O primeiro é obtido pelo método Czochralski (Si-Cz), existe ainda outra técnica chamada fusão zonal flutuante (Si-FZ, Float Zone), porém não é muito usada. No

silício policristalino (p-Si), em vez de se formar um único cristal, o material é solidificado em forma de um bloco composto de pequenos cristais, com dimensões da ordem de centímetros.

A partir do corte de um bloco de p-Si ou lingotes de m-Si tipo Si-Cz ou Si-FZ, são obtidas lâminas, nas quais são fabricadas as células fotovoltaicas, conforme a Fig. 2.13. As lâminas de silício usadas atualmente têm espessura da ordem de 0,2 mm, mas o objetivo das pesquisas em andamento para 2020 é obter lâminas de até 0,12 mm de espessura, a fim de reduzir os custos de fabricação. A espessura é um fator de projeto e otimização das células fotovoltaicas. Células muito espessas perdem eficiência por recombinação em função dos comprimentos de difusão no material dos elétrons fotogerados, enquanto que células muito finas perdem eficiência devido ao coeficiente de absorção óptica do material.

Alguns fabricantes vêm disponibilizando comercialmente células fotovoltaicas de c-Si coloridas para módulos destinados à integração arquitetônica (SFIE – Sistema Fotovoltaico Integrado à Edificação) e fornecidos sob encomenda (Fig. 2.14). As cores são obtidas por diferentes composições e/ou espessuras na camada antirreflexiva (AR) das células. A cor usual do AR varia do azul escuro ao preto, dando às células sua conhecida cor característica, e a mudança resulta em redução de sua eficiência. A substância usada na camada AR convencional é o SnO_2 , que é, na realidade, transparente, e a cor azulada visualizada é resultado da interferência óptica causada pela espessura da camada e seu índice de refração.

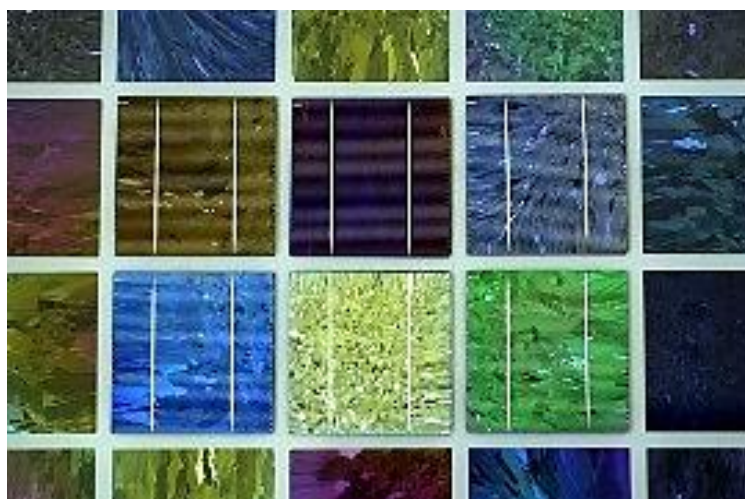


Figura 2.14 – Células coloridas de c-Si

2.4.2. Células de filme fino

Aproximadamente 12% da produção mundial correspondem a dispositivos fotovoltaicos de filmes finos. A alta absorção óptica destes materiais, se comparados com o c-Si, permite fabricar células fotovoltaicas bastante finas, nas quais camadas de poucos micrômetros (μm) de diferentes materiais semicondutores são depositadas sucessivamente, por técnicas de produção em larga escala sobre superfícies rígidas ou flexíveis. Desta maneira, o consumo de energia e de materiais semicondutores para produção das células é reduzido, resultando em menores custos. Além disso, as células de filmes finos não ficam restritas aos formatos das células de c-Si (quadriláteros) e surge a possibilidade de serem usadas superfícies amplas e até flexíveis, o que amplia o espectro de aplicações em arquitetura ou em equipamentos portáteis, tais como celulares, calculadoras, relógios etc. Dentre os materiais mais usados estão o telureto de cádmio (CdTe), o disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H).

- *Telureto de Cádmio (CdTe)*: O telureto de cádmio corresponde a um material utilizado na fabricação de células de filmes finos na forma policristalina (Fig. 2.15). É um material que apresenta uma grande potencialidade, uma vez que apresenta um alto índice de absorção óptica e possui uma energia de gap de 1,5 eV, muito próxima da ideal para conversão fotovoltaica (1,45 eV).

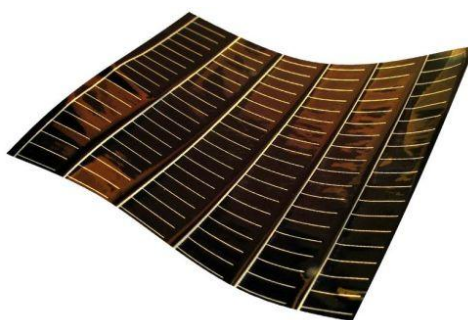


Figura 2.15 – Célula fotovoltaica de telureto de cádmio

Graças ao seu alto nível de absortividade óptica, células de CdTe podem ser fabricadas com eficiências de conversão próximas as das tecnologias tradicionais, mas utilizando apenas 1% a 2% do material requerido para essas tecnologias. Por outro lado, o CdTe possui uma largura de banda estreita, similar ao do silício amorfo e, desta forma, tem sua eficiência de conversão fotovoltaica muito mais suscetível a mudanças do espectro solar. Em outras

palavras, a eficiência de conversão do CdTe, assim como do a-Si varia muito mais do que a eficiência do m-Si e mc-Si ao longo do dia e ao longo do ano.

A configuração mais comum encontrada comercialmente é a do tipo CdTe/CdS onde a camada de sulfeto de cádmio faz o papel do lado N da junção. Eficiências da ordem de 16,5% já foram obtidas em laboratório para estes tipos de células.

- *Disseleneto de Cobre-Índio e Cobre-Índio-Gálio (CIS e CIGS)*: Os materiais CIS e CIGS correspondem a uma forma multicristalina de filmes finos cujas propriedades vêm sendo estudadas desde 1980. Uma propriedade importante do CIGS é que este possui um dos coeficientes de absorção mais altos conhecidos, o que permite absorver cerca de 90% dos fótons incidentes com energia superior a 1 eV para uma espessura de 1 μm a 3 μm . Outro fator favorável a esta tecnologia é a boa resistência ao aquecimento que ela possui, propriedade fundamental para aplicações espaciais (ABUSHAMA, *et al.*, 2004). Em dezembro de 2005 células de CIGS atingiram uma eficiência de 19,5% em laboratório. Em 2006 o *National Renewable Energy Laboratory* publicou um trabalho onde células de CIGS atingiram uma eficiência de 19,9% (ZWEIBEL, 2006). A eficiência máxima atingida para um módulo de CIGS, em 2006, foi de 16,5%. Atualmente tanto módulos de CIS quanto de CIGS são os que possuem as maiores eficiências no mercado dentre as tecnologias de filmes finos. Tal qual o a-Si ou o CdTe estes materiais apresentam uma excelente aparência estética o que possibilita seu uso em telhados e fachadas, constituindo instalações incorporadas à construção. A energia despendida na fabricação de módulos de CIGS é cerca de 50% inferior quando comparada com um módulo de silício cristalino, entretanto esta tecnologia ainda não se encontra largamente difundida visto o seu alto custo de produção. A Fig. 2.16 apresenta um módulo flexível de tecnologia CIGS e um módulo comercial de tecnologia CIS.

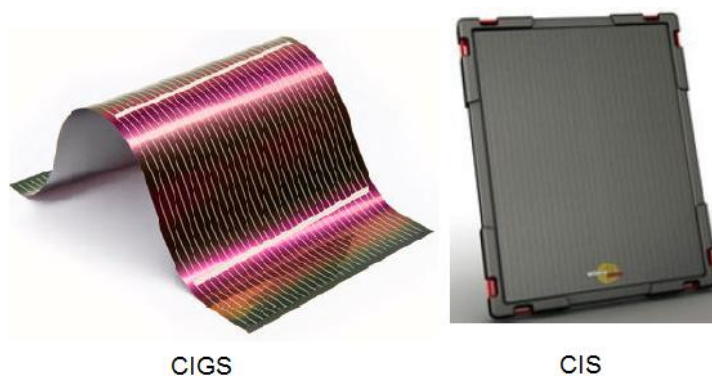


Figura 2.16 – Células Fotovoltaicas de Cobre-Índio e Cobre-Índio-Gálio

A família de semicondutores CIGS pode formar diferentes compostos com diferentes valores de gap, desde 1 eV até 1,7 eV. Isto permite sua utilização em células de multi junção, já que cada camada atua em uma faixa diferente do espectro aumentando significativamente a eficiência da célula. Essas características fazem dessa tecnologia uma grande promessa para o futuro da indústria fotovoltaica.

- *Silício amorfo*: O a-Si:H, silício amorfo hidrogenado, vem sendo usado desde a década de 1980 em células para calculadoras, relógios digitais e outros equipamentos. O material denominado amorfo é aquele que não apresenta estrutura cristalina, mas, ainda assim, preserva suas propriedades de semicondutor.

As primeiras células de a-Si:H apresentavam problemas de estabilidade, que resulta em uma degradação rápida (6 a 12 meses) de seu rendimento, quando expostas à radiação solar. Atualmente, este fenômeno tem sido minimizado pela adoção de células com múltiplas camadas, e alguns fabricantes fornecem garantias similares às daquelas de módulos de silício cristalino. Os melhores módulos fotovoltaicos comerciais de a-Si:H atingem eficiências da ordem de 10% (tripla junção). Desta forma, outra desvantagem destes módulos é o fato de ocuparem maiores áreas e de apresentarem maiores custos de mão de obra e material (cabos, estruturas de fixação) para sua instalação, em comparação com os módulos de c-Si. Por outro lado, o a-Si:H apresenta um menor coeficiente de temperatura do que o c-Si, além de menor perda de eficiência em condições de baixa irradiância. A Fig. 2.17 mostra um exemplo de célula fotovoltaica de silício amorfo hidrogenado comercial.

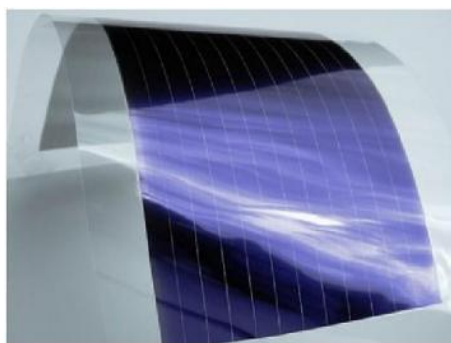


Figura 2.17 – Célula fotovoltaica de silício amorfo hidrogenado

2.4.3. Células multi junção

Estas células foram inicialmente desenvolvidas para aplicações especiais, tais como satélites e exploração do espaço. Mas na atualidade são consideradas como uma alternativa

para reduzir o custo de produção de energia elétrica mediante a aplicação de sistemas ópticos de concentração da radiação solar, os quais são de lentes e/ou espelhos (de baixo custo). Com o aumento da irradiância solar incidente na célula, é possível obter elevadas correntes elétricas. Por esta razão, esta tecnologia é denominada muitas vezes de CPV – *concentrated photovoltaics*.

As células multi junção são fabricadas com semicondutores dos grupos III e V da tabela periódica. Assim, uma célula de tripla junção, por exemplo, de GaAs, GaInP₂ e Ge, terá uma energia de banda de abertura característica (energia do gap) para cada semiconductor, o que faz com que a célula absorva a radiação solar de forma mais eficiente numa determinada faixa do espectro. Os semicondutores são cuidadosamente escolhidos para absorver a maior parte do espectro solar possível, na Fig. 2.18 é possível observar o antes descrito.

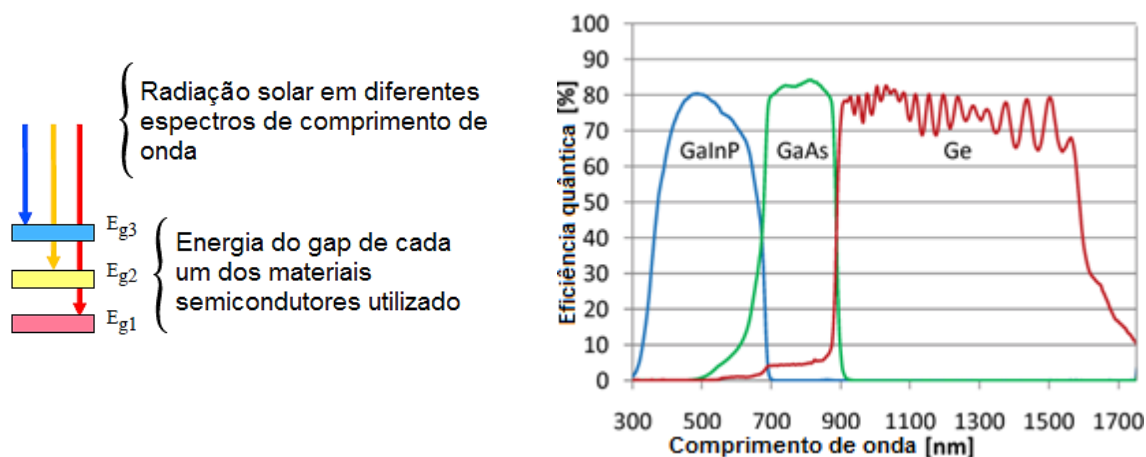


Figura 2.18 – Funcionamento de uma célula multi junção

Células fotovoltaicas multi junção de GaInP/GaAs/GaInNAs e GaInP/GaInAs/Ge, são obtidas por epitaxia em fase vapor de compostos organometálicos (MOCVD – *metalorganic chemical vapour deposition*) ou epitaxia por feixe molecular (MBE – *molecular beam epitaxy*), tecnologias onde as camadas de materiais semicondutores são crescidas de forma extremamente controlada (KARAM, *et al.*, 1999).

O aumento da eficiência destes dispositivos com as mais diversas estruturas continua sendo um tema de pesquisa e desenvolvimento nas universidades e centros de pesquisa (LAW, *et al.*, 2010).

Este tipo de célula pode ser encontrada comercialmente em diferentes configurações, como é mostrado na Fig. 2.19.

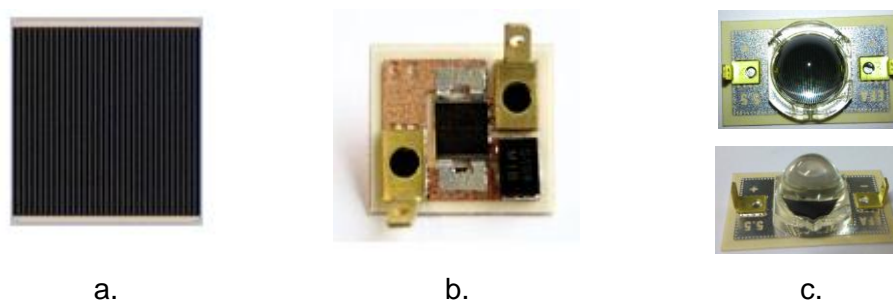


Figura 2.19 – Configurações comerciais para células multi junção: a). Célula MJ b). Célula MJ com conexões e diodo de proteção c). Célula MJ com conexões, diodo de proteção e homogeneizador.

2.4.4. Células de polímeros orgânicos

Células solares de polímero orgânicos são construídas a partir de películas finas (tipicamente 100 nm) de semicondutores orgânicos, tais como polímeros e pequenas moléculas compostas de materiais como polifenileno vinil, o cobre de ftalocianina (pigmento orgânico azul ou verde) e fulerenos de carbono (MAYER, *et al.*, 2007). A eficiência de conversão de energia obtidos até a data utilizando polímeros condutores é baixa comparado com os materiais inorgânicos, com a mais alta eficiência de 6,5% (KIM, *et al.*, 2007). No entanto, essas células poderiam ser benéficas para algumas aplicações onde a flexibilidade mecânica e descartabilidade são importantes.

2.4.5. Células de nanocristais de silício

Estas estruturas normalmente utilizam os mesmos materiais absorventes usados na fabricação de filmes finos, mas são recobertos como um absorvedor extremamente delgado sobre uma matriz de suporte feita de um polímero condutor ou de um óxido de metal mesoporoso tendo uma área de superfície muito elevada para aumentar as reflexões internas (e, conseqüentemente, aumenta a probabilidade de absorção de luz). Usando nanocristais permite desenhar arquiteturas na escala de comprimento de nanômetros (DUBEY, TIWARI e SWAPNIL, 2010).

2.5. Dispositivos de concentração fotovoltaica

Em geral, um concentrador pode ser definido como um elemento de natureza ótica como lentes (refração) ou espelhos (reflexão), que tem como objetivo ou função principal

reencaminhar os raios solares que atingem numa grande área (área do concentrador), para um objeto de pequena área (área da célula fotovoltaica). Assim a concentração ótica (X_o), é definida mediante a Eq.(2.3), onde A é a área de cada elemento.

Embora o fator de concentração seja adimensional, em muitas ocasiões outorgasse-lhe a unidade “sol” ($1000\text{W}/\text{m}^2$).

$$X_o = \frac{A_{\text{concentrador}}}{A_{\text{célula}}} \quad (2.3)$$

Os concentradores fotovoltaicos, podem ser classificados dependendo do nível de concentração que são capazes de fornecer para a célula fotovoltaica, como segue.

2.5.1. Baixa concentração

Os sistemas de baixa concentração normalmente são formados por espelhos planos arranjados com células monojunção de silício cristalino (Fig. 2.20). O nível de concentração deste tipo de sistema está entre 2 e 100 sóis (WS ENERGIA, 2008).

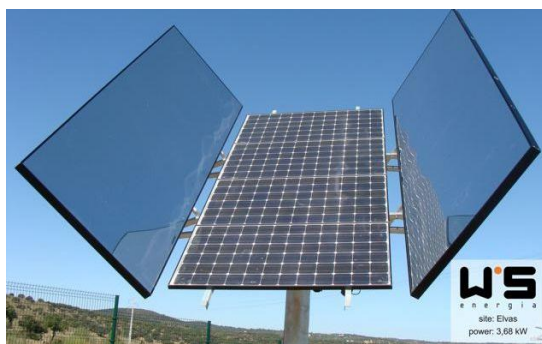


Figura 2.20 – Concentrador de espelho plano (baixa concentração)

A grande vantagem dos sistemas de baixa concentração sobre outros, é que não necessita de seguimento solar, o qual reduz o custo total do sistema. Porém, incentiva a aparição de pontos quentes nas células, que a longo prazo deteriora a vida útil das mesmas, e a curto prazo faz diminuir a eficiência global do sistema.

2.5.2. Concentração média

Pertencem a esta categoria todos os dispositivos que podem fornecer concentrações maiores a 100 sóis e menores que 300 sóis. Entre eles estão os espelhos parabólico e os

espelhos parabólicos compostos (CPC), como se mostrado na Fig. 2.21. São usados em conjunto com células fotovoltaicas de alta eficiência (multi junção).

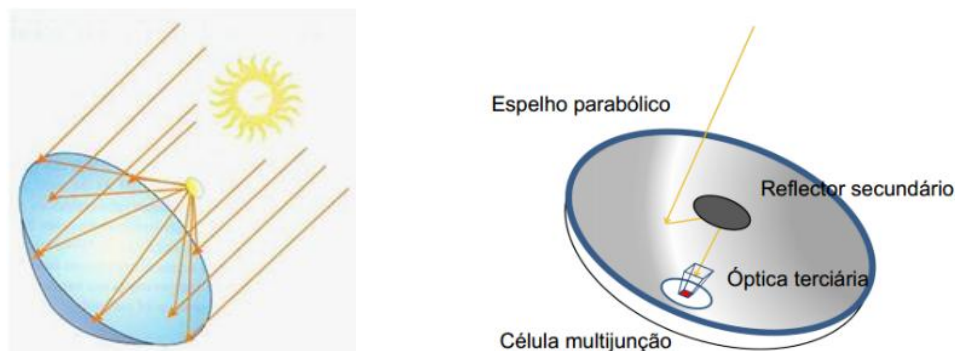


Figura 2.21 – Concentração media: Espelho parabólico e espelho parabólico composto

Precisam de uma estrutura de seguimento solar de dois eixos, e da incorporação de um dispositivo de dissipador de calor (geralmente passivo), a fim de manter uma boa produção de energia ao longo do dia.

2.5.3. Alta concentração

Estão compreendidos na faixa de concentração de 300 sóis até concentrações que podem chegar a mais de 1000 sóis. Comumente utilizam lentes de Fresnel, como o ilustrado na Fig. 2.22, não obstante, também podem ser utilizados espelhos parabólicos composto de *design* otimizado.

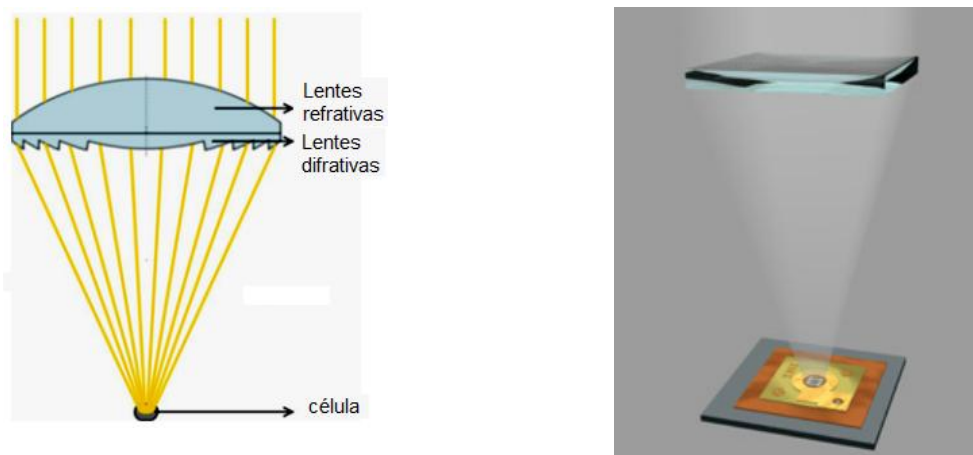


Figura 2.22 – Concentração Alta: Lentes de Fresnel

Embora os sistemas de alta concentração apresentem os mesmos inconvenientes dos sistemas de média concentração devido à necessidade de seguimento solar e arrefecimento (passivo e ativo) o custo extra é amortecido pela grande potência (energia) que pode gerar.

2.6. Módulos ou painéis fotovoltaicos

A máxima tensão gerada por uma célula fotovoltaica, em condições normais de operação encontra-se entre 0,7 V e 3 V (dependendo do tipo de célula). Como pouquíssimos aparelhos funcionam com uma alimentação dessa ordem de tensão, estima-se ser necessário associar células em série a fim de aumentar a tensão fornecida pelo dispositivo fotovoltaico.

Em termos de corrente elétrica, uma célula tem a capacidade de fornecer entre 37 e 500 mA/cm² para uma radiação global de 1000 W/m² equivalente a um espectro AM 1,5. Para obter uma corrente mais elevada em um dispositivo fotovoltaico, pode-se associar células em paralelo. Tais associações de células são chamadas de módulos fotovoltaicos (BÜHLER, 2011).

De acordo com a Fig. 2.23, considerando uma associação em série de N_s células idênticas, a tensão final é igual a tensão de cada célula multiplicada pelo número de células, enquanto a corrente é a mesma fornecida por uma célula da associação. Se as células são ligadas em paralelo (N_p) a corrente de cada célula é somada, mas a tensão se mantém igual.

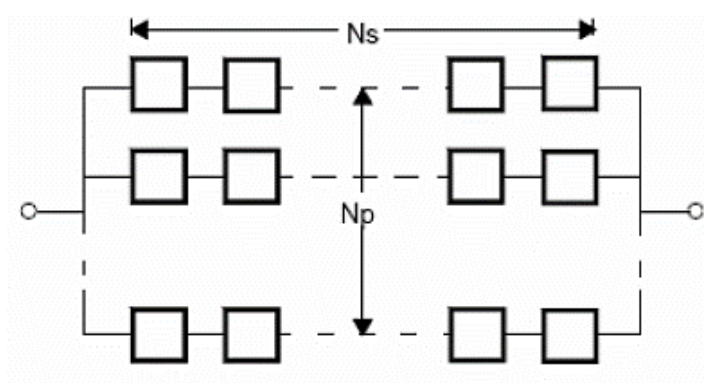


Figura 2.23 – Esquema de conexões das células em um módulo fotovoltaico

Na prática, um módulo nunca terá células idênticas, e desta forma o que se pode afirmar é que para um módulo com células conectadas em série, a tensão de circuito aberto do

módulo será igual a soma das tensões de circuito aberto de cada célula. A corrente do módulo será igual a corrente da célula com a menor corrente.

No caso de módulos de filmes finos, estes também são compostos por células, normalmente apresentando a forma de linhas que atravessam o módulo horizontalmente ou verticalmente.

2.7. Características operacionais dos dispositivos fotovoltaicos

As características de um dispositivo fotovoltaico (célula ou módulo), são uma série de tópicos de natureza elétrica, mecânica e ótica, porém, é a partir da análise da curva característica I-V, mostrada na Fig. 2.24, que são obtidos os parâmetros que definem o comportamento da célula. Além disso, a curva I-V permite comparar qualitativamente diferentes tipos de módulos, pois é esperado que um módulo que apresente melhor rendimento para determinadas condições, continue sendo melhor quando essas condições variem em campo (KNAUPP, 1991).

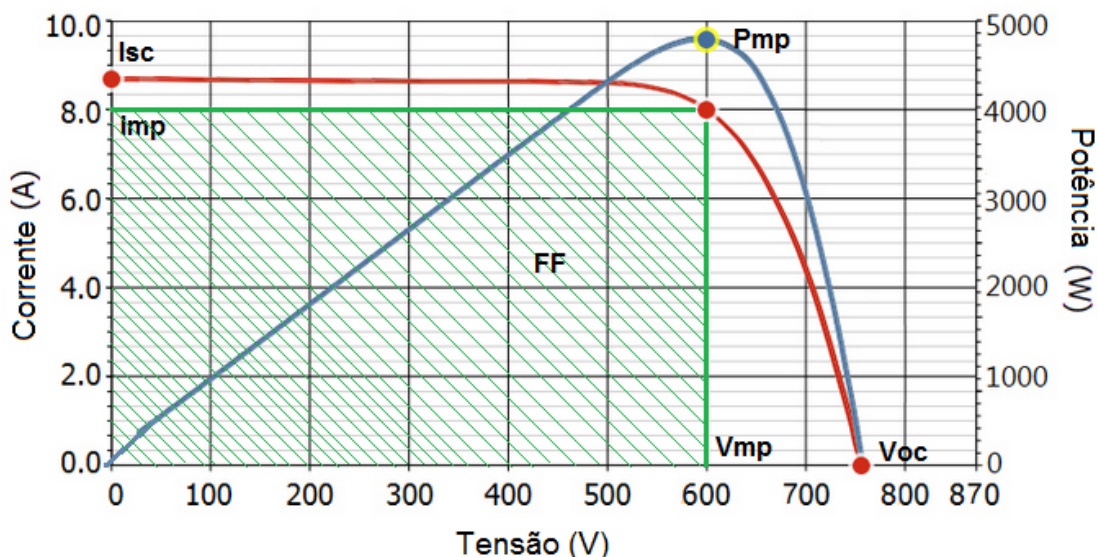


Figura 2.24 – Curva característica de um módulo fotovoltaico

A curva característica de um dispositivo fotovoltaico consiste na representação matemática do comportamento da corrente elétrica e da potência gerada em função da tensão. A fim de realizar uma comparação objetiva das características entre diferentes dispositivos, estabeleceu-se que os testes de caracterização só poderiam ser realizados sob

condições de radiação incidente, temperatura do dispositivo e massa de ar espectral padrões. Assim a norma ASTM E-1036, designa esses valores como 1000 W/m², 25 °C e AM 1,5 respetivamente para as variáveis antes mencionadas.

Abaixo, são descritos os termos mostrados na Fig. 2.24.

- *Corrente de curto-circuito (I_{sc})*: Corrente que o dispositivo fotovoltaico fornece quando seus terminais são interligados por um conector com resistência elétrica idealmente nula, ou seja, é a corrente equivalente a uma tensão igual a zero.

- *Tensão de circuito aberto (V_{oc})*: Tensão que surge nos terminais de um dispositivo fotovoltaico quando entre esses terminais existe uma resistência elétrica idealmente infinita, ou seja, é a tensão equivalente a uma corrente elétrica igual a zero.

- *Ponto de máxima potência (P_{mp})*: É a máxima potência que o dispositivo fotovoltaico é capaz de fornecer sob uma determinada condição de irradiância e temperatura, os pontos de potência são obtidos simplesmente multiplicando cada valor de tensão pelo correspondente valor de corrente.

- *Corrente de máxima potência (I_{mp})*: É a corrente elétrica que o dispositivo fornece no ponto de máxima potência.

- *Tensão de máxima potência (V_{mp})*: É a tensão que surge nos terminais do dispositivo no ponto de máxima potência.

- *Fator de forma ou fill fator (FF)*: É um indicativo importante da qualidade das propriedades elétricas do módulo. Quanto maior for o valor de FF, melhor serão as características elétricas do dispositivo. Considerando uma temperatura de aproximadamente 25°C, o máximo valor teórico que uma célula de c-Si pode ter para FF é de 0,83, enquanto que para uma célula de GaAs este valor é de 0,89 (HONSBURG e BOWDEN). O fator de forma é definido pela Eq.(2.4).

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.4)$$

Eficiência (η): é definida como a capacidade de conversão de energia solar incidente em energia elétrica aproveitável, conforme Eq.(2.5) onde G é a radiação incidente e A é a área efetiva do modulo. É um dos parâmetros mais importantes dos dispositivos fotovoltaicos.

$$\eta = \frac{P_{mp}}{G \cdot A} \quad (2.5)$$

Devido que a eficiência depende diretamente da potência máxima gerada, todos os fatores que influenciam neste elemento, afetam também a eficiência.

A corrente elétrica gerada a partir da radiação incidente na junção PN é linearmente proporcional à intensidade da mesma, uma vez que com um maior número de fótons incidentes (com energia do gap adequada), maior o número de pares elétrons-lacunas gerados.

A seguir será visto a influência da intensidade de radiação e da temperatura da célula, no desempenho dos dispositivos fotovoltaicos.

2.7.1. Influência da radiação incidente

Na Fig. 2.25 pode-se apreciar que o aumento na corrente é significativamente maior que na tensão, no próximo capítulo será explicado este fenômeno.

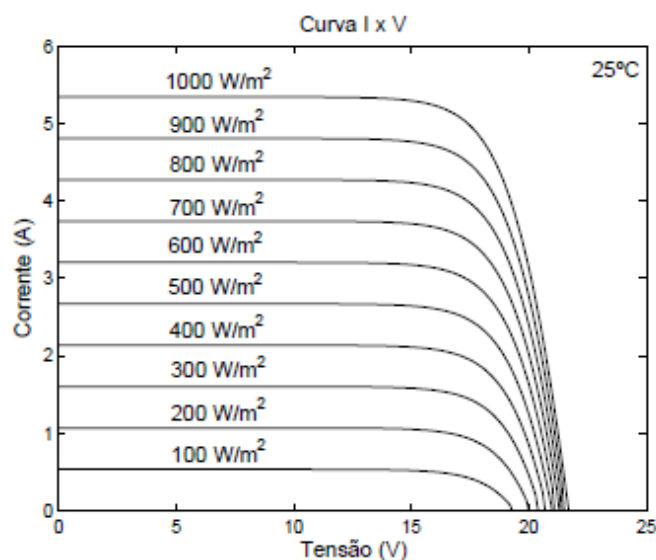


Figura 2.25 – Variação da curva característica de um modulo fotovoltaico em função da radiação incidente

Devido que o aumento da intensidade na radiação incidente, afeta positivamente a corrente e a tensão, é esperado um acréscimo da potência gerada no dispositivo.

2.7.2. Influência da Temperatura

Com o incremento da temperatura na célula, a corrente elétrica de curto-circuito, aumenta ligeiramente segundo o coeficiente (α).

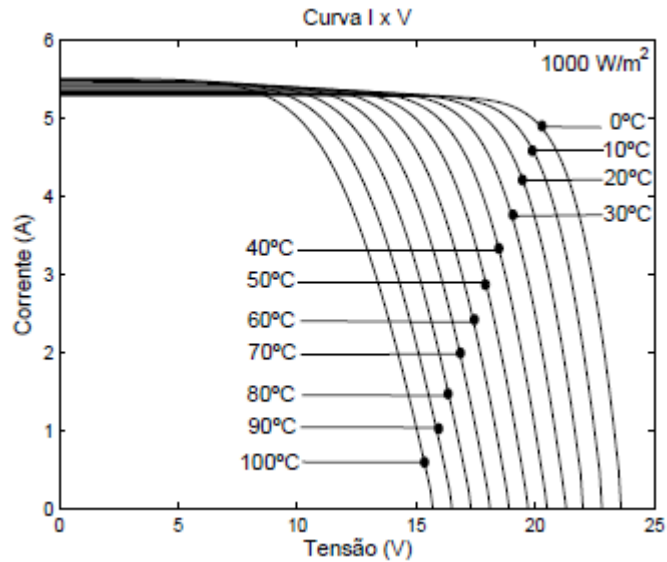


Figura 2.26 – Variação da curva característica de um módulo fotovoltaico em função da temperatura da célula

O coeficiente da variação da corrente de curto-circuito com a temperatura é definido pela Eq.(2.6). Este aumento de corrente é devido a uma diminuição da energia do gap do material, expressa pela Eq.(2.2).

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (2.6)$$

A tensão, por sua vez, apresenta uma queda linear com o aumento da temperatura. O coeficiente da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura (β) pode ser definido pela Eq.(2.7).

$$\beta = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (2.7)$$

Esta diminuição da tensão ocorre principalmente devido ao incremento da corrente de saturação reversa, originada pelos portadores de carga minoritários criados por excitação

térmica (BÜHLER, 2011). Os coeficientes de variação da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto, comumente são fornecidos pelo fabricante.

Entretanto, de forma contrária ao que acontece com a radiação, quando a temperatura do dispositivo sob análise aumenta, é previsto que o mesmo experimente uma queda na potência gerada, em razão do ganho na corrente ser menor que a diminuição na tensão.

2.7.3. Influência das ligações entre células

O modo em que são arranjadas (serie ou paralelo) as células fotovoltaicas para conformar os módulos, é outra das variáveis que incidem na curva característica I-V, como pode ser comprovado na Fig. 2.27, onde são mostradas diferentes configurações em que podem ser ligadas as 36 células que conformam um modulo fotovoltaico.

Embora que a forma das ligações entre as células fotovoltaicas, aparentemente não provoque mudanças na potência gerada do módulo, incide levemente no fator de forma.

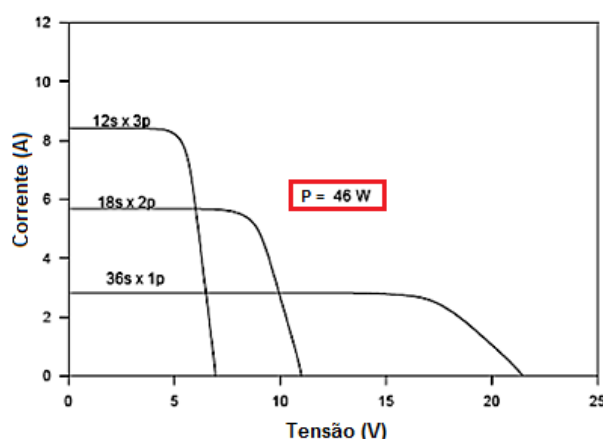


Figura 2.27 – Curva característica I-V de um modulo fotovoltaico para diferentes ligações (serie-paralelo) de células solares.

2.8. Componentes de um sistema de energia fotovoltaica

Mesmo que as células e módulos fotovoltaicos sejam o “núcleo” de um sistema de energia solar, existem outros elementos sem os quais não seria possível o aproveitamento da mesma. A seguir, são descritos os principais.

2.8.1. Conversores de energia elétrica

Dado que a potência gerada por um dispositivo fotovoltaico depende diretamente das condições ambientais do local (variáveis sem controle), é previsto que ela possa mudar no decorrer do dia. Porém, quase todos os aparelhos que funcionam com energia elétrica têm limitações nos níveis de corrente e tensão que conseguem suportar. Assim, é importante adequar a potência elétrica disponível de acordo com as necessidades de potência da carga, motivo pelo qual são utilizados os conversores de energia elétrica.

Os conversores são dispositivos que trabalham com abertura e fechamento de chaves semicondutoras de potência para elevar ou abaixar os níveis de tensão, além de transformar energia de entrada de alternada para contínua, ou contínua em alternada com amplitude e frequência desejáveis (HASHID, 1999). Nos sistemas fotovoltaicos são usados basicamente dois tipos de conversores estáticos: conversor estático CC/CC e o conversor estático CC/CA.

O controle de abertura e fechamento da chave do conversor geralmente é feito por Modulação por Largura de Pulso (MLP), também chamado de PWM (*Pulse Width Modulation*), que consiste na comparação entre um sinal de tensão de baixa frequência (sinal de referência) e outro de alta frequência (sinal de portadora), que resulta em um sinal alternado com frequência fixa e largura de pulso variável.

- *Conversor CC/CC*: Esse tipo de conversor, é comumente utilizado em sistemas fotovoltaicos que possuem baterias, mas também pode ser utilizado diretamente conectado à carga. Existem três categorias desses dispositivos dependendo da tensão de saída: abaixadores, elevadores e abaixadores-elevadores. O conversor CC-CC tipo elevador é um dos mais utilizados para aplicações fotovoltaicas.

- *Conversor CC/CA*: Quando são utilizadas cargas alimentadas em corrente alternada ou são desenvolvidas aplicações de conexão à rede, é necessário o uso de um Conversor CC/CA também chamado de ondulator.

2.8.2. Dispositivos de armazenamento de energia

Estes dispositivos são usados principalmente em sistemas isolados à rede (autônomos), mediante uma bateria de acumuladores de elementos eletroquímicos como forma de reservatório de energia, a fim de fornecer-la quando não existe disponibilidade solar e para possibilitar a resposta a diferentes perfis de consumo. No fundo a bateria de acumuladores é utilizada para situações em que o elemento gerador FV não consegue responder às necessidades de consumo da instalação.

As baterias de acumuladores eletroquímicos armazenam energia na forma química. A maioria dos sistemas utiliza baterias de chumbo-ácido de descarga profunda (SEELING-HOCHMUTH, 1998). Estas baterias têm a melhor relação preço-eficiência, e podem assegurar correntes de carga tanto elevadas como reduzidas com uma boa eficiência (COMISSÃO EUROPEIA, 2004).

2.8.3. Controladores de carga

Nas aplicações que utilizam dispositivos de armazenamento de energia, os controladores de carga servem para evitar a descarga profunda e sobrecarga das baterias, nos períodos de pouca radiação e nos períodos de radiação intensa respectivamente. Em consequência, pode-se afirmar que os controladores de carga protegem a bateria e aumentam a sua vida útil (NETO, *et al.*, 2008).

Estes controladores são formados basicamente por dois circuitos: um de controle e outro de comutação, implementados mediante um conversor CC/CC que fornece a tensão exigida pelas baterias.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo descreve os principais fenômenos referentes ao processo de geração de energia fotovoltaica, por intermédio de modelos matemáticos, tendo como foco de interesse os dispositivos fotovoltaicos de silício cristalino e os de múltipla-junção.

São apresentadas as curvas características, concomitantemente com as expressões matemáticas que as representam, descrevendo em profundidade alguns dos parâmetros (além daqueles mencionados anteriormente) que influenciam o desempenho da mesma.

Assim, são especificados os dados dos dispositivos fotovoltaicos que serão utilizados ao longo das simulações a serem realizadas (estudos de caso).

Finalmente, são também expostas e analisadas, detalhadamente, algumas das metodologias mais amplamente conhecidas para a obtenção dos parâmetros que modelam as células fotovoltaicas, a fim de justificar a aplicação das mesmas no presente trabalho.

3.1. Modelagem das células fotovoltaicas

3.1.1. Modelo Ideal

Como o próprio nome indica, o modelo ideal considera apenas os fenômenos de condução eletrônica na zona de depleção do material semiconductor, sem levar em conta nenhum tipo de perda que possa acontecer.

A Fig. 3.1 representa o circuito elétrico do modelo ideal de uma célula fotovoltaica, no qual, a corrente elétrica fotogerada (I_{ph}) a partir da radiação incidente sobre a célula é

representada por uma fonte de corrente, na qual um diodo faz o papel da junção PN, responsável pela corrente de saturação reversa e pelo fator de idealidade.

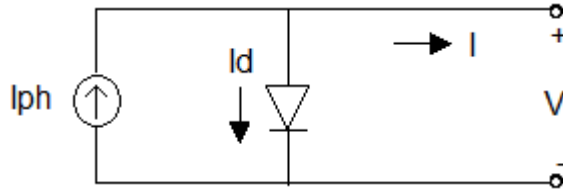


Figura 3.1 – Circuito elétrico do modelo ideal de uma célula fotovoltaica

Aplicando a primeira lei de Kirchhoff (lei dos nós) no circuito da Fig. 3.1, extrai-se a Eq.(3.1) que mostra a corrente da célula em função da tensão, onde o segundo termo à direita representa a corrente do diodo dada pela equação de Shockley

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{n \cdot V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

em que, I_0 é a corrente de saturação reversa da célula, n é o fator de idealidade da junção e V_{th} representa a diferença de potencial ganho devido à temperatura, sendo este termo descrito mediante a Eq.(3.2), onde k é a constante de Boltzmann, T_c é a temperatura da célula e q é a carga elementar do elétron.

$$V_{th} = \frac{k \cdot T_c}{q} \quad (3.2)$$

Como a relação entre a corrente e tensão é dada por uma função exponencial, a tensão sofre um aumento logarítmico com a radiação, segundo mostrado na Fig.2.25.

A seguir, serão descritos os parâmetros pertinentes à representação do diodo (n e I_0) no modelo ideal da célula fotovoltaica.

Para compreender qual é o papel que desempenha o fator de idealidade do diodo dentro do modelo, inicialmente é necessário esclarecer que o modelo ideal assume que toda a recombinação ocorre via banda a banda (ou seja, não dentro da junção) e o fator de idealidade do diodo é uma medida de quão perto está o material de ter esse comportamento (HONSBURG e BOWDEN). Portanto, é possível afirmar que um semicondutor é mais “ideal” quanto mais próximo a unidade seja o fator de idealidade (n) do mesmo.

Na Fig. 3.2 pode-se verificar a influência que tem o fator de idealidade no desempenho de uma célula fotovoltaica, afetando não só o fator de forma da curva I-V, mas também o

ponto de potência máxima. Consequentemente, este parâmetro é relacionado ao ponto de inflexão da curva característica.

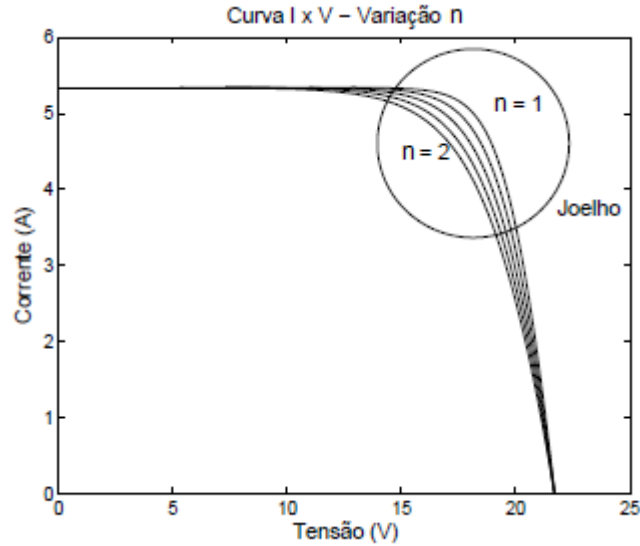


Figura 3.2 – Influência do fator de idealidade na curva característica I-V.

Este parâmetro não é fácil de se calcular, uma vez que geralmente a forma em que se produz o fenômeno de recombinação de portadores numa célula fotovoltaica varia dependendo da temperatura e radiação. A Eq.(3.3) mostra uma expressão que permite estimar o valor de este parâmetro.

$$n = \frac{V_{mp} - V_{oc}}{V_{th} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right)} \quad (3.3)$$

Por outro lado, embora a corrente de saturação reversa também esteja relacionada com o fenômeno de recombinação dos portadores de carga minoritários produto da excitação térmica, é acertado definir este termo como a fuga de corrente na junção em ausência de iluminação. A relação entre a corrente de saturação reversa e a temperatura da célula é dada pela Eq.(3.4).

$$I_0(T_c) = I_{0r} \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^{3/n} \cdot \exp \left[\frac{E_g}{n \cdot V_{th}} \cdot \left(\frac{T_c}{T_r} - 1 \right) \right] \quad (3.4)$$

onde, T_r é a temperatura de referência ou padrão e I_{0r} é a corrente de saturação reversa nessa temperatura e E_g é a energia do gap definida pela Eq.(2.2).

- *Análise em curto circuito*

Supondo que o circuito do modelo ideal da célula fotovoltaica encontra-se em curto circuitado na saída (Fig. 3.3), a tensão nos terminais do mesmo será nula. Logo, substituindo o valor da tensão na Eq.(3.1), temos que a corrente de curto circuito será igual à corrente fotogerada, de acordo com a Eq.(3.5).

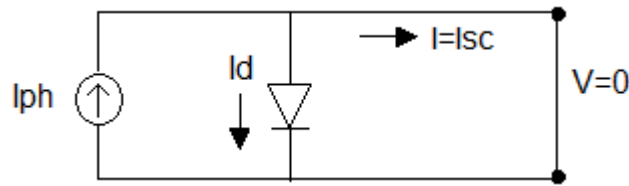


Figura 3.3 - Condição de curto circuito para o modelo ideal de uma célula fotovoltaica

$$I_{ph} = I_{sc} \quad (3.5)$$

Entretanto, a corrente de curto circuito varia com a temperatura e com a intensidade de radiação incidente na célula (G), conforme a Eq.(3.6), onde G_r é a radiação solar padrão.

$$I_{ph}(T_c, G) = I_{sc}(T_c, G) = [I_{scr} + \alpha(T_c - T_r)] \cdot \frac{G}{G_r} \quad (3.6)$$

- *Análise em circuito aberto*

De maneira inversa, agora é realizada a análise, supondo que o modelo ideal está em circuito aberto (Fig. 3.4), não existiria corrente nos contatos de saída da célula, portanto a tensão seria igual à máxima tensão possível (tensão de circuito aberto).

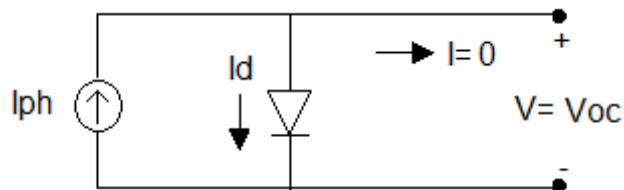


Figura 3.4 - Condição de circuito aberto para o modelo ideal de uma célula fotovoltaica

Desta forma, para encontrar uma expressão que permita calcular o valor da tensão de circuito aberto, o valor da corrente deve ser substituído na Eq.(3.1) como segue:

$$V_{OC} = n \cdot V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (3.7)$$

Normalmente, os dados de corrente de curto circuito e tensão circuito aberto, sob condições padrão são fornecidos pelos fabricantes. Portanto, pode-se conhecer o valor da corrente de saturação reversa de referência, isolando esse termo da Eq.(3.7), como é mostrado a seguir.

$$I_{0r} = \frac{I_{phr}}{\exp\left(\frac{V_{OCr}}{n \cdot V_{th}}\right) - 1} \quad (3.8)$$

De forma semelhante ao que acontece com a corrente de curto-circuito, a tensão de circuito aberto também varia de acordo com a irradiância e a temperatura. Esta variação é dada pela Eq.(3.9).

$$V_{OC}(T_C, G) = V_{OCr} + \beta(T_C - T_r) + \ln\left(\frac{G}{G_r}\right) \quad (3.9)$$

3.1.2. Modelo de quatro parâmetros

Este modelo é apresentado na Fig. 3.5. É adicionada uma resistência em série, que representa a queda de tensão devido à resistência dos materiais da célula e dos contatos metálicos.

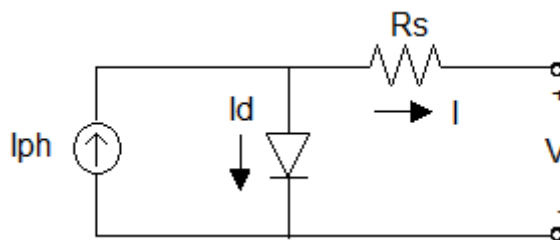


Figura 3.5 - Circuito elétrico do modelo de quatro parâmetros para uma célula fotovoltaica

Realizando a mesma análise do circuito equivalente para modelo ideal é obtida a Eq.(3.10). A resistência em série também depende da temperatura (GOW e MANNING, 1999) como demonstra a Eq.(3.11), sendo, R_{sr} a resistência em série para a temperatura de referência e δ é o coeficiente de variação por temperatura da mesma.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (3.10)$$

$$R_s(T_c) = R_{sr} \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^\delta \quad (3.11)$$

A resistência em série é outro dos fatores que afeta à curva característica I-V, incidindo principalmente na inclinação da mesma quando a tensão tende a de circuito aberto V_{oc} , conforme a Fig. 3.6.

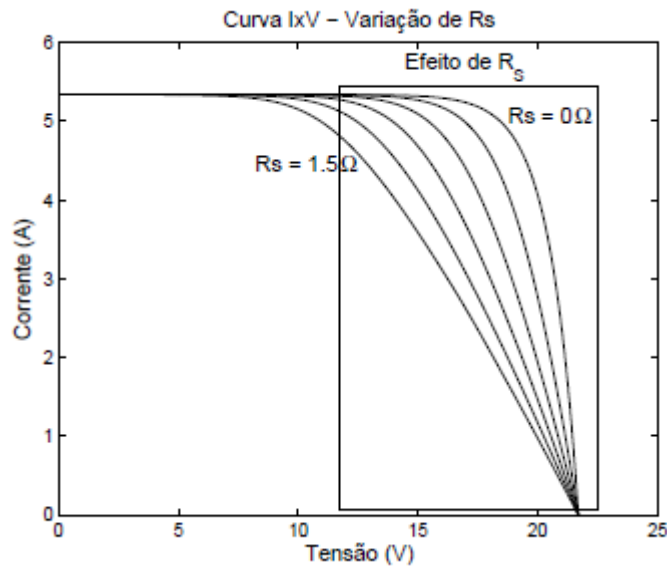


Figura 3.6 - Influência da resistência em série na curva característica I-V

3.1.3. Modelo de cinco parâmetros

A fim de representar as perdas devidas às correntes parasitas, neste modelo é inserida uma resistência em paralelo ou resistência *shunt*, como ilustra a Fig.3.7. A qual é descrita conforme a Eq.(3.12).

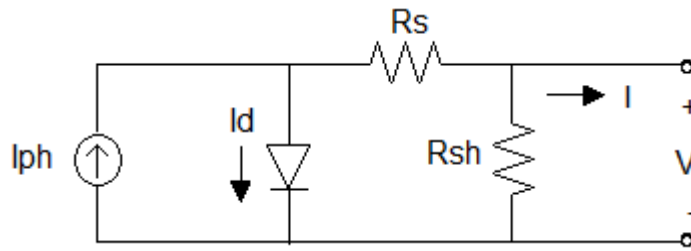


Figura 3.7 - Circuito elétrico do modelo de quatro parâmetros para uma célula fotovoltaica

Embora a resistência em paralelo também exerça influência na curva característica I-V, ao contrário do que acontece com a resistência em série, ela está relacionada com a inclinação quando a tensão tende a zero, como ilustra a Fig. 3.8.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.12)$$

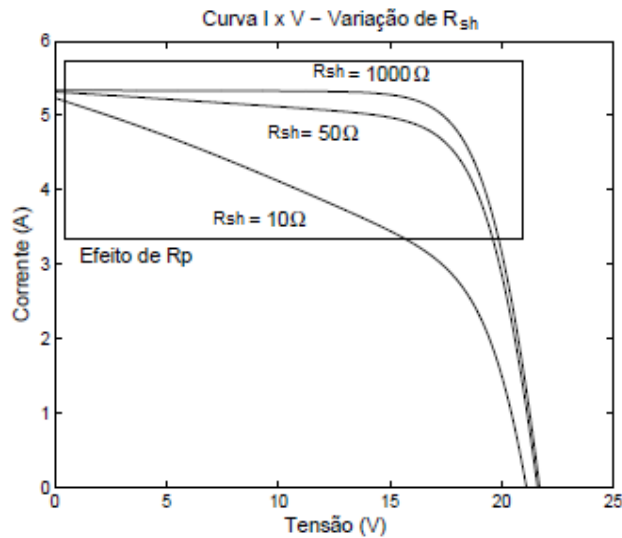


Figura 3.8 - Influência da resistência em paralelo na curva característica I-V

A partir das Fig. 3.6 e 3.8, pode-se afirmar que uma célula fotovoltaica melhora seu desempenho se o valor da resistência em série tende a zero e o valor da resistência em paralelo tende a infinito.

3.1.4. Modelo de dois diodos

No modelo de dois diodos mostrado na Fig. 3.9, um dos diodos representa o fenômeno de difusão e o outro o fenômeno de recombinação de portadores minoritários na região de

depleção. A análise deste circuito é expressa pela Eq.(3.13), onde a principal dificuldade baseia-se no fato que devem ser calculadas uma corrente, e um fator de idealidade a mais, que nos modelos anteriores.

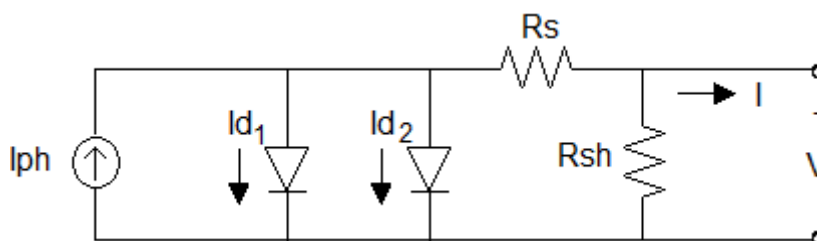


Figura 3.9 - Circuito elétrico do modelo de dois diodos para uma célula fotovoltaica

A obtenção dos parâmetros adicionais encontrados na Eq. (3.13), não é uma tarefa fácil do ponto de vista experimental, ainda mais considerando que os fenômenos que modelam estes novos parâmetros são de caráter molecular.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_1 \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_2 \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.13)$$

Num trabalho recente (TEIXEIRA, 2010), é demonstrado mediante a simulação de um modulo fotovoltaico de silício cristalino, que os resultados obtidos com este modelo não apresentam erro significativo quando comparado com o modelo de cinco parâmetros, como se observa na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Comparação Modelo de dois diodos vs. Modelo de cinco parâmetros

Tópicos de avaliação	Modelo de Dois diodos	Modelo de Cinco Parâmetros	
	Resultado	Resultado	Erro (%)
I_{sc} (A)	3.31	3.31	0
V_{oc} (V)	21.7	21.7	0
P_{mp} (W)	51.08	51.09	0.03
I_{mp} (A)	3.02	3.03	0.03
V_{mp} (V)	16.88	16.88	0
FF	0.71	0.72	0.03

Fonte: (TEIXEIRA, 2010)

3.2. Modelagem de células fotovoltaicas multi junção

Uma célula multi junção pode ser encarada como um arranjo de células de junção única conectadas em série. De acordo com isso, é apenas considerada uma célula de tripla junção (comercialmente disponíveis em aplicações terrestres), o circuito elétrico que a representa é mostrado na Fig. 3.10.

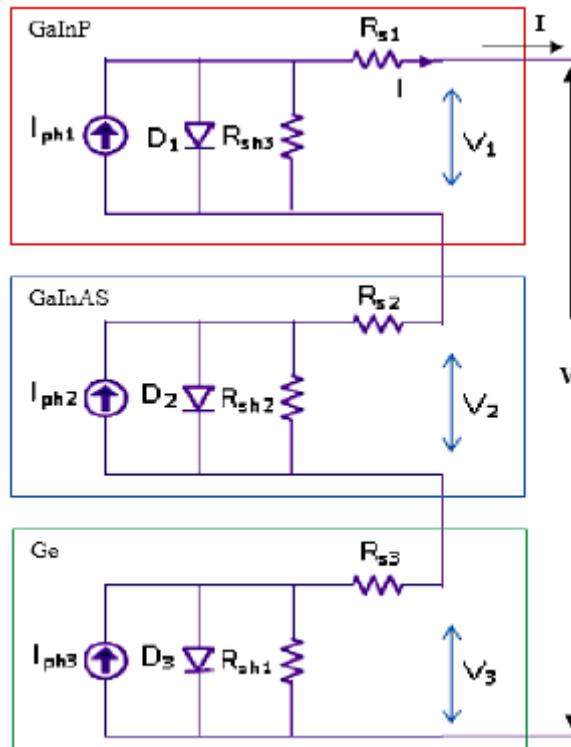


Figura 3.10 - Circuito elétrico do modelo de cinco parâmetros para uma célula fotovoltaica tripla junção

Como é possível apreciar na Fig. 3.10, para modelar a célula multi junção neste caso, é aplicado o modelo de cinco parâmetros a cada uma das camadas de material semiconductor que a conformam. Assim, analogamente ao feito na Eq.(3.12), a Eq. (3.14) modela a corrente de saída da subcélula i ,

$$I^i = I_{ph}^i - I_0^i \left[\exp \left(\frac{V^i + I^i \cdot R_s^i}{n^i \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V^i + I^i \cdot R_s^i}{R_{sh}^i} \quad (3.14)$$

Não obstante, o que verdadeiramente interessa, é conhecer a corrente e a tensão da célula multi junção como um único elemento. Logo, por se tratar de um arranjo em série a corrente total da célula multi junção será limitada pela subcélula que gere a mínima corrente como se indica na Eq.(3.15). De maneira oposta, a tensão total da célula multi junção é dada pela soma das tensões de cada subcélula como mostra a Eq.(3.16).

$$I = \min(I^i) \quad (3.15)$$

$$V = \sum V^i \quad (3.16)$$

Embora este modelo considere as variações devido à temperatura e a radiação (concentração), segundo (FAINE, et al., 1991), não é suficiente para modelar de maneira fiel o comportamento das células fotovoltaicas multi junção. Isto é devido ao fato que este tipo de células estão fortemente relacionadas com o espectro incidente (em maior medida que as células de junção única).

Assim, ao contrário dos modelos vistos anteriormente, a maioria dos modelos especializados para células de junção múltipla, introduzem um novo termo a fim de ressaltar a dependência das características das células multi junção com o espectro ao qual estão expostas.

3.2.1. Modelo de Geoffrey S. Kinsey, et al.

No trabalho de (KINSEY, et al., 2008), foi apresentado uma análise de duas células de tripla junção sob diferentes condições de radiação e temperatura, onde cada subcélula da célula multi junção foi estudada de maneira individual, mas as expressões são dadas em sentido geral.

Este modelo é baseado no circuito ideal da célula fotovoltaica cuja expressão matemática é mostrada na Eq.(3.1). Por outro lado, o termo da concentração foi definido como a relação entre a corrente de curto circuito para uma determinada radiação e a corrente de curto circuito na radiação padrão, de acordo com a Eq.(3.17).

$$X = \frac{I_{sc}(G)}{I_{sc}(G_r)} \quad (3.17)$$

Desta forma se define que a tensão de circuito aberto apresenta mudanças com a variação de concentração, conforme Eq.(3.18).

$$V_{oc}(X) = m \cdot V_{th} \cdot \ln(X) + V_{oc}(X=1) \quad (3.18)$$

Diferente ao estabelecido na Eq.(3.4), o autor descreve a relação entre a corrente de saturação reversa e a temperatura como:

$$I_0(T_c) = T_c^{\left(3 + \frac{\gamma}{2}\right)} \cdot \exp\left[-\frac{E_g(T_c)}{k T_c}\right] \quad (3.19)$$

onde γ é o termo de terceira ordem de um ajuste polinomial da razão entre o coeficiente de difusão de portadores minoritários e a temperatura. Por sua vez, a energia do gap (E_g) foi definida em função da temperatura mediante a Eq.(2.2), e desta forma a Eq.(3.20) apresenta derivada parcial deste termo em relação à temperatura.

$$\frac{\partial E_g}{\partial T} = -\frac{2aT}{T+b} + \frac{aT^2}{(T+b)^2} \quad (3.20)$$

Entretanto, a fim de conhecer a relação da tensão de circuito aberto com a temperatura, a Eq.(3.19) que modela a corrente de saturação reversa é substituída dentro da Eq.(3.7), e posteriormente derivada, como se mostra a continuação:

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = -\frac{1}{T} \left[\frac{n}{q} \cdot E_g - V_{oc} + n \cdot V_{th} \cdot \left(3 + \frac{\gamma}{2}\right) \right] + n \cdot V_{th} \cdot \frac{1}{I_{sc}} \cdot \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} + \frac{n}{q} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial T} \quad (3.21)$$

A Eq.(3.21) é uma expressão que modela o comportamento de uma célula fotovoltaica multi junção, porém a implementação da mesma é um pouco mais complexa que a dos modelos anteriores, devido à determinação da maior parte das constantes envolvidas (a , b , γ), experimental ou numericamente. Entretanto, estas constantes são encontradas na literatura tabeladas para os materiais semicondutores puros (c-Si), mas não para os compostos, como acontece com as células multi junção.

No trabalho de (KINSEY, *et al.*, 2008) estas constantes são encaradas como parâmetros de ajuste, visto que possuíam os dados experimentais das características da célula, caso contrário deste estudo. Consequentemente, este modelo será considerado somente a título

de ilustração, já que muitos dos conceitos que se estabelecem nos próximos modelos desprendem-se do presente modelo. Porém, não será implementado.

3.2.2. Modelo de Domínguez et al.

Ao contrário do modelo anterior, o modelo de (DOMÍNGUEZ, et al., 2010) foi baseado no modelo de quatro parâmetros da Eq.(3.10). No entanto a corrente de saturação reversa como função da temperatura deve ser redefinida como indicado na Eq.(3.22), onde B é uma constante que depende do material semiconductor e da qualidade do mesmo.

$$I_0(T_c) = B \cdot T_c^{\gamma} \cdot \exp\left(-\frac{E_g(T_c)}{kT_c}\right) \quad (3.22)$$

Neste modelo, também é utilizado um termo que representa a variação da radiação, tal como na Eq.(3.17), só que neste caso a radiação de referência não precisa ser a intensidade de radiação padrão (estabelecida pela norma) e sim qualquer condição de radiação na qual sejam conhecidas as propriedades da célula multi junção, já que o principal objetivo deste modelo é permitir transladar as características da célula multi junção de uma condição ambiental para outra.

Consequentemente, as expressões que descrevem as características I-V da célula para uma condição desejada (*out*), em função das características sob uma condição conhecida (*in*), são dadas pela Eq.(3.23) e Eq.(3.24).

$$I_{out} = X \cdot I_{in} \quad (3.23)$$

$$V_{out} = V_{in} + \Delta V(\Delta T, X) \quad (3.24)$$

Devido que a corrente fotogerada também varia com a temperatura, é necessário estabelecer uma expressão que ilustre a relação de esta com radiação:

$$X(T_{out}, T_{in}) = \frac{I_{ph,out}(T_{out})}{I_{ph,in}(T_{in})} \quad (3.25)$$

A dependência da tensão com a concentração (variação da corrente fotogerada) poder extraída da Eq.(3.10), assim, para valores de tensão maiores que $3nkT$, pode se escrever a seguinte expressão:

$$V = n \cdot V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph} - I}{I_0}\right) - I \cdot R_s \quad (3.26)$$

Desta forma, a variação de tensão entre duas diferentes condições de concentração está dada pela Eq.(3.27). Esta expressão pode ser empregada para definir a variação da tensão de circuito aberto, conforme a Eq.(3.28).

$$\Delta V(X) = V_{out} - V_{in} = n \cdot V_{th} \cdot \left[\ln\left(\frac{I_{ph,out} - I_{out}}{I_0}\right) - \ln\left(\frac{I_{ph,in} - I_{in}}{I_0}\right) \right] - (I_{out} - I_{in}) \cdot R_s \quad (3.27)$$

$$= n \cdot V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph,out} - I_{out}}{I_{ph,in} - I_{in}}\right) - (I_{out} - I_{in}) \cdot R_s$$

$$\Delta V_{oc} = V_{oc,out} - V_{oc,in} = n \cdot V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph,out}}{I_{ph,in}}\right) = n \cdot V_{th} \cdot \ln(X) \quad (3.28)$$

Este modelo leva também em consideração as mudanças devido à variação espectral da concentração, mediante um termo que as quantifica, esta análise é aplicada em cada subcélula de acordo com Eq.(3.29), onde o índice i representa a subcélula em questão.

$$F^i = \frac{X^i}{X} \quad (3.29)$$

Por conseguinte, a Eq.(3.30) mostra o modelo geral para a célula tripla junção, em relação à temperatura, concentração e variações espectrais.

$$V_{out} = V_{in} + V_{th} \cdot \left\{ \sum n^i \cdot \ln(X) + \ln \left[\prod \left(\frac{F^i \cdot I_{ph,in}^i - I_{in}}{I_{ph}^i - I_{in}} \right)^{n^i} \right] \right\} - I_{in}(X - 1) \cdot R_s \quad (3.30)$$

Em caso que as variações da concentração e do espectro sejam consideradas nulas, são apenas analisados os efeitos da temperatura, como é mostrado na Eq.(3.31).

$$V_{out} = V_{in}(T_{in}) + \left(\frac{1}{q} \sum n^i E g^i \right) - [V_{in}(T_{in}) + I_{in} \cdot R_s] \cdot \left(1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} \right) - \left(\sum \gamma^i n^i \right) \cdot V_{th_{out}} \cdot \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \quad (3.31)$$

Para a implementação deste modelo, deve-se levar em consideração que o termo concentração definido pela Eq.(3.25) e o termo da Eq.(2.3) nem sempre são iguais, já que este último faz referência à concentração ótica e depende, principalmente, da geometria da célula e do dispositivo concentrador.

3.2.3. Modelo de Fernandez

No modelo proposto por FERNÁNDEZ (2012), é realizado uma análise da célula tripla junção segundo o circuito de cinco parâmetros, embora na maior parte da modelagem preliminar os efeitos da resistência em paralelo (R_{sh}) sejam desprezados, no final é feita uma correção dos valores obtidos em base neste parâmetro.

A principal diferença deste modelo, quando comparado com os modelos tradicionais, é que o termo exponencial é considerado muito maior que um, esta mudança fica evidente na Eq.(3.32). Consequentemente, a tensão pode ser descrita segundo a Eq.(3.33).

$$I^i = I_{sc}^i - I_0^i \cdot \exp \left(\frac{V^i + I^i \cdot R_s^i}{n^i \cdot V_{th}} \right) \quad (3.32)$$

$$V^i = n^i \cdot V_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}^i - I^i}{I_0^i} \right) - I^i \cdot R_s^i \quad (3.33)$$

Este modelo baseia-se na utilização de uma célula multi junção equivalente de dupla junção. Esta possibilidade nasce a partir da análise da Eq.(3.15), devido às próprias características do material semiconductor da subcélula inferior (Ge) que não permitirem (em nenhum dos casos) que a sua corrente fotogerada seja menor que as correntes fotogeradas das outras camadas. Assim, é possível omitir este termo da análise da Eq.(3.15).

Porém, mesmo tendo uma célula equivalente de só duas junções, a tensão total da célula deve ser igual a tensão da célula de tripla junção, este fato é destacado nas Eq.(3.34) e Eq.(3.35), onde o índice *e* significa “equivalente”.

$$I_{sce} = \min \left[I_{sc}^1, I_{sc}^2 \right] \quad (3.34)$$

$$V_{ocT} = V_{oceT} = V_{oce}^1 + V_{oce}^2 \quad (3.35)$$

A corrente de saturação inversa da nova célula equivalente, é obtida substituindo na Eq.(3.33) a condição de tensão em circuito aberto. Assim, esta pode ser definida como mostra a Eq.(3.36), onde m é o equivalente do fator de idealidade do diodo (de toda a célula) e é tratado como um parâmetro de ajuste.

$$I_0^j = I_{sc}^j \exp \left(\frac{V_{oce}^j}{m V_{th}} \right) \quad (3.36)$$

Em consequência, a tensão da célula multi junção é exposta na Eq.(3.37), onde o índice j representa cada um dos pontos da curva característica de célula, e a resistência em série é totalizada como a soma de cada uma das resistências em series de cada subcélula.

$$V_j = m * V_{th} \left[\ln \left(\frac{I_{sc}^1 - I_j}{I_0^1} \right) + \ln \left(\frac{I_{sc}^2 - I_j}{I_0^2} \right) \right] - I_j \cdot R_s \quad (3.37)$$

Finalmente, a Eq.(3.38) apresenta a correção devido à resistência paralela antes mencionada, para a corrente de saída da célula multi junção.

$$I_j(R_{sh}) = I_j - \left(\frac{V_j + I_j \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (3.38)$$

Da mesma forma que no modelo de Dominguez, também é inserido um termo a fim de quantificar as variações no espectro incidente em cada subcélula. Como é observado na Eq.(3.39), este termo está relacionado principalmente à corrente fotogerada, e consequentemente à corrente de curto circuito.

$$K_j = \frac{I_{ph}^j(E(\lambda))}{I_{ph}^j(E(AM1.5))} \quad (3.39)$$

Por sua vez, no trabalho de FERNÁNDEZ (2012) foi comprovado que a tensão de circuito aberto se manteve quase constante sob variações de espectro (K). Entretanto, a partir do estabelecido por KINSEY, *et al.* (2008), o autor define que a tensão de circuito aberto de cada uma das junções da célula apresenta mudanças com a variação de concentração, conforme a Eq. (3.40).

$$V_{oc}^i(X^i) = m \cdot V_{th} \cdot \ln(X^i) + V_{oc}^i(X^i = 1) \quad (3.40)$$

O maior inconveniente na implementação deste modelo, é o cálculo do fator de idealidade do diodo equivalente da célula. Uma vez, que este é obtido mediante um processo iterativo, no qual para cada valor de “ m ” aplicado ao no modelo, é calculado um erro que se define como a diferença entre os valores experimentais em cada ponto da curva I-V e os valores estimados.

Contudo, nem sempre tem-se a plena disposição de todos os valores que conformam a curva característica, mas é possível conhecer os pontos principais (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} e I_{mp}) da mesma. Desta forma, é evidente que só com três pontos da curva o erro no cálculo do fator de idealidade seja maior que o previsto.

Outro parâmetro sensível (o qual o autor não descreve em detalhes), é a proporção correta que deve ser utilizada para que a condição da Eq.(3.35), seja atingida. Assim, na presente dissertação, propõe-se uma modificação conforme a Eq.(3.41), onde o valor de p varia entre zero e um.

$$V_{oce}^1 = p * V_{oc} T \quad (3.41)$$

$$V_{oce}^2 = (p - 1) * V_{oc} T$$

O valor inicial de “ p ” foi definido em 0,55 com uma taxa de variação de 1×10^{-6} por iteração. Assim, se o valor da tensão calculada para a condição de curto circuito é maior que zero o “ p ” aumenta, de outra forma diminui.

O algoritmo utilizado na implementação deste modelo é mostrado na Fig. 3.11, onde a fim de reduzir o custo computacional, é preciso assumir o valor de R_s , como foi visto antes deve ser próximo a zero. Caso contrário, seriam necessários três processos iterativos.

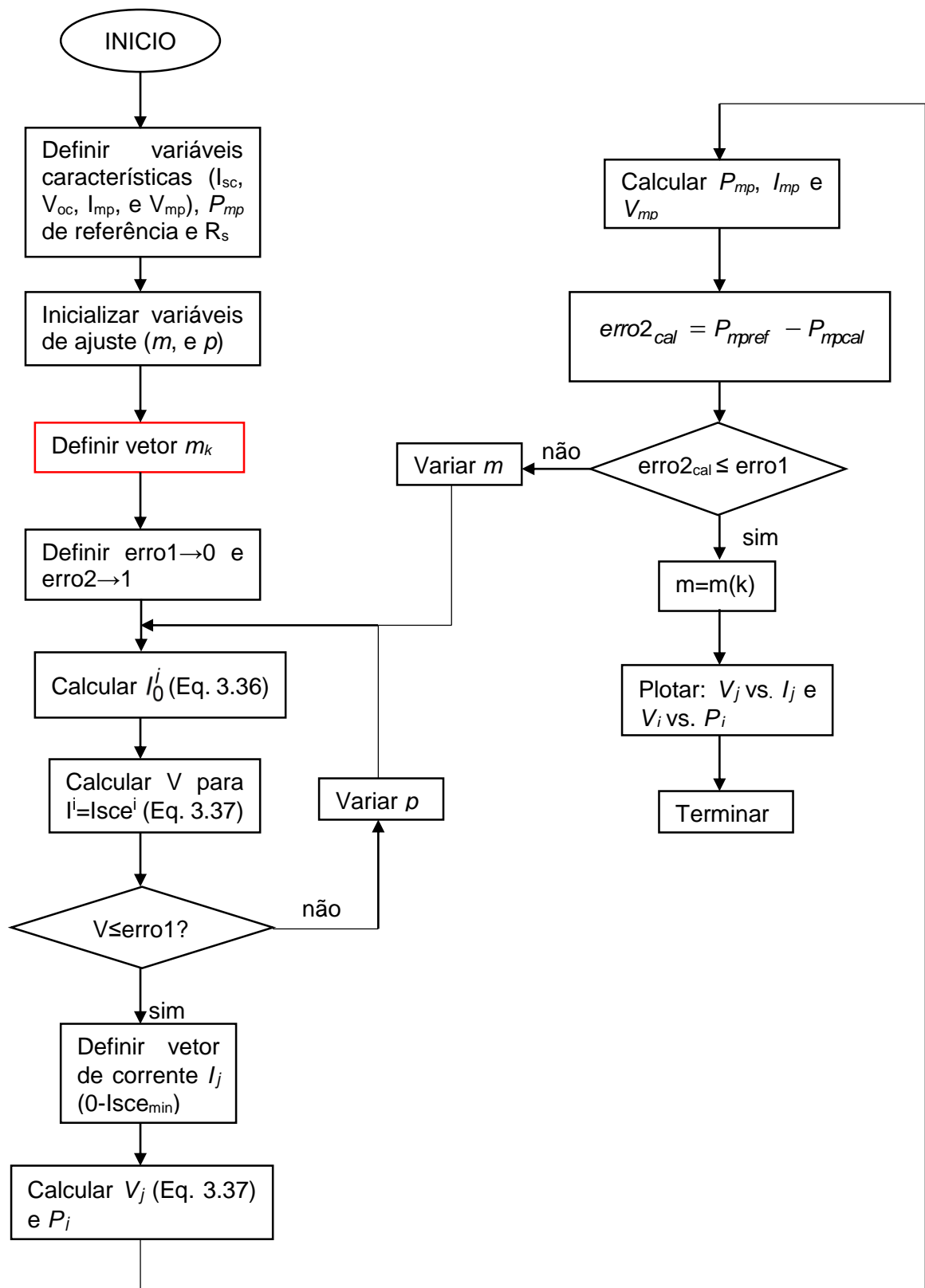


Figura 3.11 – Algoritmo para implementar o modelo de Fernandez para caracterização de células fotovoltaicas multi junção

Diferente à iteração de “ p ”, a mutação de “ m ” ocorre sempre em avanço, pois inicialmente é definido um vetor, que segundo a recomendação do autor, deve começar em 1,96. Porém, a fim de reduzir o número de iterações necessárias na solução do modelo, a condição inicial e final do vetor “ m ” é definida pela Eq.(3.42), onde m_c é obtida mediante a Eq.(3.3).

$$\begin{aligned} m_i &= m_c - (0,5 \cdot m_c) \\ m_f &= m_c + (0,5 \cdot m_c) \end{aligned} \quad (3.42)$$

3.3. Modelagem de módulos fotovoltaicos

Como foi antes mencionado, um módulo fotovoltaico compõe-se de um arranjo de células conectadas em série e/ou em paralelo. Assim partindo do modelo ideal, a Eq.(3.43), define a corrente de saída do modulo em função da tensão do mesmo.

Na Eq.(3.43), os termos N_p e N_s representam o número de células ligadas em paralelo e em série respectivamente. O produto deste dois termos, é igual a o número total de células no modulo.

$$I_M = N_p \cdot \left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{n \cdot N_s \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3.43)$$

Cada um dos modelos apresentados até aqui (com exceção do modelo de dois diodos e do modelo de Kinsey) será implementado em um *script* em Matlab®, para a avaliação dos mesmos.

3.4. Dispositivos fotovoltaicos utilizados na simulação

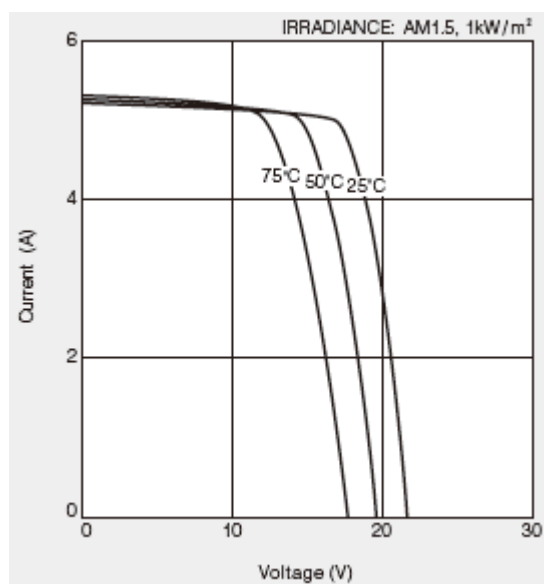
A fim de testar os diferentes modelos expostos anteriormente em células fotovoltaicas de junção única, são utilizados os dados mostrados na Tab. 3.2, pertencentes ao modulo Kyocera KC85T (KYOCERA, 2014) sob condições padrão.

A Fig. 3.12 mostra a representação gráfica da equação característica I-V do mesmo modulo solar para vários níveis de irradiância, e temperatura.

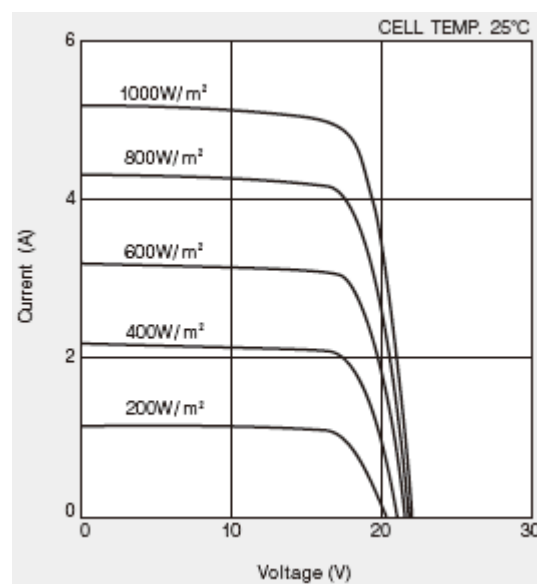
Tabela 3.2 – Características operacionais de um modulo fotovoltaico de silício cristalino

Parâmetros	Valor
Potência Máxima (W)	87
Tensão na potência máxima (V)	17,4
Corrente na potência máxima (A)	5,02
Tensão de circuito aberto (V)	21,7
Corrente de curto circuito (A)	5,34
Coeficiente de temperatura (Isc) (A/°C)	$2,12 \times 10^{-3}$
Coeficiente de temperatura (Voc) (V/°C)	$-8,21 \times 10^{-2}$

Fonte: KYOCERA



a. Radiação padrão



b. Temperatura padrão

Figura 3.12 – Curvas características do modulo fotovoltaico de c-Si Kyocera KC85T

Fonte: KYOCERA

Já para as células de múltipla junção, a obtenção dos dados de referência é um pouco mais difícil que no caso anterior, pois mesmo que atualmente este tipo de célula esteja sendo comercializada, na maioria dos casos os fabricantes fornecem os dados para diferentes tipos de concentração e não para a radiação padrão. Portanto, deve-se realizar a análise não somente com uma célula, mas sim com três, uma vez que cada célula seguinte fornece diferentes informações sob diferentes condições.

Desta forma, no primeiro estudo de caso, foram extraídos dados dos trabalhos de (SEGEV, MITTELMAN e KRIBUS, 2012) e (OTA, SAKURADA e NISHIOKA, 2010) para uma

célula tripla junção (In_{0.49}Ga_{0.51}P/In_{0.01}Ga_{0.99}As/Ge) sob duas diferentes condições de radiação (1X e 350X), estes dados são mostrados na Tab.3.3.

Tabela 3.3 – Características operacionais uma célula fotovoltaica tripla junção (T=25°C).

X	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _{mp} (V)	I _{mp} (A)	P _{mp} (W)	FF
1	2,53	6,74x10 ⁻³	-	-	14,475x10 ⁻³	0,849
350	3,2	4,308	2,845	4,215	12	0,87

Fonte: Segev, et al. (2012) e Ota, et al. (2010)

Nessa tabela, é possível verificar a ausência de dados importantes, assim para a primeira condição de radiação é necessário partir dos dados mostrados na Tab. 3.4, a fim gerar os dados faltantes, para a avaliação dos métodos de parametrização.

Tabela 3.4 – Propriedades intrínsecas de uma célula fotovoltaica tripla junção (T=25°C, X=1).

Parâmetros	InGaP	InGaAs	Ge
I _{ph} (A)	6,7522x10 ⁻³	7,7126x10 ⁻³	10,094x10 ⁻³
I ₀ (A)	3,30x10 ⁻¹⁵	6,00x10 ⁻¹¹	3,00x10 ⁻⁵
n	1,97	1,75	1,96
R _s (Ω)	0,0236	0,0012	0,0008
R _{sh} (Ω)	16,0x10 ⁶	4,5x10 ⁶	540

Fonte: Segev, et al. (2012) e Ota, et al. (2010)

De maneira similar à condição “sem concentração”, na condição de 350 sóis também se dispõe dos parâmetros que permitem a implementação do modelo característico. Esta informação é mostrada na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Propriedades intrínsecas de uma célula fotovoltaica tripla junção (T=25°C, X=350).

Parâmetros	InGaP	InGaAs	Ge
I _{ph} (A)	4,292	4,792	6,101
I ₀ (A)	1,101x10 ⁻¹³	2,813x10 ⁻¹³	8,543x10 ⁻⁷
n	1,993	1,278	1,421
R _s (Ω)	7,195x10 ⁻³	3,352x10 ⁻³	2,492x10 ⁻⁴
R _{sh} (Ω)	587	389	100

Fonte: Segev, et al. (2012) e Ota, et al. (2010)

Para o segundo estudo de caso (BEN OR e APPELBAUM, 2014), têm-se 16 diferentes condições de operacionais, para cada um dos parâmetros intrínsecos da célula tripla junção. Assim, são estabelecidas quatro temperaturas (10°C, 25°C, 80°C e 90°C) para quatro condições de concentração (350X, 555X, 750X e 900X).

Os dados expostos na Tab. 3.6 foram extraídos com a ajuda do software WinDig®, mediante tratamento das imagens mostradas na Fig. 3.13.

Tabela 3.6 – Características operacionais de uma célula fotovoltaica tripla junção sob diferentes condições de temperatura e concentração.

Parâmetro	X\T(°C)	10	25	80	95
I_{ph} (A)	350	4,2984	4,3357	4,4848	4,5035
	555	6,8159	6,8531	7,0956	7,1702
	700	8,4942	8,5501	8,8671	8,9604
	900	10,956	10,993	11,422	11,534
I_0 (A)	350	$4,5938 \times 10^{-20}$	$4,3281 \times 10^{-19}$	$6,2299 \times 10^{-16}$	$2,5774 \times 10^{-15}$
	555	$1,2252 \times 10^{-19}$	$7,3238 \times 10^{-19}$	$9,6539 \times 10^{-16}$	$4,9272 \times 10^{-15}$
	700	$2,5577 \times 10^{-19}$	$1,3766 \times 10^{-18}$	$1,4445 \times 10^{-15}$	$7,3726 \times 10^{-15}$
	900	$4,8072 \times 10^{-19}$	$2,7747 \times 10^{-18}$	$2,6692 \times 10^{-15}$	$1,4862 \times 10^{-14}$
n	350	2,8863	2,7947	2,6157	2,5705
	555	2,9408	2,8516	2,6515	2,611
	700	3,0025	2,9009	2,7114	2,6527
	900	3,0412	2,9508	2,7507	2,7214
R_s (Ω)	350	0,01350	0,01597	0,02301	0,02702
	555	0,01131	0,01330	0,01701	0,01823
	700	0,00961	0,01078	0,01442	0,01511
	900	0,00810	0,00869	0,01093	0,01211
R_{sh} (Ω)	350	549,45	449,51	41456	343,02
	555	404,73	361,04	316,26	261,100
	700	327,18	262,2	202,67	169,36
	900	185,74	168,26	149,756	122,94

Fonte: Ben Or e Appelbaum (2014)

Como terceiro e último estudo de caso, serão utilizados os dados das células fotovoltaicas multi junção adquiridas pelo Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LEST-nano), cujos dados são mostrados na Tab. 3.7 (AZUR SPACE SOLAR POWER GMBH).

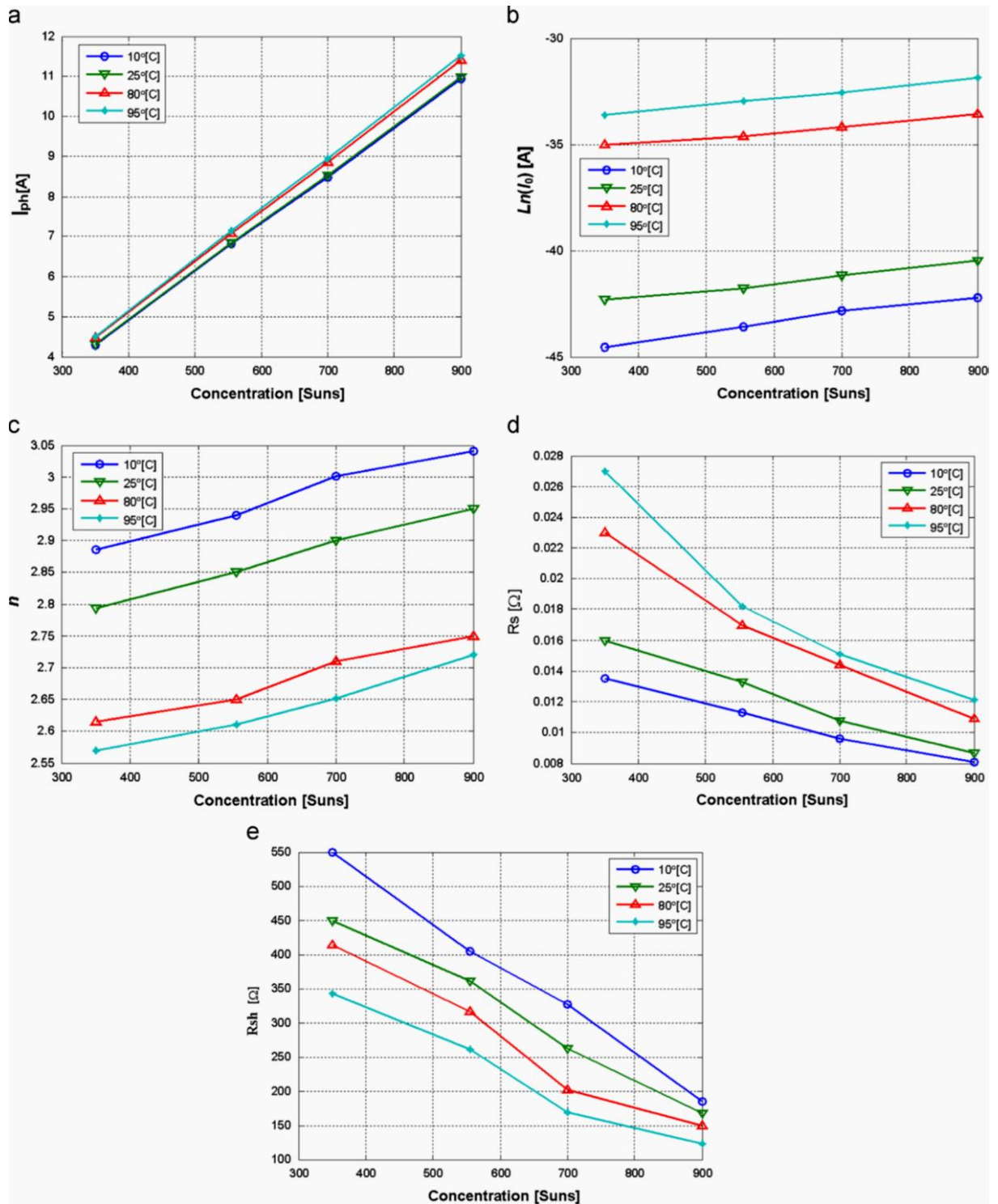


Figura 3.13 – Variação dos parâmetros intrínsecos de uma célula tripla-junção para diferentes condições de temperatura e concentração

Fonte: (BEN OR e APPELBAUM, 2014)

Para realizar o cálculo dos parâmetros intrínsecos desta célula, só serão utilizados os métodos com os quais foram obtidos os melhores resultados para os outros estudos de caso.

O módulo multi junção que será simulado (atualmente em fabricação) é composto por 20 células tripla junção (Tab. 3.7) de 25mm² de área, conectadas em série, como é mostrado na Fig.3.14.

Tabela 3.7 – Características operacionais de uma célula fotovoltaica tripla junção sob diferentes de concentração (T=25°C).

Parâmetro \ X	250	500	1000
V _{oc} (V)	3,06	3,10	3,13
I _{sc} (A)	1,15	2,3	4,60
V _{mp} (V)	2,81	2,83	2,8
I _{mp} (A)	1,13	2,25	4,48
P _{mp} (W)	3,17	6,37	12,55
FF	0,901	0,893	0,872
η (%)	41,5	41,7	41,1
α (A/°C)	-	1,8x10 ⁻³	-
β (V/°C)	-	-4,2x10 ⁻³	-

Fonte: AZUR SPACE SOLAR POWER GMBH

O modulo possui também um arranjo de lentes de Fresnel de 4mm de espessura, onde cada lente tem uma área efetiva de (15x15) cm². Assim, mediante a aplicação da Eq.(2.3), é possível estimar o nível de concentração em 900X.

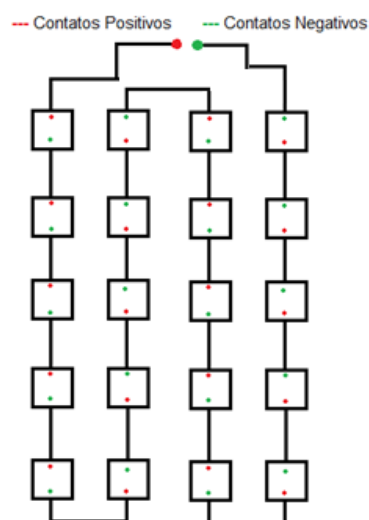


Figura 3.14 - Esquema do sistema fotovoltaico final

3.5. Métodos de estimação dos parâmetros das células fotovoltaicas

A identificação de sistemas é um estudo sobre os procedimentos que permitem construir modelos matemáticos a partir de dados e sinais observados (AGUIRRE, 2007).

Em trabalhos focados na modelagem e simulação, os métodos que ajudam na determinação de parâmetros que não são fornecidos pelos fabricantes são de vital importância, visto que sem eles, o cálculo dos modelos implementados seriam ainda mais complexos.

Na literatura são encontrados vários métodos para a estimativa dos parâmetros (I_{ph} , n , I_{0r} , R_{sr} , e R_{shr}) de um dispositivo fotovoltaico. Em sequência serão brevemente descritos os principais métodos analisados para o cálculo dos parâmetros dos dispositivos fotovoltaicos trabalhados nesta dissertação.

3.5.1. Ajuste de curvas

O ajuste de curvas está associado com o método dos mínimos quadrados, regressão polinomial e outros. Para a implementação deste método, primeiramente os dados obtidos no levantamento da curva característica da célula, devem ser corrigidos para as variações de temperatura e radiação, ou seja, os dados devem ser normalizados para valores constantes destas variáveis.

Embora, este seja um dos métodos mais utilizados na determinação de parâmetros dos dispositivos fotovoltaicos (GARRIGÓS, BLANES, *et al.*, 2007), a maior dificuldade na utilização do mesmo, se encontra na digitalização da curva I-V (HAOUARI-MERBAH, BELHAMEL, *et al.*, 2005), pois é necessário dispor de um software especializado. Um exemplo disso, pode ser observado na Fig. 3.12, uma vez que a informação proporcionada pelo fabricante nem sempre é apresentada da melhor forma.

As curvas devem ser digitalizadas de forma individual a fim de obter a informação específica para cada condição. Não obstante, no processo de isolamento de cada uma das curvas de interesse, é possível que uma parte importante da informação seja removida involuntariamente, como se observa na Fig. 3.15.

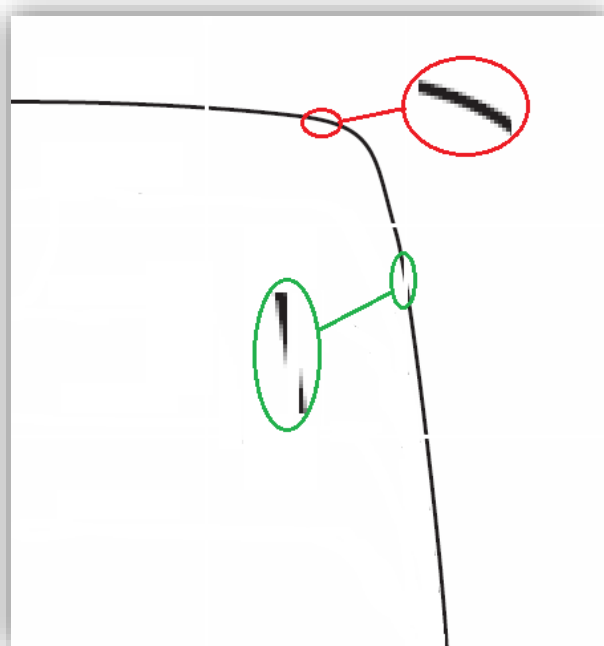


Figura 3.15 – Curva característica de um modulo fotovoltaico processada para 25°C fornecida pelo fabricante

Outro parâmetro que deve se ter cuidado na digitalização da curva característica é a resolução da mesma, ou seja é recomendado que cada dado (I-V) da curva ocupe só um pixel da imagem, de forma oposta ao que acontece na Fig.3.15, a fim de evitar redundância nos dados coletados. No presente trabalho, foi utilizado o software *Photo editor online* (PIXRL), que tem ferramentas similares ao *Photoshop®*, com a vantagem que pode ser usado online ou seja, não há necessidade de instalação, além de ser um software livre.

O tamanho da imagem a digitalizar deve ser igual ao quadro que a envolve na Fig. 3.12, desta forma podem se estabelecer valores de referência. Assim, a digitalização da curva é realizada mediante o comando *imread* de Matlab®, e os dados são armazenados em variáveis para o posterior análise.

Finalmente, é aplicado um algoritmo baseado em expressões analíticas. Em consequência as soluções de cada um dos pontos da curva digitalizada, interatuam para encontrar uma solução que satisfaça a totalidade dos mesmos. O ajuste de curva é realizado mediante a ferramenta ou *toolbox* “*cftool*” de Matlab®, como se mostra na Fig. 3.16.

O fato do modelo característico da célula (modelo de cinco parâmetros) ser uma equação transcendente, faz com que a utilização de este tipo de ferramentas seja inviável,

por outro lado, ainda, pode-se utilizar o modelo ideal, porém só serão estimados três parâmetros (I_{ph} , I_0 e n).

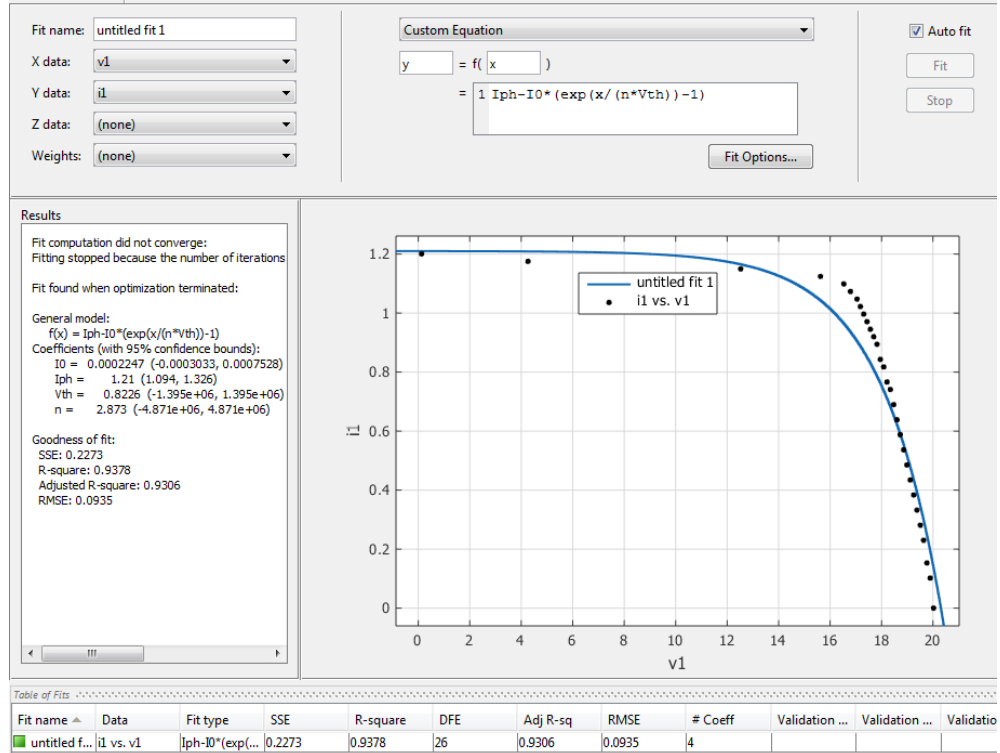


Figura 3.16 – Exemplo de ajuste de curvas realizado no *cftool* de Matlab®

Segundo (NETO, 2006), com a aplicação de series de Taylor, é recomendado utilizar até o quarto termo da mesma, como ilustrado na Eq.(3.44).

$$Q = \exp\left(\frac{I \cdot R_s}{n \cdot Vth}\right) = 1 + \frac{I \cdot R_s}{n \cdot Vth} + \frac{\left(\frac{I \cdot R_s}{n \cdot Vth}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{I \cdot R_s}{n \cdot Vth}\right)^3}{3!} \quad (3.44)$$

Desta forma, a Eq.(3.12), pode ser expressada como segue:

$$I = I_{ph} - I_0 * \left[\exp\left(\frac{V}{n \cdot Vth}\right) \cdot Q - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.45)$$

Como é possível verificar na Eq.(3.45), com a aplicação da série de Taylor, a nova expressão da corrente no modelo, torna-se de maior complexidade e inclui erro de precisão.

3.5.2. Métodos analíticos

Uma das formas em que podem ser encontrados os valores dos parâmetros faltantes no modelo, é mediante a utilização de expressões analíticas. Porém, a implementação de muitas destas expressões é complicada, além de não garantir uma boa exatidão nos cálculos, pois alguns termos são desconsiderados e aproximações são feitas. Nos trabalhos citados a seguir, são utilizados alguns destes métodos.

- Num trabalho recente BLAS, *et al.* (2002), calcula o valor dos parâmetros intrínsecos da célula definindo de maneira preliminar os valores iniciais das resistências a partir da curva experimental, como se mostra na Eq.(3.46).

$$R_{so} = -\frac{dV}{dI(V_{oc})}$$

$$R_{sho} = -\frac{dV}{dI(I_{sc})}$$
(3.46)

Posteriormente são definidos todos os outros parâmetros em função da Eq.(3.46), como:

$$R_s = \frac{R_{so} \cdot \left(\frac{V_{oc}}{n \cdot V_{th}} - 1 \right) + R_{sho} \left(1 - \frac{I_{sc} \cdot R_{so}}{n \cdot V_{th}} \right)}{\frac{V_{oc} - I_{sc} \cdot R_{sho}}{n \cdot V_{th}}}$$
(3.47)

$$R_{sh} = R_{sho} - R_s$$
(3.48)

$$n = \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s - V_{oc}}{V_{th} * \ln \left[\frac{I_{sc} - I_{mp} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) - \frac{V_{mp}}{R_{sh}}}{I_{sc} * \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} \right]}$$
(3.49)

Como é observado, a solução de este sistema de equações deve ser realizada de maneira iterativa, uma vez que um parâmetro depende do outro.

- No trabalho de VERA (2004), primeiramente é definida a resistência em serie como uma função da tensão e da corrente da célula no ponto de inflexão da curva I-V mediante a Eq.(3.50). Esta expressão pode ser resolvida pelo método Newtown-Raphson. Desta forma

define-se a resistência em paralelo em função do valor obtido para a resistência em série, como mostrado na Eq.(3.51)

$$R_s = \left[\frac{\left(\frac{V_{mp}}{I_{mp}} \right) - R_s}{I_{mp} + \frac{I_0 \cdot I_{mp} \cdot R_s}{V_{th}} \cdot \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{V_{th}} \right)} \right] \quad (3.50)$$

$$\left\{ I_{sc} - I_{mp} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{V_{th}} \right) - 1 \right] \right\} - \frac{V_{mp}}{I_{mp}}$$

$$R_{sh} = \frac{V_{mp} - I_{mp} \cdot R_s}{\frac{I_0}{V_{th}} \left[(I_{mp} \cdot R_s - V_{mp}) \cdot \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{V_{th}} \right) \right] + I_{mp}} \quad (3.51)$$

Finalmente, para determinar o valor do fator de idealidade é utilizada uma expressão obtida de forma empírica, a qual é mostrada na Eq.(3.52).

$$n = 2,8 - 2,3 \cdot \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.52)$$

• Por outro lado, XIAO, et al. (2004) parte do modelo de quatro parâmetros, assim, mesmo que a resistência em série esteja dada por uma expressão analítica na Eq.(3.53), o fator do idealidade do diodo deve ser calculado mediante iteração.

$$R_s = \frac{n \cdot V_{th} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{oc}}{n \cdot V_{th}} \right) + \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right] - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (3.53)$$

Para a implementação deste modelo, é necessário definir um termo a fim de avaliar a exatidão de n e R_s , esse termo é definido pela derivada da corrente devido à tensão e é avaliado no ponto de potência máxima, conforme a Eq.(3.54).

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{P_{mp}} = \frac{\frac{-I_0}{n \cdot V_{th}} \cdot \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{n \cdot V_{th}} \right)}{1 + \frac{I_0 \cdot R_s}{n \cdot V_{th}} \cdot \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{n \cdot V_{th}} \right)} \quad (3.54)$$

Assim, o algoritmo utilizado na implementação deste método de parametrização é mostrado na Fig.3.17.

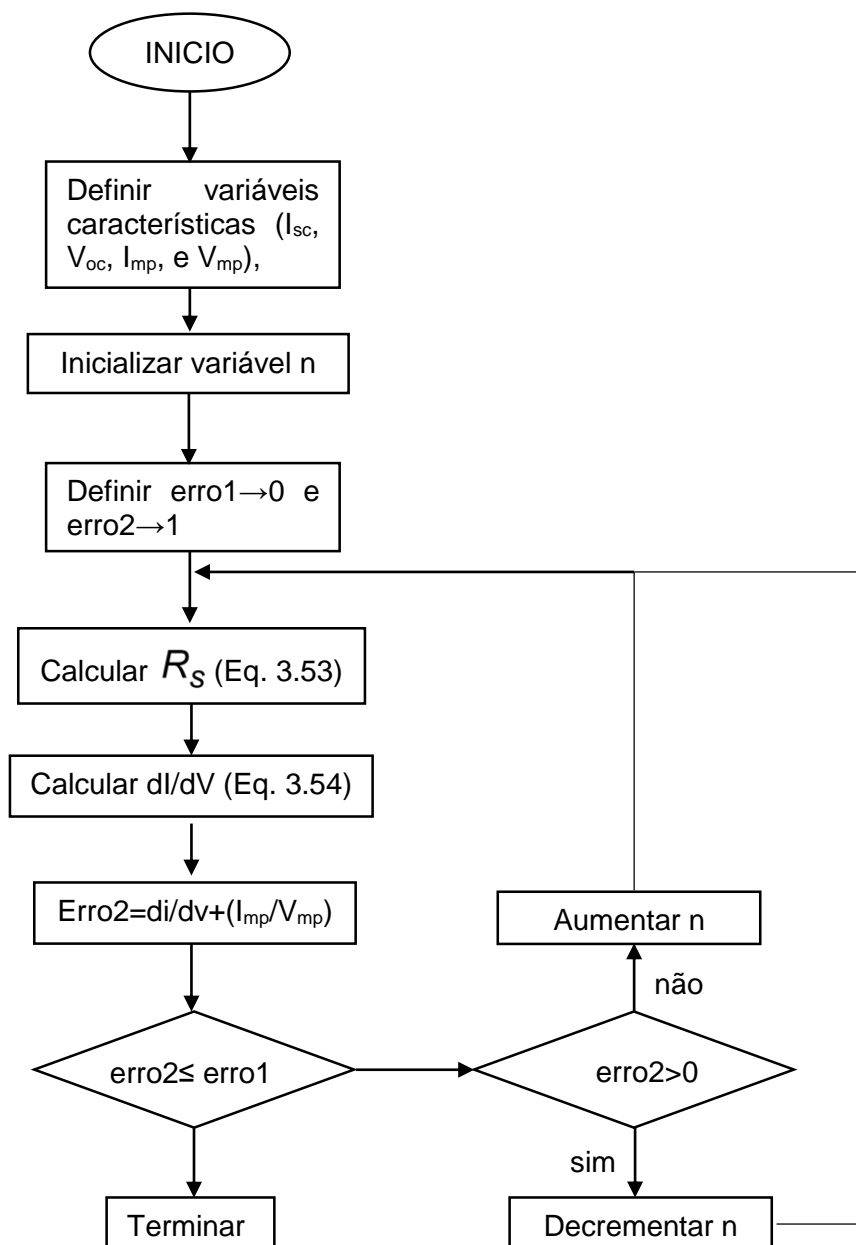


Figura 3.17 – Algoritmo para o cálculo de n e R_s na parametrização de Xiao, et al.

3.5.3. Microsoft Solver Excel ® - Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) não linear

O Solver faz parte de um pacote de programas algumas vezes chamado de ferramentas de teste de hipóteses. O Solver, permite encontrar um valor ideal (máximo ou mínimo) para

uma fórmula em uma célula (chamada célula de objetivo) conforme restrições, ou limites, sobre os valores de outras células de fórmula em uma planilha. O Solver trabalha com um grupo de células, chamadas variáveis de decisão ou simplesmente de células variáveis, que participam do cálculo das fórmulas nas células de objetivo e de restrição. O Solver ajusta os valores nas células variáveis de decisão para satisfazer aos limites sobre células de restrição e produzir o resultado desejado para a célula objetiva (MICROSOFT, 2006).

Num trabalho recente (BRAGA, 2008), demonstrou que esta ferramenta pode ser utilizada na parametrização da curva característica de um dispositivo fotovoltaico, no entanto, inicialmente, deve ser aplicado um tratamento de imagem a fim de encontrar os valores de corrente e tensão em cada um dos pontos da curva fornecida pelo fabricante, isto é com intenção de melhorar a precisão do cálculo.

Na Fig.3.18 é mostrado, como devêm ser inseridos os dados dentro da planilha do Excel, para o posterior cálculo dos parâmetros desejados mediante a função *solver*.

Ns=	36	n=	1,127527116
Vth=	0,0257	Rs=	0,365005178
Voc=	17,7545724	Rsh=	69,625035
Iph=	5,44223802		
IO=	2,2095E-07		
		Células variáveis	
erro	20,3253955	Célula destino (função objetivo)	

Figura 3.18 – Exemplo de cálculo das propriedades de um dispositivo fotovoltaico utilizando o *solver* de Excel ®

As configurações necessárias na implementação do *solver*, são mostradas na Fig. 3.19. Como é observado, devem ser inseridos os dados antes definidos, e adicionalmente apresentar a opção de escolher o método mediante o qual será encontrado o valor das incógnitas. Mediante esta função, também é permitido ingressar o valor da exatidão desejada e do erro de convergência.

As opções de solução disponíveis no *solver* são:

- Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) para resolução de problemas não lineares, que tem como objetivo principal encontrar o mínimo local mais próximo de uma função não linear. Segundo (DRUD, 1985) é um método que envolve a utilização de matrizes Jacobianas com restrições usando algoritmos de programação linear modificados para lidar com a não-linearidade dos modelos dinâmicos. Este foi o método empregado no presente trabalho.

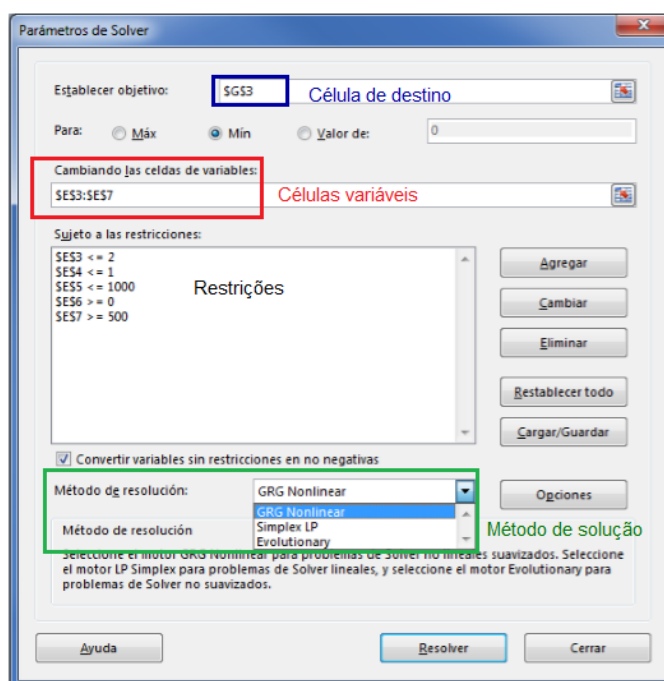


Figura 3.19 – Configurações da ferramenta solver de Excel ®

- Evolucionário, que foi criado a fim de usar a evolução simulada como um processo de aprendizagem com o objetivo de gerar inteligência artificial (FOGEL e FOGEL, 1988), utilizando máquinas de estados finitos como preditores e fazendo-as evoluir. Atualmente a programação evolucionária é um dialeto sem estrutura fixa ou (representação), em contraste com alguns dos outros dialetos.

- LP simplex (*Linear Programing simplex*) é uma técnica para a otimização de uma função objetivo linear, sujeito a igualdade linear e restrições de desigualdade lineares. Sua função objetivo é uma função a fim de valor real definido neste poliedro (SRIDHAR e BASU, 1993). Para a resolução de equações não-lineares, normalmente são usados os dois primeiros métodos citados.

A fim de realizar a parametrização com a ferramenta solver de Excel®, são utilizados os dados coletados na digitalização das curvas. Seguidamente a corrente fotogerada e a corrente de saturação reversa são calculadas de forma analítica, deixando só por conhecer o fator de idealidade do diodo e as resistências serie e paralelo.

É então, calculada a corrente de saída em função das variáveis faltantes, permitindo assim, estabelecer uma variável de erro de cálculo (para cada um dos pontos da curva digitalizada), que é a diferença entre o valor calculado e o valor fornecido pelo fabricante. Desta forma, a célula de destino é definida como a meia dos erros de cálculo, conforme a Fig. 3.20.

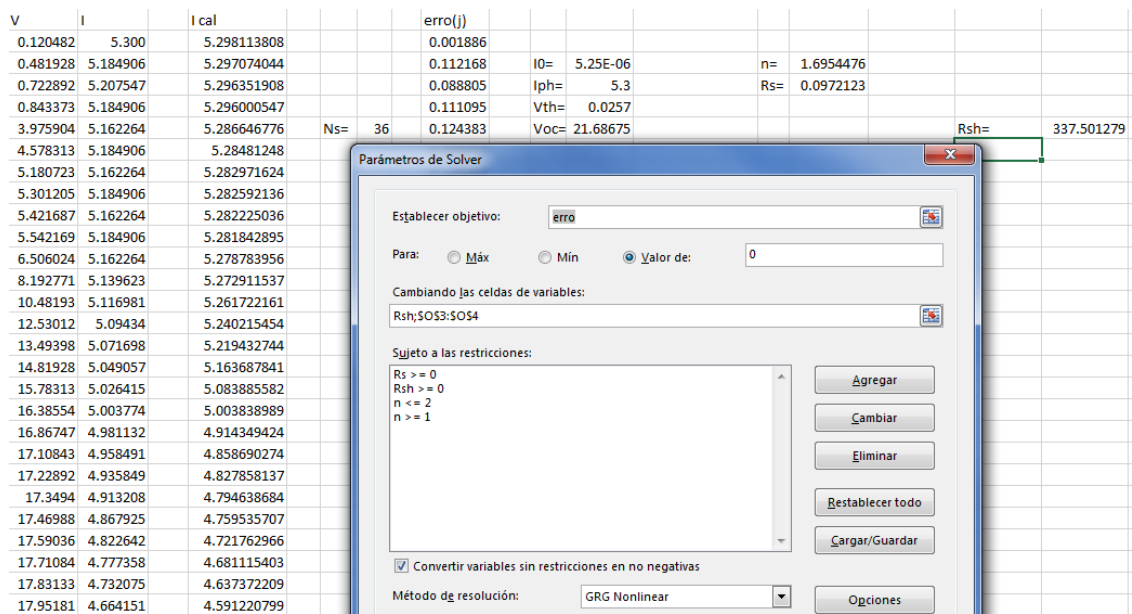


Figura 3.20 – Parametrização aplicando o m solver de Excel ®

Como observado nas Figs. 3.2, 3.6 e 3.8, é possível afirmar a curva característica pode ser dividida em três porções, segundo mostrado na Fig. 3.21, e cada uma destas regiões está sob influência de um parâmetro específico.

Portanto, a fim de diminuir o erro na parametrização na aplicação desta metodologia, é preferível definir um erro para cada região da curva caraterística e mudar só o parâmetro de interesse. Isto será demonstrado no próximo capítulo.

Existem ainda outros métodos que envolvem cálculos e algoritmos de maior complexidade como redes neurais, algoritmos genéticos, evolução diferencial, fuzzy, etc.

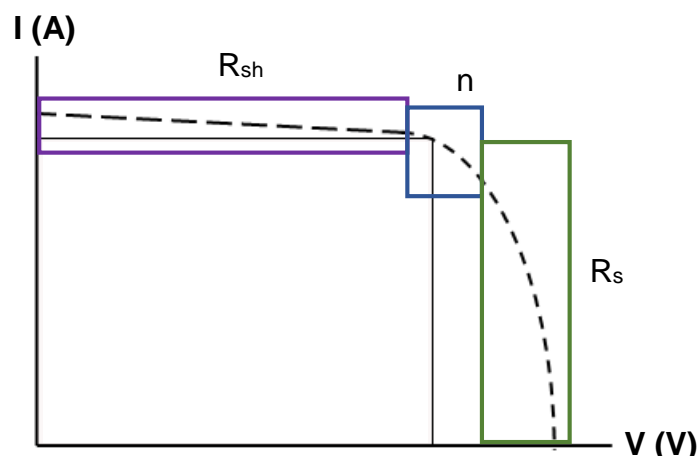


Figura 3.21 – Regiões da curva caraterística sob influência de diferentes parâmetros

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

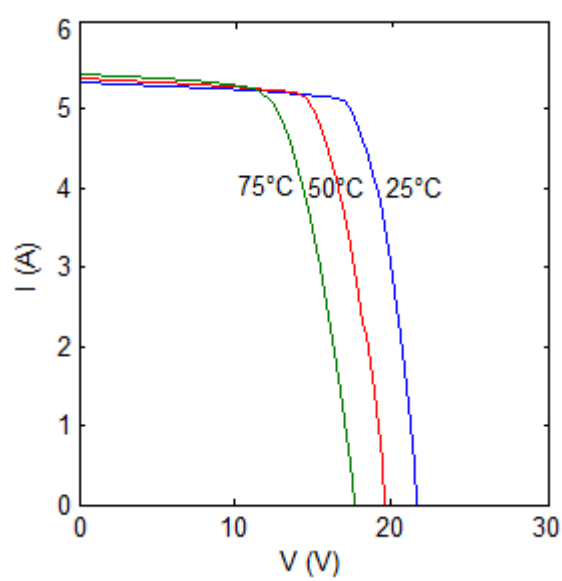
Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos, primeiramente da parametrização das curvas características dos dispositivos mencionados no capítulo anterior, com o objetivo de mostrar as principais diferenças na exatidão entre cada um dos métodos utilizados. Também mediante os resultados obtidos da parametrização serão expostas as variações obtidas por estas propriedades, variando a temperatura e radiação.

De maneira semelhante, serão mostrados os resultados obtidos das simulações dos diferentes modelos matemáticos mencionados no capítulo anterior, com especial atenção no nível de precisão atingido por cada um deles, principalmente no ponto de inflexão da curva característica.

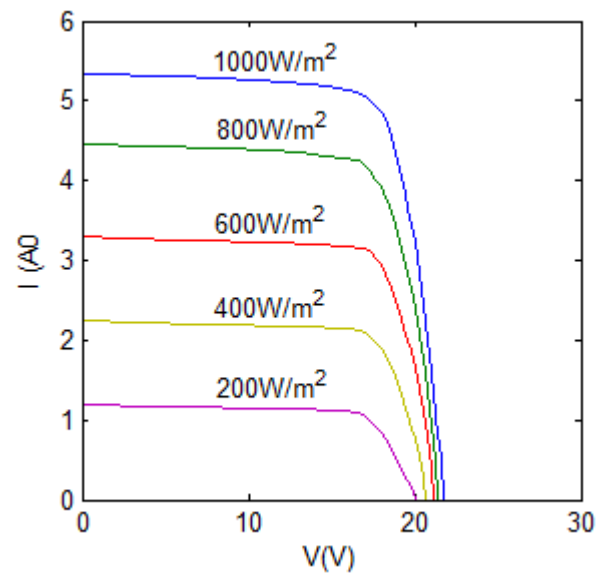
Os resultados serão apresentados para cada dispositivo fotovoltaico na mesma ordem que foram mencionados na metodologia.

4.1. Módulo fotovoltaico c-Si

O primeiro procedimento aplicado no caso do modulo fotovoltaico de c-Si foi a digitalização das curvas características fornecidas pelo fabricante, para diferentes níveis de radiação e temperatura, como mostrado na Fig. 4.1. Desta forma, a fim de determinar se a dados coletados dessas curvas ajustariam as curvas reais, foram superpostas uma sobre a outra, conforme a Fig. 4.2.

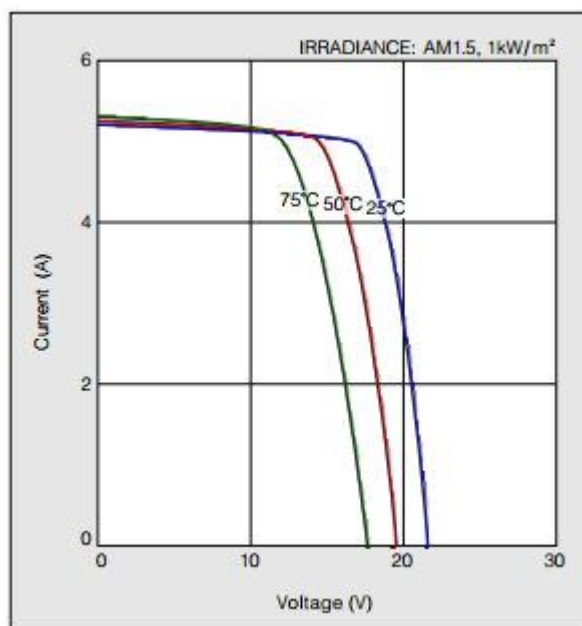


a. Radiação padrão

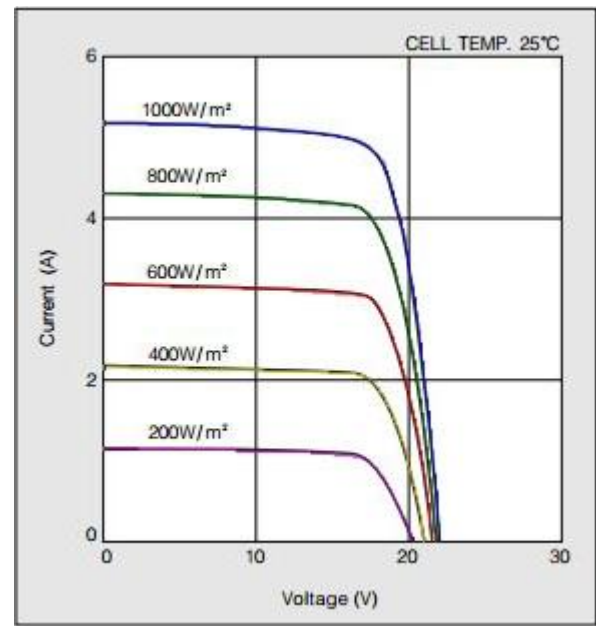


b. Temperatura padrão

Figura 4.1 – Curvas características digitalizadas do modulo fotovoltaico de c-Si Kyocera KC85T



a. Radiação padrão



b. Temperatura padrão

Figura 4.2 - Curvas características digitalizadas comparadas com as fornecidas pelo fabricante do modulo fotovoltaico de c-Si Kyocera KC85T

4.1.1. Parametrização e caracterização

Como é mostrado nas Figs. 4.3a e 4.4, primeiramente foram geradas as curvas características a partir do modelo ideal (Eq.3.1), com objetivo de apresentar um ponto de referência que permita mostrar as diferenças entre os modelos que serão implementados.

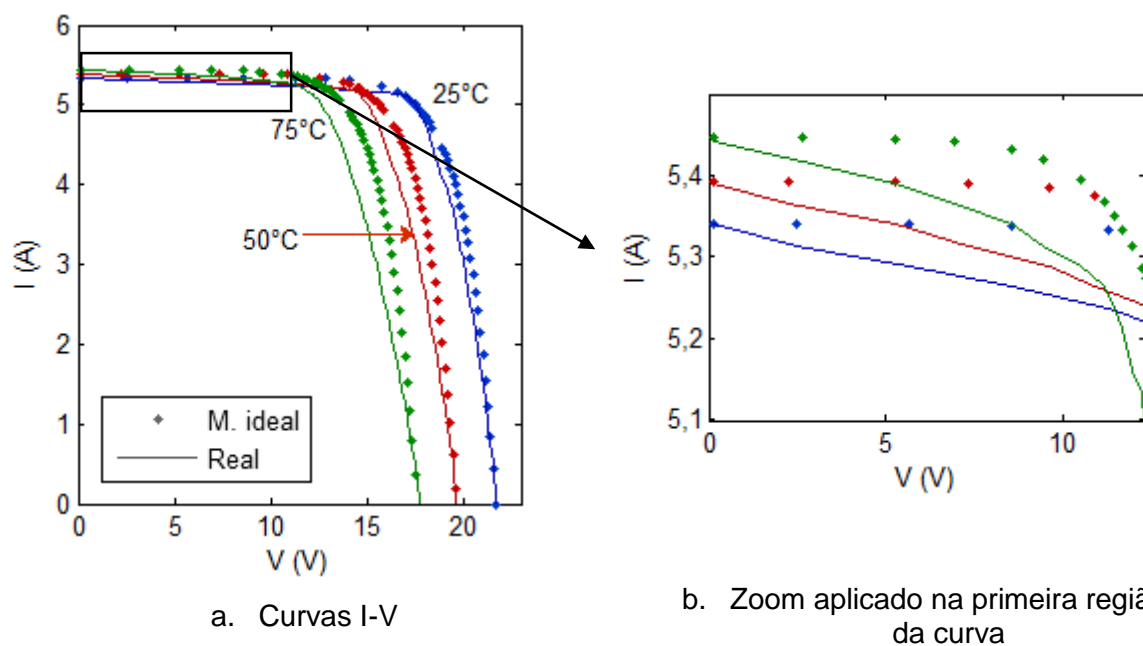


Figura 4.3 – Comparação entre as curvas I-V digitalizadas e as geradas pelo modelo ideal para várias temperaturas e radiação padrão

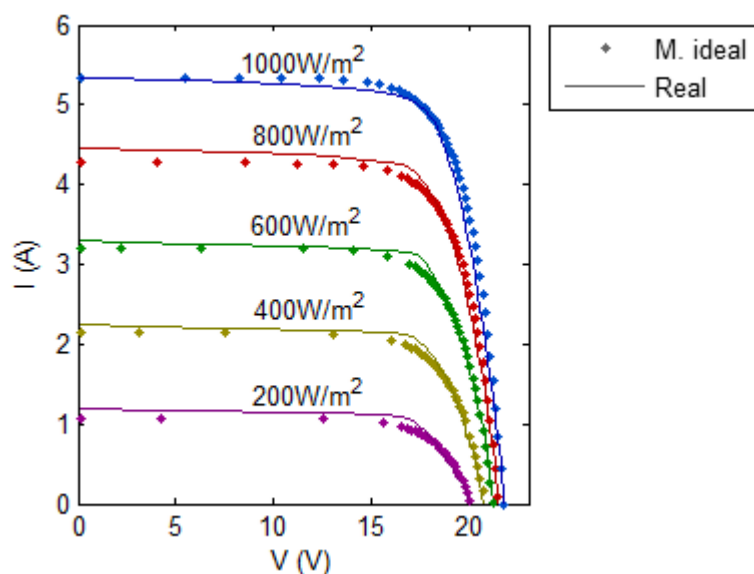


Figura 4.4 - Comparação entre as curvas I-V digitalizadas e as geradas pelo modelo ideal para vários níveis de radiação e temperatura padrão.

A Fig. 4.3b, permite observar de forma detalhada a divergência que se apresenta entre as curvas geradas pelo modelo ideal e as curvas obtidas do fornecedor. Pode ser observado que na primeira região (influenciada pela resistência em paralelo), para várias condições de temperatura, essa divergência foi devida à falta da resistência em paralelo. Da mesma forma, a desigualdade observada na terceira região (influenciada pela resistência em série) da curva característica da Fig. 4.3a, corresponde a ausência da resistência em série. Neste ponto, é necessário mencionar que os dados gerados pelo modelo ideal atingem os pontos de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto, uma vez que são pontos impostos na implementação do mesmo. Já na Fig. 4.4 que apresenta as curvas características para vários níveis de radiação, é possível observar que a diferenças na terceira região da curva diminuíram notoriamente, porém a primeira região ainda mostra uma disparidade considerável.

Posteriormente, foram aplicados os métodos de parametrização, a partir das propriedades físicas calculadas e geradas as curvas características para cada condição trabalhada. O modelo matemático utilizado para confeccionar a curva características de cada método, depende propriamente do modelo no qual baseou-se o autor do método proposto. Assim, foi estabelecido que para os método BLAS, *et al.* (2002), VERA (2004) e o Solver®, o modelo implementado foi o de cinco parâmetros, enquanto que para o modelo XIAO, *et al.* (2004) foi utilizado o modelo de quatro parâmetros.

Os resultados da parametrização para o modulo fotovoltaico sob condições padrão, fazendo a diferenciação de cada um dos métodos implementados é mostrado na Fig. 4.5. Onde, pode-se determinar rapidamente que os métodos analíticos não atingem a exatidão desejada neste caso.

Na Fig. 4.5, nota-se que existe uma diferença entre as forma de implementação do método GRG não linear da ferramenta Solver®, isto é devido ao explicado na Fig. 3.21, pois enquanto a curva “Solver todo” foi gerada tomando como célula objetivo a média dos erro de todos os dados, os parâmetros calculados para a curva “Solver por partes” foram obtidos fazendo a análise da média dos erros pertencentes aos dados de cada região da curva para sua respetiva propriedade dominante. É importante mencionar que a diferença entre as formas com que foram calculados os parâmetros mediante este método seria menor se o número de dados obtidos para cada região fosse igual, porém esta é uma condição que nem sempre pode ser garantida.

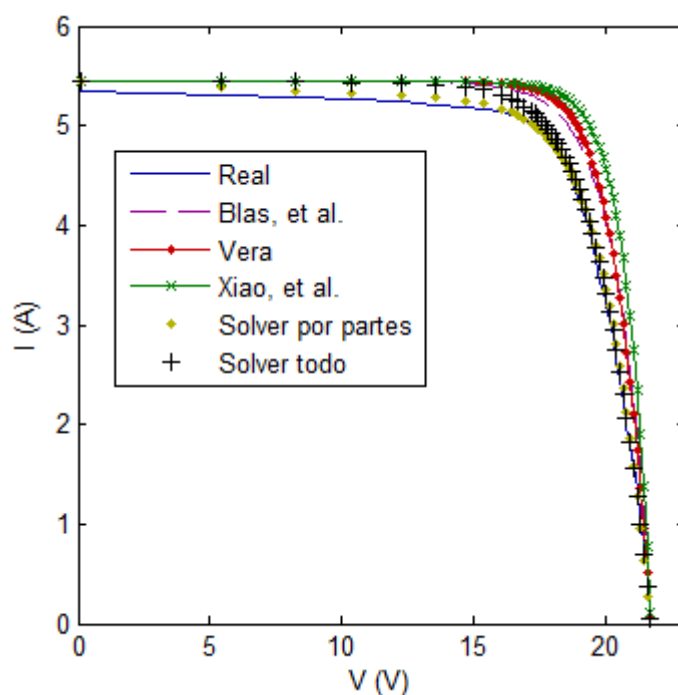


Figura 4.5 – Curva característica digitalizada e geradas a partir dos métodos de parametrização para a condição de temperatura e radiação padrão

A Tab. 4.1 apresenta os resultados da avaliação dos parâmetros do módulo fotovoltaico para os quatro métodos anteriormente mencionados. Observa-se que existe uma discrepância considerável para cada um dos parâmetros entre os métodos, sendo menor para a resistência em série.

Tabela 4.1 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos do modulo fotovoltaico Kyocera KC85T

Parâmetro	Blas, et al.	Vera	Xiao, et al.	Solver por partes
n	1,3232	1,0662	1,0674	1,3933
Rs(Ω)	0,0079	0,1057	0,0084	0,0960
Rsh(Ω)	1,773x10 ⁰⁷	4,561x10 ¹⁰	-	92,8694

Entretanto, o erro relativo aos dados digitalizados das curvas reais para cada um dos métodos de parametrização aplicados é obtido por intermédio da Eq.(4.1).

$$erro = \frac{|X_{cal_j} - X_{real_j}|}{X_{real_j}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Assim, as Figs. 4.6 e 4.7 mostram os erros das características elétricas do módulo no ponto de inflexão da curva I-V, de cada método para as diferentes temperaturas e radiações, respectivamente.

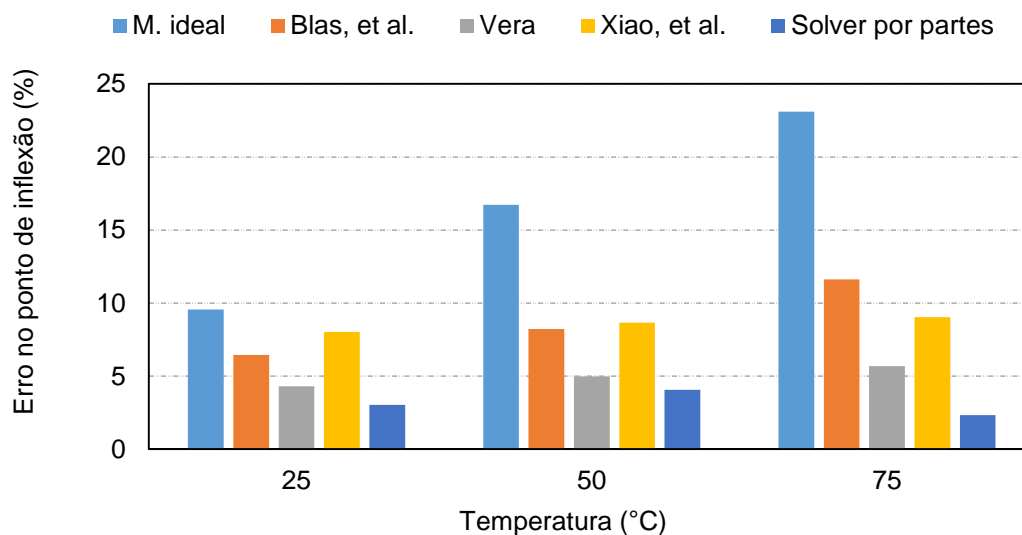


Figura 4.6 – Média dos erros dos métodos de parametrização para diferentes condições de temperatura e radiação padrão.

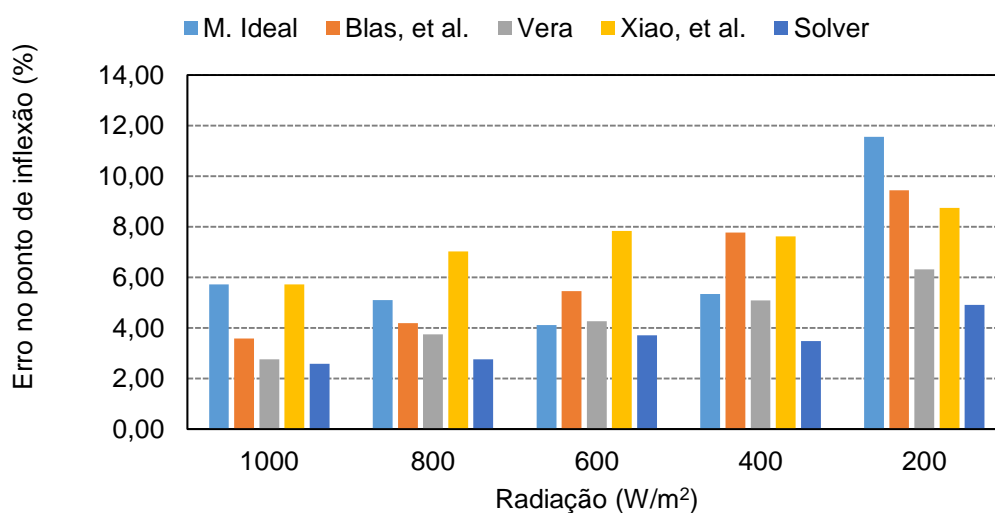


Figura 4.7 – Média dos erros dos métodos de parametrização para diferentes condições de radiação e temperatura padrão.

A variação devido às mudanças de radiação e temperatura do fator de idealidade do diodo, a resistência em série e a resistência em paralelo são mostradas nas Fig. 4.8, 4.9 e 4.10, respetivamente. Nelas, é possível verificar que para alguns métodos de avaliação, estes

parâmetros apresentam claras tendências (aumentam ou diminuem uniformemente de acordo com as variáveis), porém em alguns casos parecem mudar aleatoriamente.

A fim de facilitar o entendimento destes gráficos, as linhas dos eixos de temperatura foram traçadas na cor azul, enquanto as linhas dos eixos de radiação na cor verde. Assim, as legendas também são destacadas nas mesmas cores.

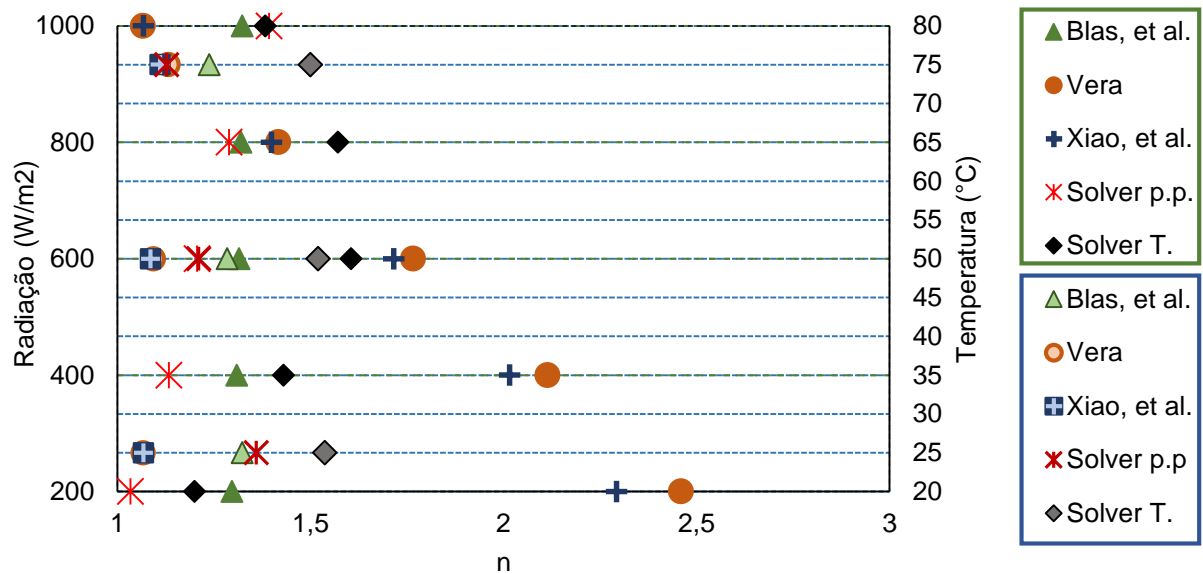


Figura 4.8 – Variação do fator de idealidade do diodo sob mudanças de radiação e temperatura para cada método de parametrização

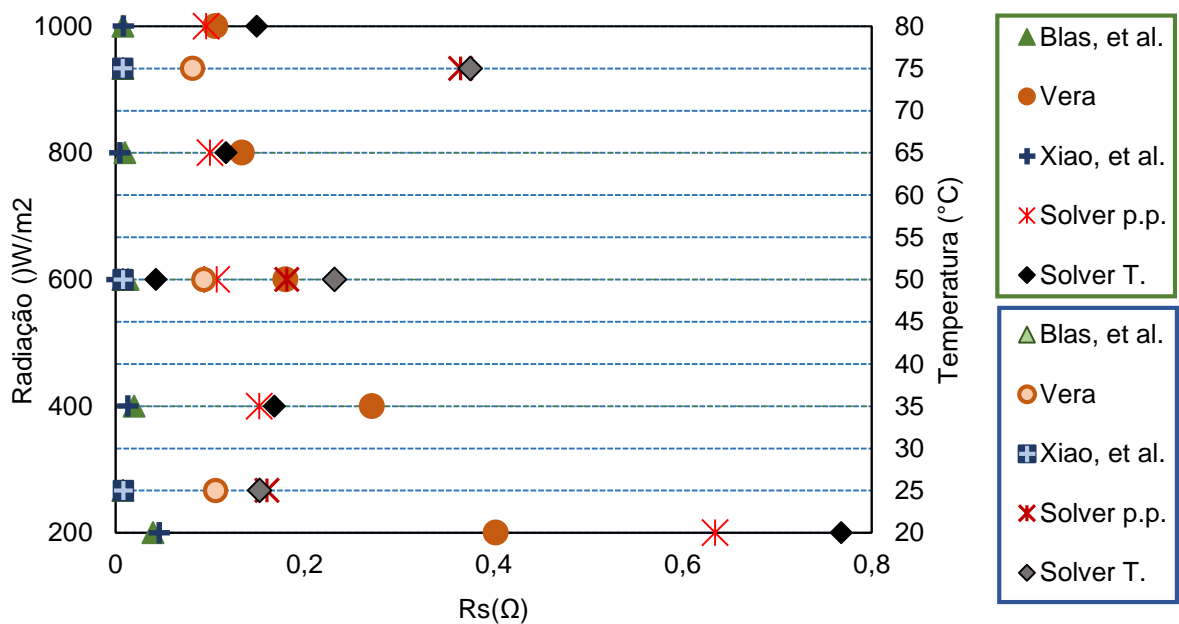


Figura 4.9 – Variação da resistência em série sob mudanças de radiação e temperatura para cada método de parametrização

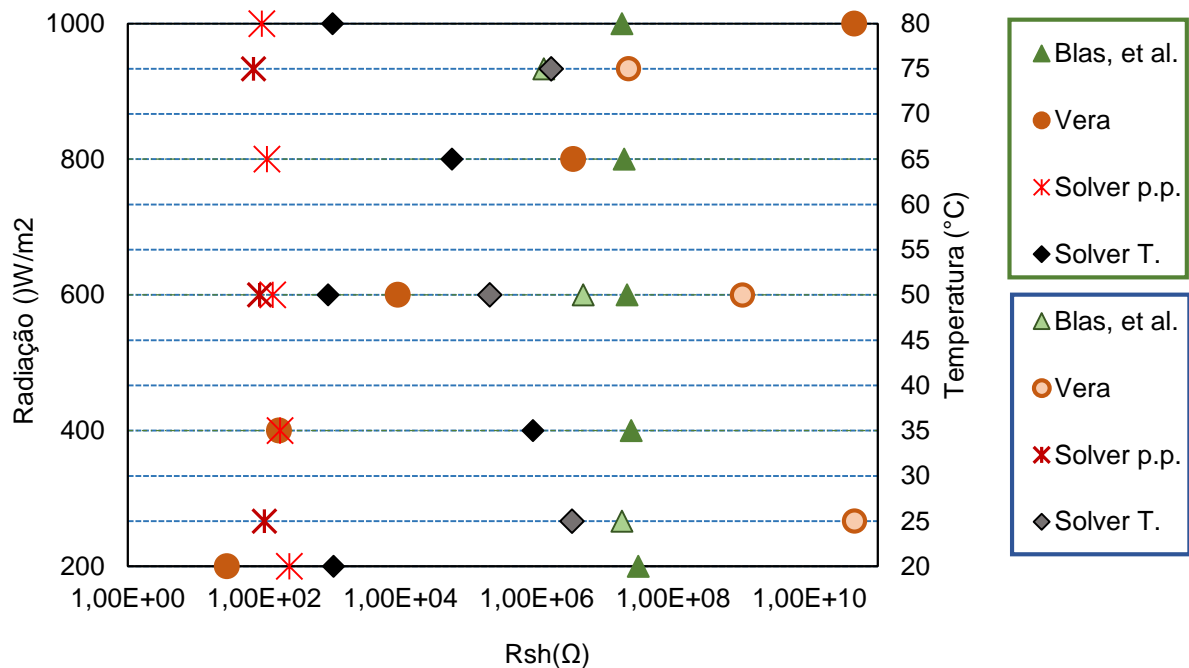


Figura 4.10 – Variação da resistência em paralelo sob mudanças de radiação e temperatura para cada método de parametrização

Na Fig. 4.8 observa-se que para as duas condições de radiação mais baixas, os dados do fator de idealidade do diodo obtidos pelos métodos de VERA (2004) e XIAO, et al. (2004) estão fora da realidade, uma vez que para um módulo de c-Si o valor deste parâmetro está compreendido entre um e dois.

A resistência em série apresentou a maior divergência de valores estimados para cada um dos métodos utilizados, sendo que a diferença entre eles é de várias ordens de grandeza, segundo mostrado na Fig. 4.10.

4.2. Célula Tripla-junção (Primeiro estudo de caso)

Uma vez que, para este primeiro estudo de caso das células tripla-junção, estavam disponíveis os parâmetros necessários para a modelagem, procede-se à análise determinando os erros dos modelos gerais (modelo ideal, de quatro e de cinco parâmetros) a partir destes dados. Nessas condições, determina-se qual o modelo de referência para realizar a comparação dos posteriores resultados da parametrização.

Não obstante, primeiro são geradas as curvas I-V para 25 °C de temperatura sob um e 350 sóis de concentração para os modelos implementados, como mostrado nas Figs. 4.11a e 4.11b, respectivamente.

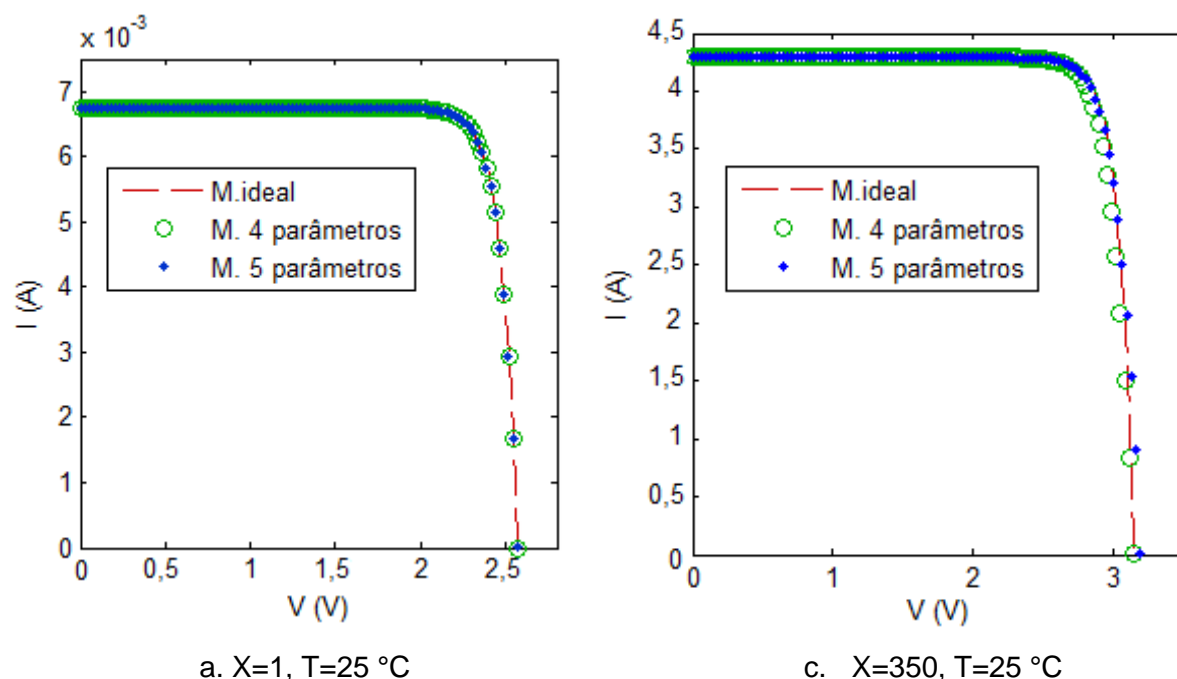


Figura 4.11 - Curvas características geradas a partir dos parâmetros da literatura (SEGEV, et al., 2012), (OTA, et al., 2010)

O cálculo dos erros do modelo ideal, do modelo de quatro parâmetros e do modelo de cinco parâmetros, deve ser realizado de maneira pontual para cada um dos dados da Tab. 3.3. Consequentemente, as Tab. 4.2 e Tab. 4.3 mostram a comparação entre as principais características operacionais determinadas por estes modelos. Os erros correspondentes a cada um deles, para 25°C de temperatura sob um e 350 sois, respectivamente.

Assim, observa-se que embora os valores das características estimadas para cada modelo sejam muito próximos, existe uma pequena discrepância entre a média dos erros de cada um (apresentado no final das tabelas), que é maior para a concentração de 350 sóis (Tab. 4.3).

Entretanto, enquanto a média dos erros é menor para o modelo de cinco parâmetros na condição de 25°C e um sol, na mesma temperatura mas sob 350 sóis de concentração é a maior. Uma explicação para este fenômeno pode estar relacionada à extração dos parâmetros utilizados na modelagem dos dispositivos fotovoltaicos, que se torna mais complexa em condições diferentes das condições padrão. Por esta razão, o modelo que apresentou a

menor média de erro para a condição que determina a norma será utilizado como referência na próxima etapa deste trabalho, ou seja o modelo de cinco parâmetros.

Tabela 4.2 – Comparação das características elétricas de uma célula tripla junção obtidas a partir modelos gerais ($X=1$, $T=25\text{ °C}$) para o primeiro estudo de caso

Caraterísticas	M. Ideal	M. 4 parâmetros	M. 5 parâmetros
V_{oc} (V)	2,5697	2,5697	2,5670
Erro (%)	1,569	1,569	1,462
I_{sc} (mA)	6,7522	6,7522	6,7522
Erro (%)	0,181	0,181	0,181
V_{mp} (V)	2,2842	2,2842	2,2818
I_{mp} (mA)	6,4627	6,4618	6,4619
P_{mp} (mW)	14,762	14,760	14,744
Erro (%)	1,982	1,968	1,858
FF	0,85078	0,85067	0,85066
Erro (%)	0,209	0,196	0,1955
Média do erro (%)	0,9852	0,9785	0,9241

Tabela 4.3 – Comparação das características elétricas de uma célula tripla junção obtidas a partir modelos gerais ($X=350$, $T=25\text{ °C}$) no primeiro estudo de caso

Caraterísticas	M. Ideal	M. 4 parâmetros	M. 5 parâmetros
V_{oc} (V)	3,1439	3,1442	3,1928
Erro (%)	1,753	1,473	0,22
I_{sc} (mA)	4,2920	4,2920	4,2919
Erro (%)	0,371	0,371	0,377
V_{mp} (V)	2,7946	2,7631	2,7736
Erro (%)	1,771	2,878	2,5113
I_{mp} (mA)	4,1507	4,1158	4,1479
Erro (%)	1,525	2,353	1,5922
P_{mp} (mW)	11,6	11,372	11,5044
Erro (%)	3,33	5,25	4,1301
FF	0,85963	0,8427	0,8395
Erro (%)	1,195	3,137	3,5024
Média do erro (%)	1,657	2,577	2,0555

A Fig. 4.12 mostra as curvas I-V, para cada uma das subcélulas que compõe a célula multi junção, obtidas do modelo de cinco parâmetros para as duas condições de concentração mencionadas.

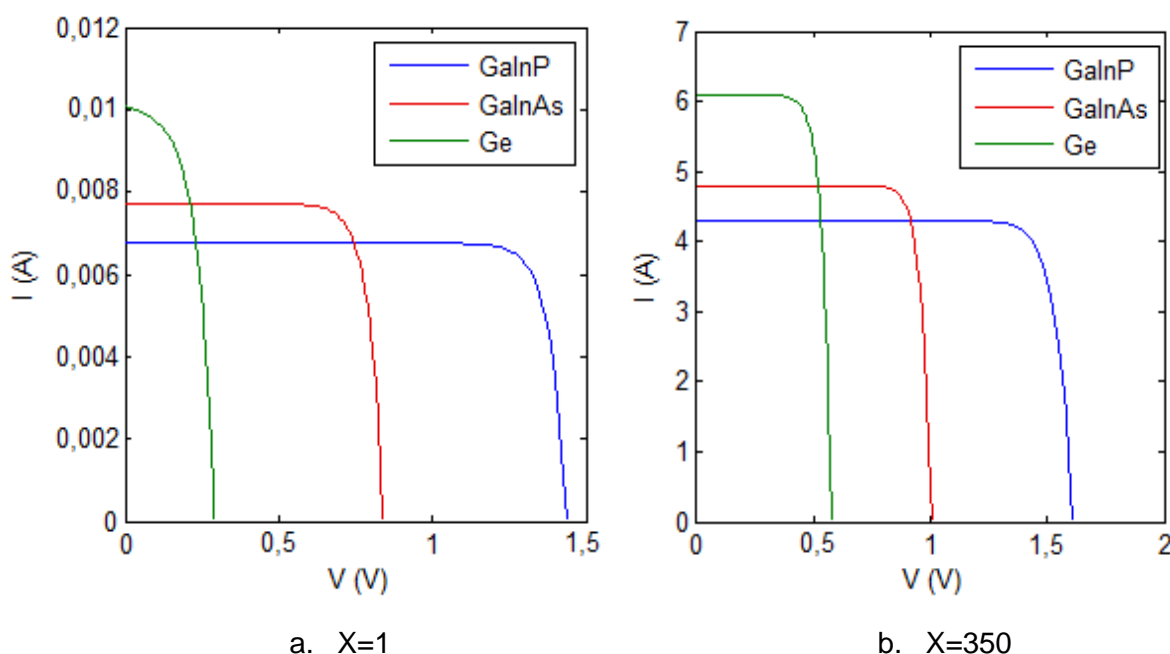


Figura 4.12 - Curvas características para cada junção da célula tripla junção na temperatura padrão

4.2.1. Parametrização sem concentração

De maneira similar ao realizado com o modulo de c-Si, foram aplicados os métodos de parametrização descritos no capítulo III, para cada uma das camadas da célula multi junção. Os resultados deste procedimento para as condições de temperatura e radiação padrão, são mostrados na Fig. 4.13. Nela, é evidente que as curvas características obtidas para cada subcélula, quando implementado o método de parametrização implementado por VERA (2004), não atingiram os resultados esperados, razão pela qual para esta condição de trabalho, o método não será considerado na análise a seguir.

A Tab. 4.4 mostra os parâmetros estimados para cada uma das subcélulas que compõe a célula de tripla junção nas condições de radiação e temperatura padrão, apenas para os métodos de parametrização que serão considerados nesta parte do estudo.

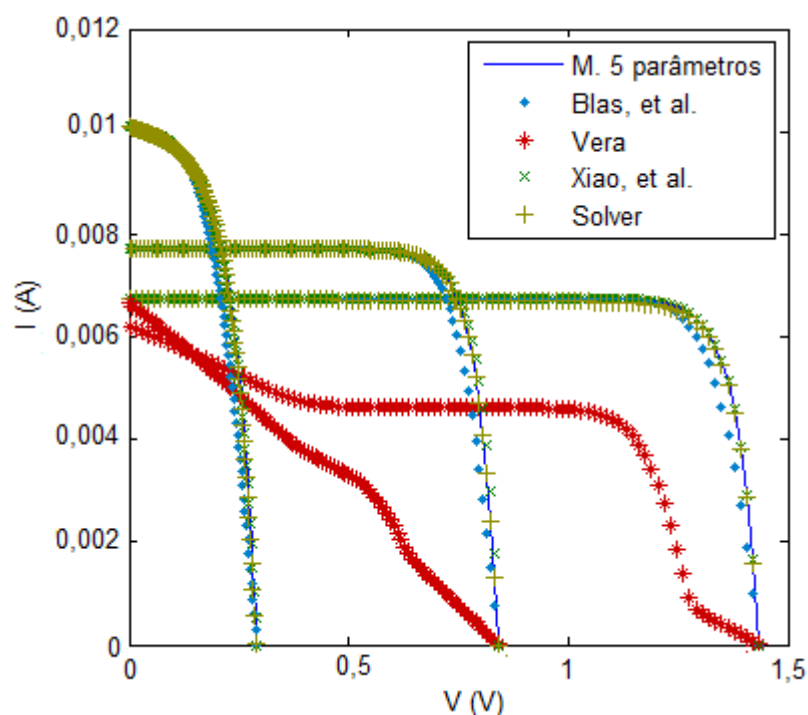


Figura 4.13 - Curvas características de cada junção da célula tripla junção geradas a partir dos métodos de parametrização a 25 °C e um sol.

Tabela 4.4 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos de cada subcélula para 25°C e X=1

GaInP			
Parâmetro	Blas, et al.	Xiao, et al.	Solver
n	1,7521	1,7655	1,9711
$R_s(\Omega)$	7,5069	2,578	$2,3517 \times 10^{-5}$
$R_{sh}(\Omega)$	$2,2842 \times 10^{16}$	-	$1,829 \times 10^7$
GaInAs			
n	1,485	1,4942	1,751
$R_s(\Omega)$	5,8348	2,5562	$1,469 \times 10^{-3}$
$R_{sh}(\Omega)$	$1,1326 \times 10^{12}$	-	$2,055 \times 10^9$
Ge			
n	1,5567	1,6015	1,9548
$R_s(\Omega)$	5,6538	3,3153	0
$R_{sh}(\Omega)$	$1,3484 \times 10^6$	-	27,45

Uma vez obtidos os valores dos parâmetros para cada uma das subcélulas, prosseguiu-se o cálculo do erro de implementação dos métodos de parametrização em relação ao modelo de cinco parâmetros em cada um dos pontos da curva I-V.

A Fig. 4.14a mostra a distribuição dos erros obtidos para a subcélula GaInP em função da tensão para todos os métodos analisados. Entretanto, pelo fato do erro do método de BLAS, *et al.* (2002) ser elevado quando comparado com os outros, este gráfico não permite caracterizar a diferença entre os erros dos outros dois métodos. Por esta razão foi implementada a Fig.4.14b.

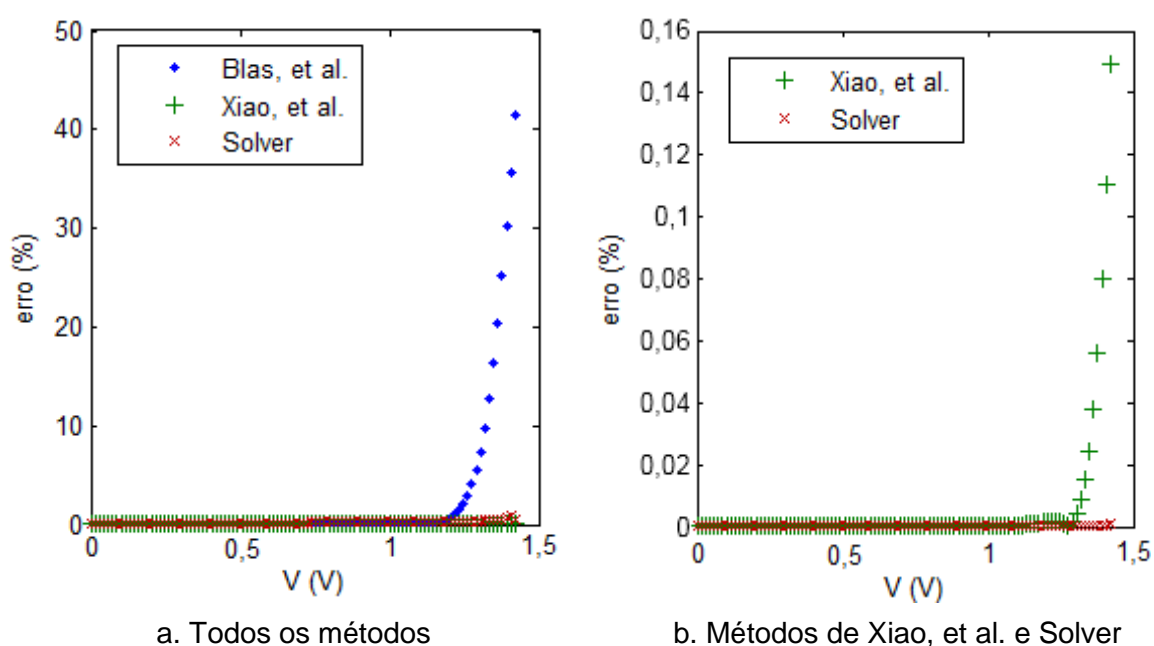


Figura 4.14 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula GaInP (T=25 °C, X=1)

De forma análoga ao mostrado anteriormente na Fig. 4.15, é possível verificar a distribuição dos erros para a subcélula GaInAs. Assim, a Fig. 4.15a destaca o erro devido aos métodos XIAO, et al. (2004) e Solver®.

Nesse sentido, observa-se que tanto para a subcélula de GaInP como para a subcélula GaInAs, o menor erro em cada um dos pontos foi obtido pelo método GRG não linear, mediante a ferramenta Solver®. Além disso, pode ser verificado que para os métodos de BLAS, *et al.* (2002) e XIAO, et al. (2004) o erro começa a aumentar depois do ponto de inflexão das curvas mostradas na Fig. 4.12.

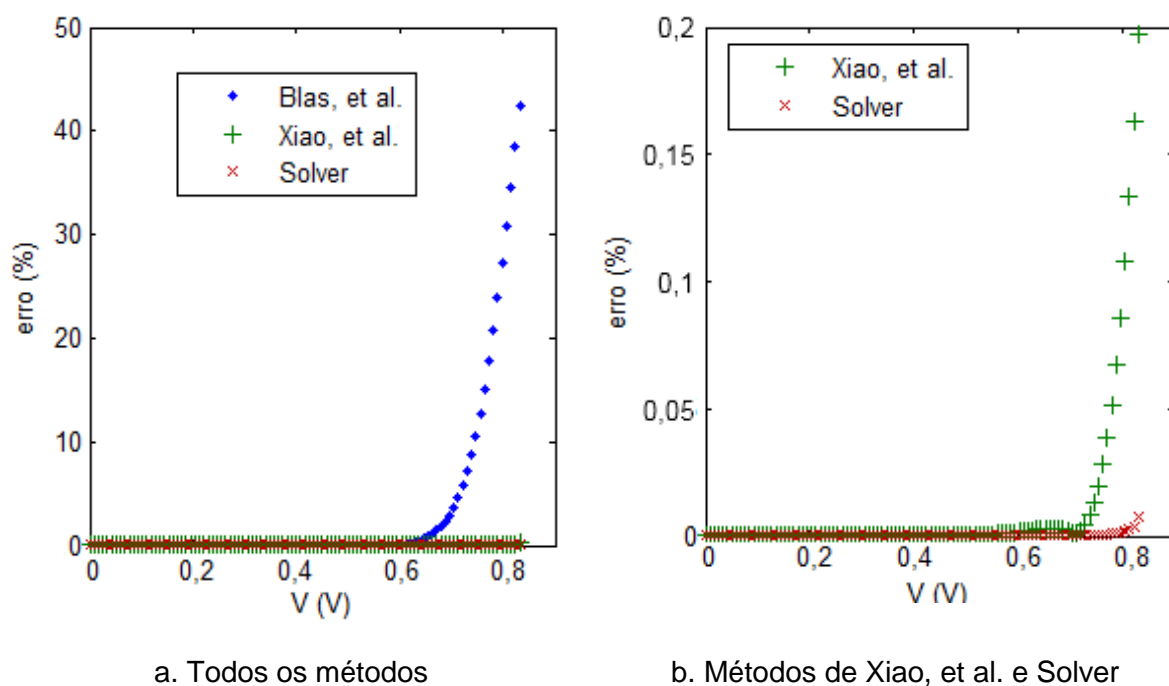


Figura 4.15 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula GaInAs ($T=25^\circ\text{C}$, $X=1$)

Como pode ser observado na Fig. 4.16, ao contrário das outras subcélulas, o Solver® já não é mais o método que apresenta o menor erro para a subcélula de Ge.

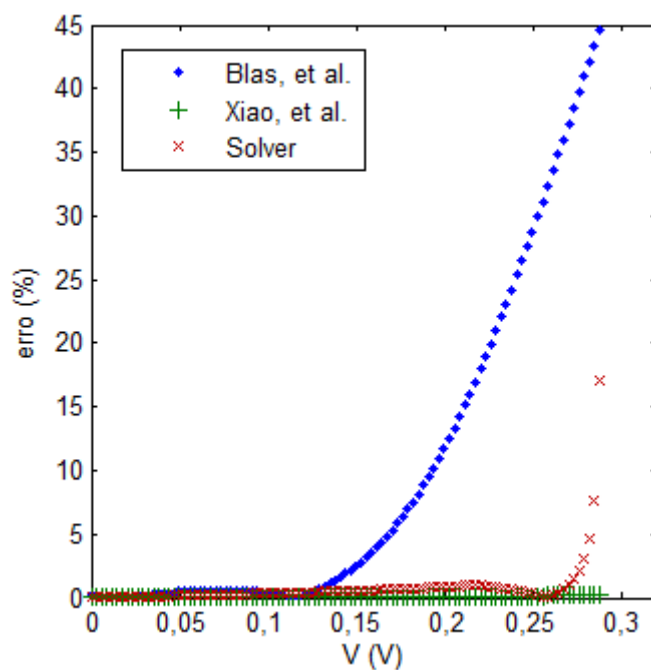


Figura 4.16 - Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula Ge ($T=25^\circ\text{C}$, $X=1$)

Finalmente, foi realizada a parametrização para a célula multi junção de maneira geral. Os dados obtidos deste procedimento são mostrados na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos da célula tripla junção para 25°C e X=1 para o primeiro estudo de caso

Parâmetro	Blas, et al.	Xiao, et al.	Solver
n	3,9626	3,9501	3,528
$R_s(\Omega)$	17,577	6,7081	0,01305
$R_{sh}(\Omega)$	$6,5681 \times 10^{13}$	-	$3,395 \times 10^{10}$

Como consequência, a Fig. 4.17 mostra as curvas I-V geradas para todos os métodos de parametrização implementados.

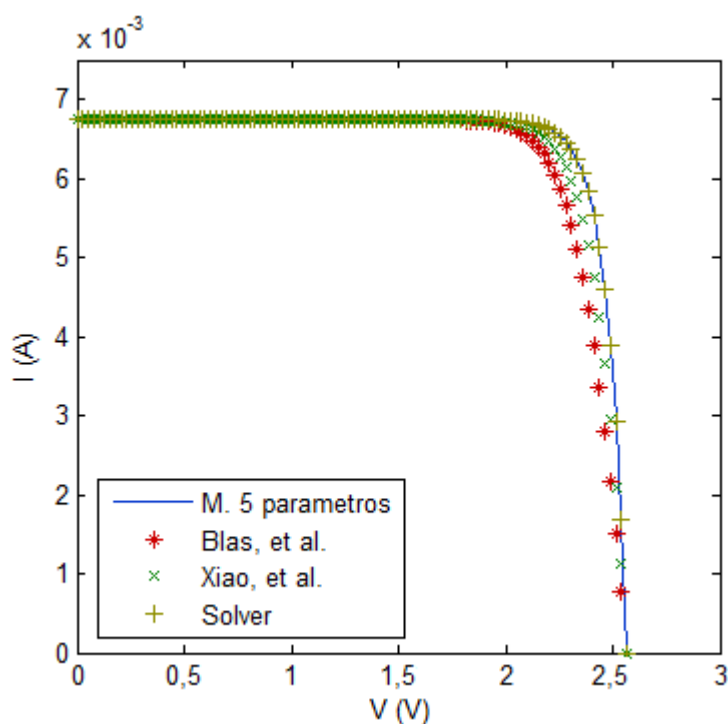


Figura 4.17 - Curva característica da célula tripla junção sob 25 °C e 1000W/m².

O erro relativo calculado em cada ponto da curva I-V para todos os métodos de parametrização é mostrado na Fig. 4.18a. Conforme ocorrido com as subcélulas de GaInP e GaInAs (um dos erros é muito maior que os outros) é necessário construir outro gráfico que permita observar as diferenças entre os métodos que apresentaram o menor erro. Na Fig. 4.18b, é possível comprovar que os erros para a célula tripla junção (como elemento único) seguem o mesmo comportamento para as subcélulas de GaInP e GaInAs.

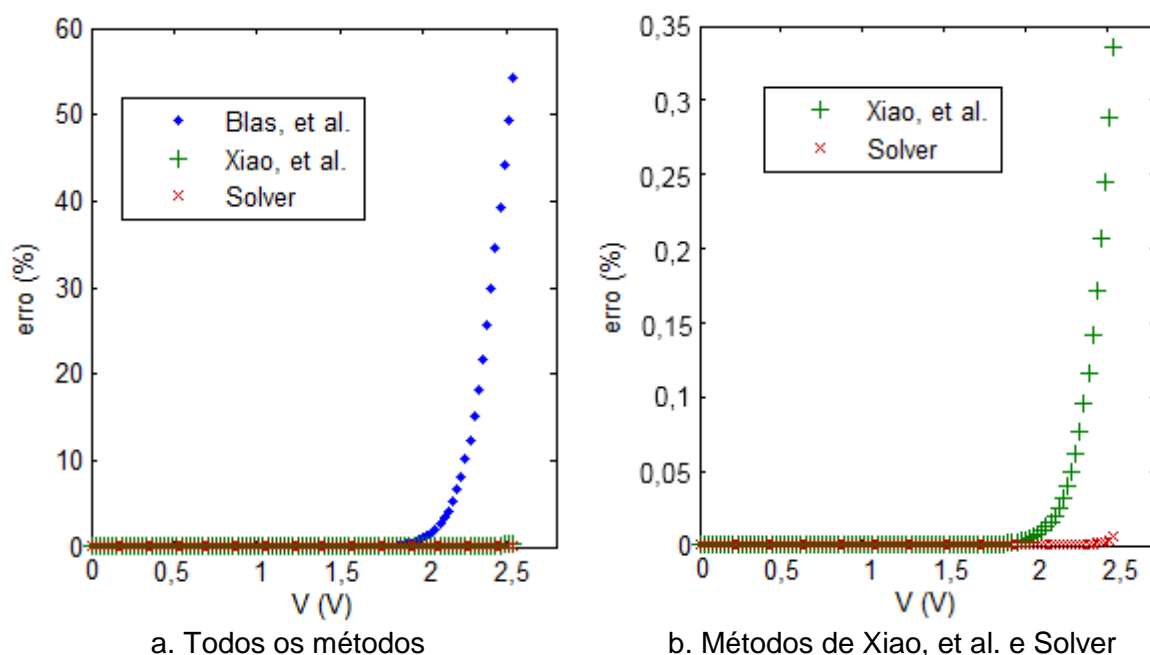


Figura 4.18 – Erro relativo dos métodos de parametrização da célula tripla junção ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=1$) para o primeiro estudo de caso

4.2.2. Parametrização para concentração de 350 sóis

Conforme mencionado anteriormente, os parâmetros físicos próprios dos dispositivos fotovoltaicos, mudam em diferentes condições de radiação e temperatura. Por esta razão é necessário aplicar os métodos de parametrização quando uma destas variáveis seja alterada.

Assim, foram implementados todos os métodos de parametrização utilizados anteriormente, com o objetivo de estimar as propriedades de cada uma das subcélulas da célula tripla junção, na concentração de 350 sóis, conforme mostra a Fig. 4.19.

É observado que, similarmente à condição sem concentração, os resultados obtidos para o método de parametrização do trabalho de VERA (2004) são muito inferiores aos desejados, motivo pelo qual este método também estará fora da análise de erros a seguir.

A Tab. 4.6 mostra os parâmetros de cada uma das subcélulas, calculados pelos os métodos em análise para uma temperatura de 25 °C e concentração de 350 sóis.

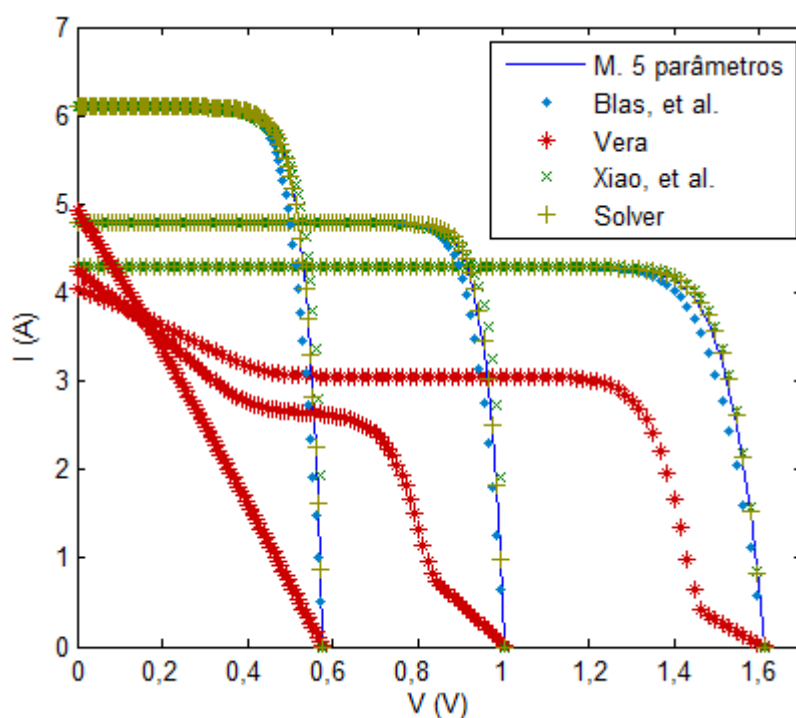


Figura 4.19 - Curvas características para cada junção da célula tripla junção a 25 °C e 350 sóis.

Tabela 4.6 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos de cada subcélula para 25°C e X=350 para o primeiro estudo de caso

GaInP			
Parâmetro	Blas, et al,	Xiao, et al,	Solver
n	2,1307	2,1226	1,995
$R_s(\Omega)$	0,0145	0,0024	$6,341 \times 10^{-03}$
$R_{sh}(\Omega)$	$3,672 \times 10^{12}$	-	587,0
GaInAs			
n	1,3087	1,3136	1,276
$R_s(\Omega)$	0,0080	0,0031	$2,52 \times 10^{-03}$
$R_{sh}(\Omega)$	$2,9906 \times 10^{12}$	-	389,0
Ge			
n	1,1974	1,2043	1,4201
$R_s(\Omega)$	0,0061	0,0029	$2,45 \times 10^{-04}$
$R_{sh}(\Omega)$	$5,0611 \times 10^{07}$	-	100,1

É possível identificar algumas diferenças na forma que variam os parâmetros calculados por cada método entre a Tab. 4.4 e a Tab. 4.6 (sem concentração e sob concentração de 350 sóis). Por exemplo, na condição sem concentração as magnitudes do fator de idealidade do diodo mantêm as mesmas relações entre subcélulas para todos os métodos. Ou seja o fator de idealidade do diodo da subcélula de GaInP foi sempre maior, assim como o da subcélula de GaInAs foi sempre o menor. Porém, embora para a concentração de 350 sóis o fator de idealidade do diodo calculado com o Solver® conserve a mesma ordem de grandeza para cada subcélula, o mesmo não ocorre não para os outros métodos.

Entretanto, da mesma forma que realizado na condição sem concentração, o cálculo do erro relativo foi realizado de maneira pontual em função da tensão de cada subcélula. Assim, o erro obtido para as subcélula de GaInP, GaInAs e Ge na concentração de 350 sóis é mostrado nas Figs. 4.20, 4.21 e 4.22, respetivamente.

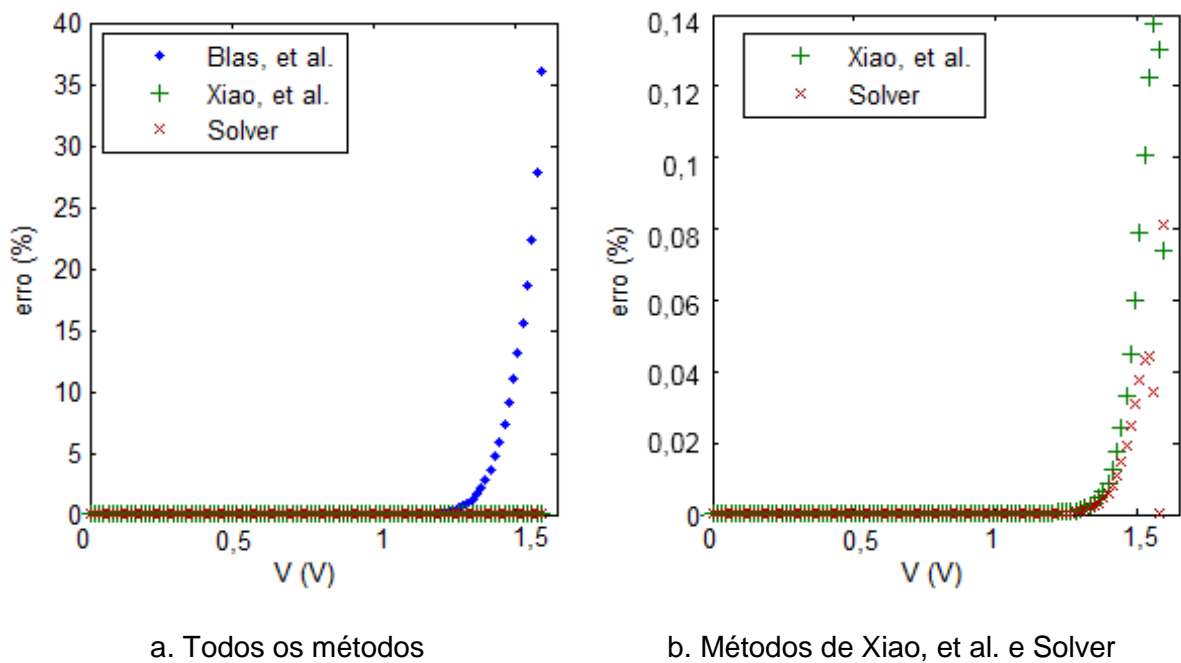
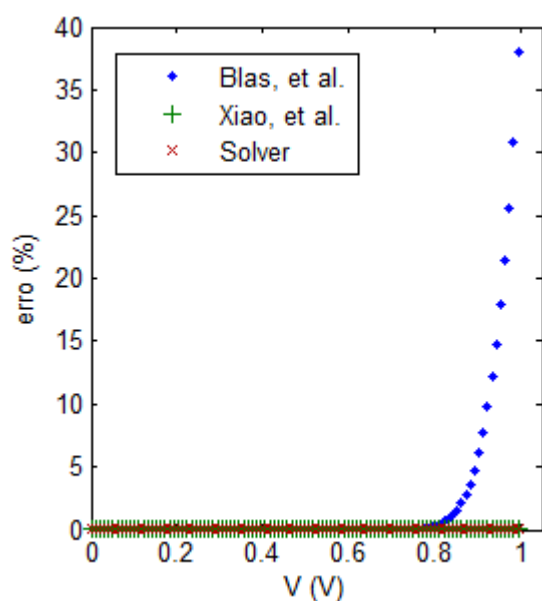
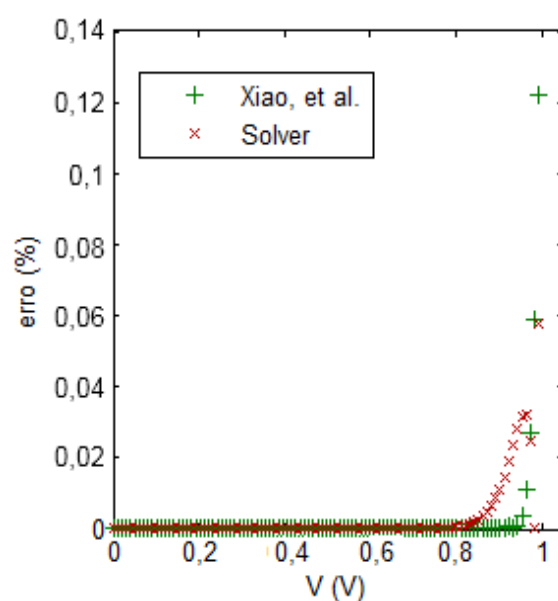


Figura 4.20 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula GaInP (T=25 °C, X=350)

Por outro lado, os parâmetros para a célula tripla junção (sem fazer diferenciação entre suas camadas) estimados mediante os diferentes métodos de parametrização avaliados, sob concentração de 350 sóis, são mostrados na Tab. 4.7.

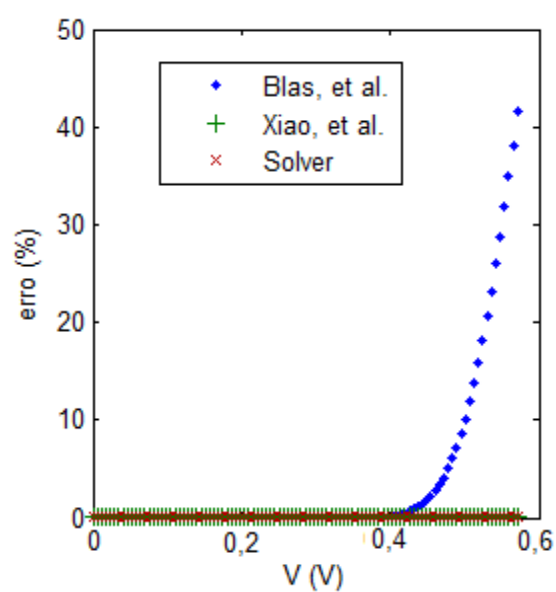


a. Todos os métodos

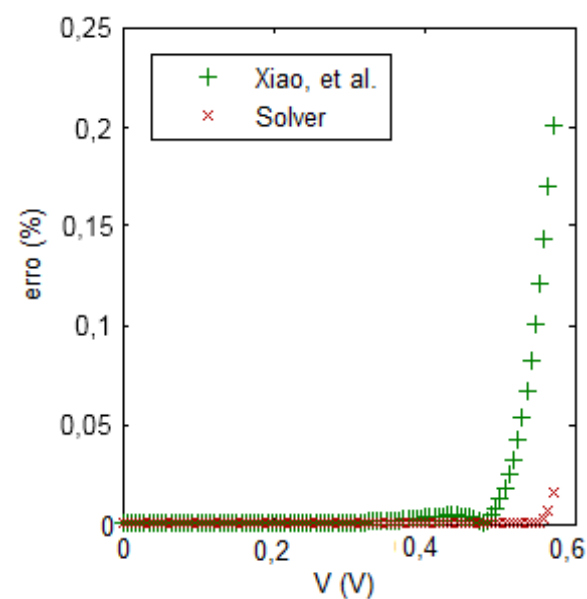


b. Métodos de Xiao, et al. e Solver

Figura 4.21 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula GaInAs ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=350$)



a. Todos os métodos



b. Métodos de Xiao, et al. e Solver

Figura 4.22 – Erro relativo dos métodos de parametrização para a subcélula Ge ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=350$)

Com base nos dados apresentados na Tab. 4.7, foram geradas as curvas I-V da célula multi junção com concentração de 350 sóis, para cada um dos métodos de parametrização analisados, de acordo com a Fig. 4.23.

Tabela 4.7 – Comparação entre os métodos de estimação dos parâmetros intrínsecos da célula tripla junção para 25°C e X=350

Parâmetro	M. ideal	Blas, et al.	Xiao, et al.	Solver
n	4,9548	4,354	4,333	4,792
$R_s(\Omega)$	-	0,0296	0,002119	0,002032
$R_{sh}(\Omega)$	-	$3,4258 \times 10^{12}$	-	$1,56 \times 10^3$

Na análise de erros da curva característica da célula tripla junção sob 350 sóis de concentração, gerada para os diferentes métodos de parametrização, apresentada na Fig. 4.24, é possível identificar algumas diferenças quando comparada com os erros gerados para uma concentração nula.

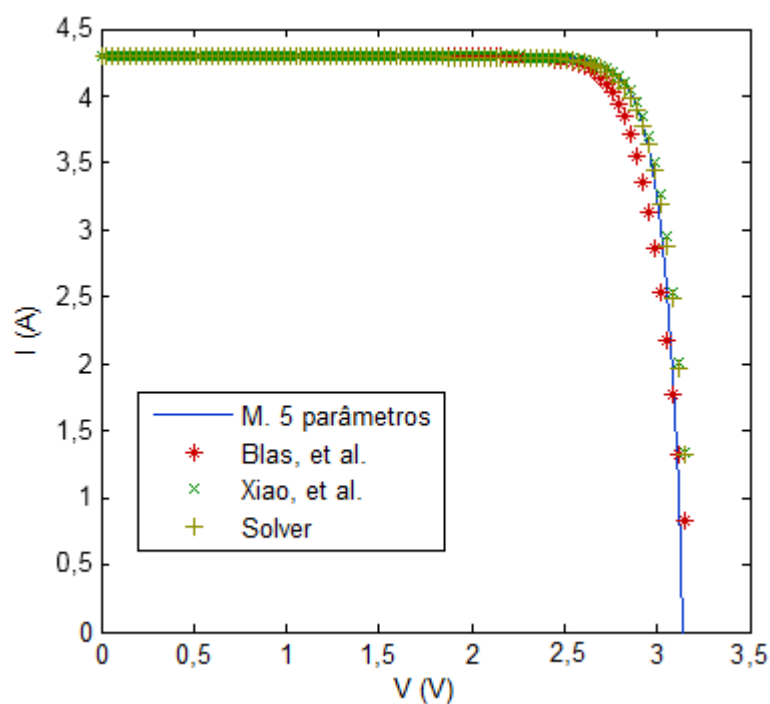
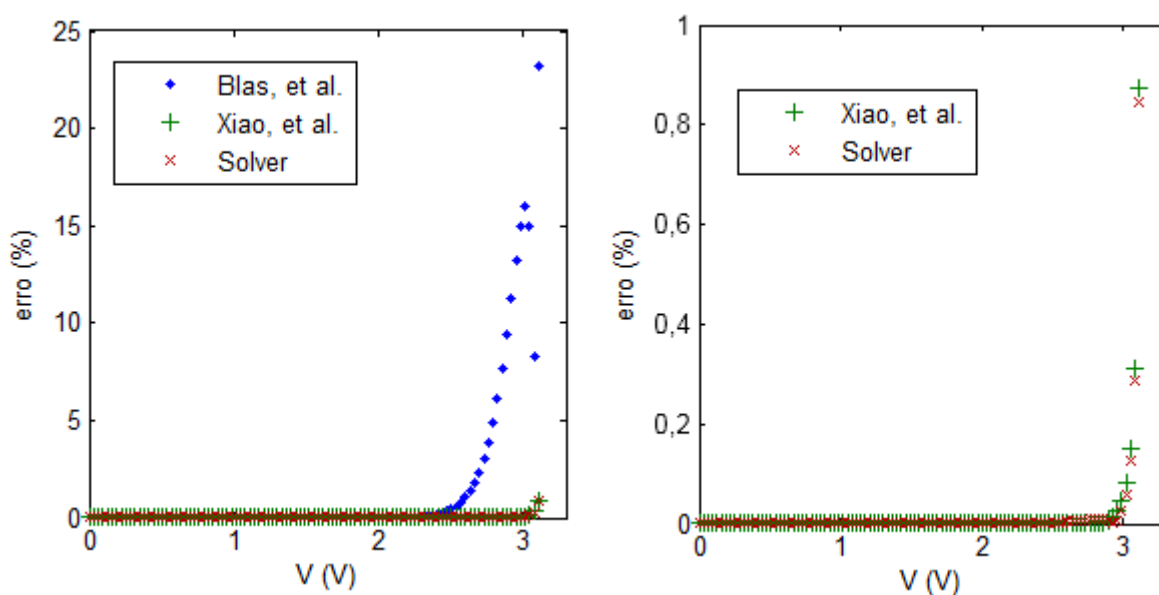


Figura 4.23 - Curva característica da célula tripla junção sob 25 °C e 350 sóis para o primeiro estudo de caso

Desta forma, observa-se que enquanto o erro máximo gerado pelo método de BLAS, *et al.* (2002) apresenta uma queda de aproximadamente 45% para a concentração de 350 sóis. O erro máximo obtido do método de XIAO, *et al.* (2004) supera os 250% e o erro máximo da ferramenta Solver® ultrapassa o anterior. Contudo, o erro apresentado pelo solver continua sendo o menor.



a. Todos os métodos

b. Métodos de Xiao, et al. e Solver

Figura 4.24 – Erro relativo dos métodos de parametrização da célula tripla junção ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X=350$)

4.2.3. Caracterização (modelos especializados)

Os modelos específicos ou especializados de FERNÁNDEZ (2012) e DOMÍNGUEZ, et al. (2010) para caracterização de dispositivos fotovoltaicos multi junção, oferecem a vantagem de não necessitarem de parametrização prévia (como no caso dos modelos gerais), pois os valores das propriedades necessárias na implementação dos modelos são fornecidas como parâmetros de ajuste.

O modelo de FERNÁNDEZ (2012) foi implementado para as duas condições de concentração (1 e 350) que foram analisadas anteriormente. Entretanto, uma vez que o modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) foi proposto com o objetivo de deslocar a curva I-V desde uma condição de referência para outra desejada, os valores na condição sem concentração foram fornecidos como referência. Assim, só serão analisados os resultados obtidos no deslocamento da curva I-V para a concentração de 350 sóis.

Desta forma, na Fig. 4.25 são mostradas as curvas características da célula tripla junção para $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura e concentrações de 1 e 350 sóis, geradas pelo modelo de FERNÁNDEZ (2012) em comparação com as curvas geradas pelo modelo de cinco parâmetros.

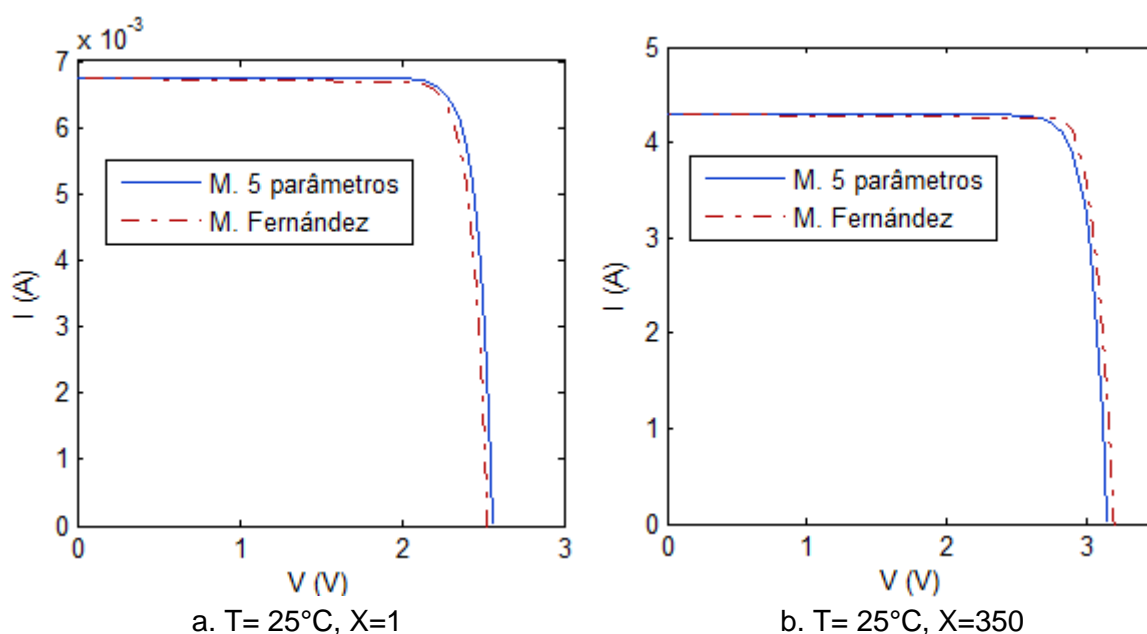


Figura 4.25 – Curva característica para uma célula tripla junção para diferentes modelos

Conforme proposto no capítulo anterior, o critério de convergência para o cálculo das propriedades faltantes para a implementação do modelo é o ponto de inflexão da curva. Por tal motivo, na Fig. 4.26 é mostrado a relação desse ponto, como o parâmetro iterativo (m).

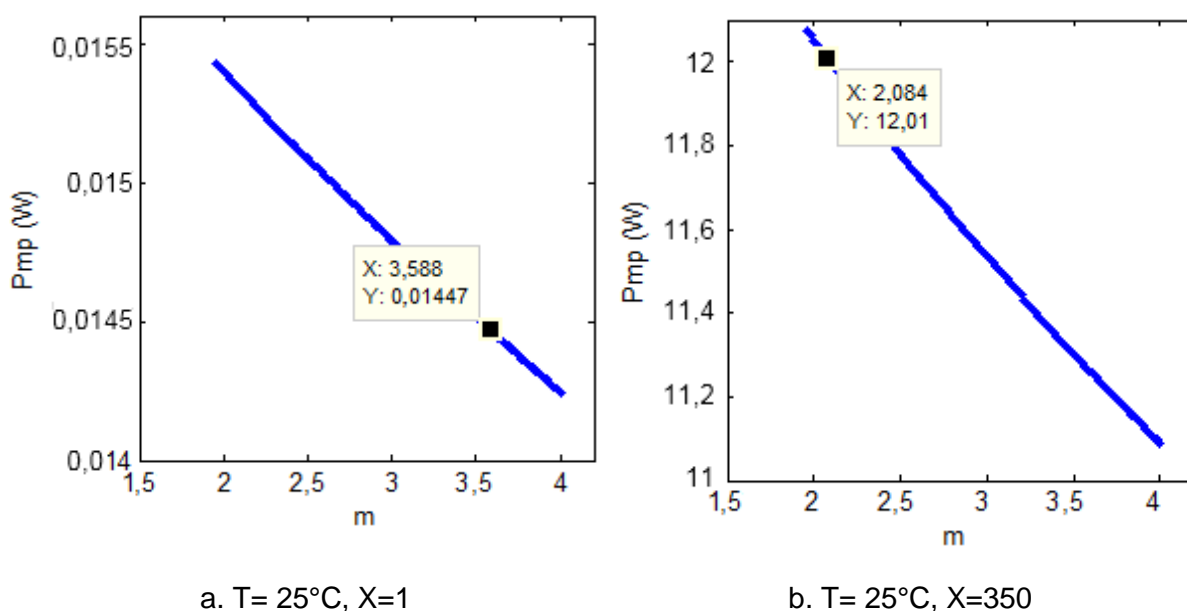


Figura 4.26 – Dependência do ponto de máxima potência com o fator de idealidade do diodo para o modelo de Fernández (2012) no primeiro estudo de caso

Conforme mencionado no Capítulo III, foram testadas duas metodologias para realizar a iteração do fator de idealidade do diodo. Uma, segundo a recomendação do autor, e a outra baseado na Eq.(3.3). Consequentemente, nas Tab. 4.8 e Tab. 4.9, são mostradas as principais diferenças entre as metodologias implementadas para a concentração de 1 e 350 sóis, respetivamente.

Tabela 4.8 – Comparação dos resultados obtidos entre os métodos de estimação do fator de idealidade do diodo no modelo de Fernández (2012) da célula tripla junção para 25°C e X=1

Caraterísticas	Método do Autor	Método baseado nas Eq.
Tempo (s)	406,48	331, 20
m	3,5467	3,5878
V _{oc} (V)	2,53	2,53
I _{sc} (mA)	6,7522	6,7522
V _{mp} (V)	2,236	2,2326
I _{mp} (mA)	6,4794	6,4794
P _{mp} (mW)	14,762	14,466
Erro (%)	0,087051	0,064774
FF	0,84807	0,84678
Erro (%)	0,10954	0,26148

Tabela 4.9 – Comparação dos resultados obtidos entre os métodos de estimação do fator de idealidade do diodo no modelo de Fernández (2012) da célula tripla junção para 25°C e X=350

Caraterísticas	Método do Autor	Método baseado nas Eq.
Tempo (s)	33,170	129,72
m	2,0836	2,074
V _{oc} (V)	3,2	3,2
I _{sc} (A)	4,292	4,292
V _{mp} (V)	2,8549	2,856
Erro (%)	0,34798	0,38664
I _{mp} (A)	4,2053	4,205
Erro (%)	0,2301	0,2372
P _{mp} (W)	12,006	12,01
Erro (%)	0,05	0,0833
FF	0,87414	0,87453
Erro (%)	0,475	0,5206

A partir dos dados apresentados anteriormente é possível observar que mesmo nos dois métodos utilizados para determinar o valor do fator de idealidade do diodo, o erro em todas as propriedades avaliadas foi menor que para qualquer um dos modelos gerais (Tab. 4.2 e Tab. 4.3). Sendo obtido o menor erro quando implementada a metodologia sugerida pelo autor do modelo.

Por outro lado, a Fig. 4.27 mostra as curvas I-V da célula tripla junção incluindo o modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) para a concentração de 350 sóis. Neste gráfico é realizada uma ampliação da imagem, a fim de diferenciar o ponto de tensão onde começa a curva característica para o modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010).

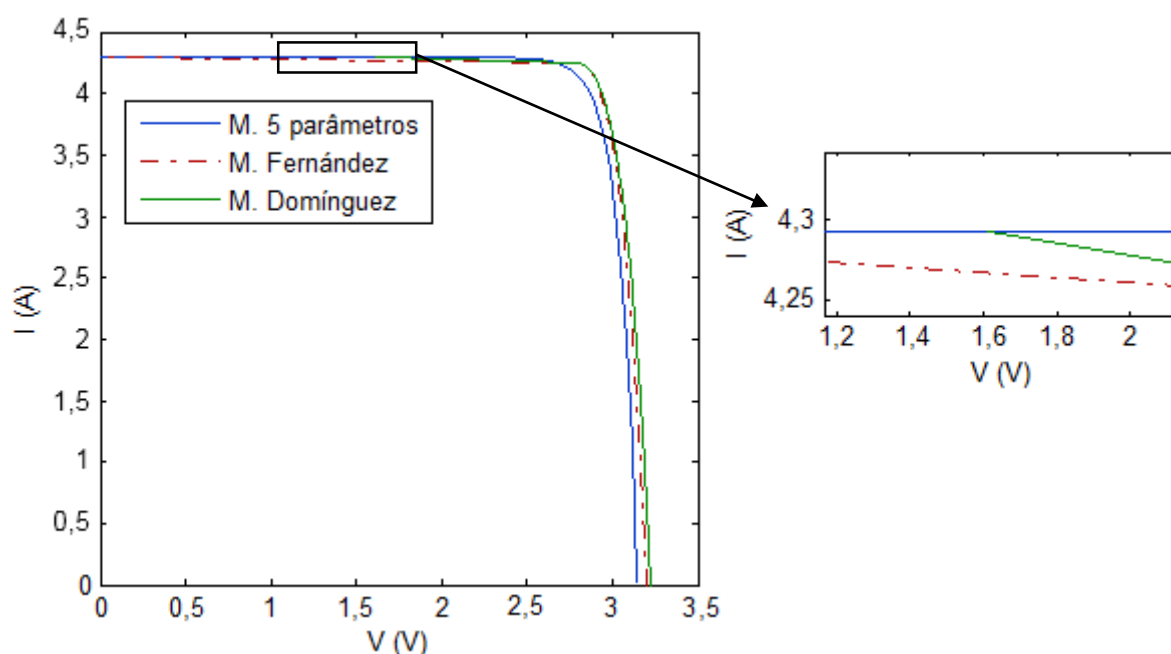


Figura 4.27 – Comparação da curva característica da célula tripla junção geradas pelos modelos especializados para 25 °C e 350 sóis

Embora que o nível de concentração estabelecido seja de 350 sóis, no momento em que foi realizado o cálculo da mesma, com a aplicação da Eq.(3.25), obteve-se um resultado diferente, razão pela qual é possível afirmar que o número de 350 está relacionado à concentração ótica.

As características operacionais da célula tripla junção estimadas pelo modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) são mostradas na Tab. 4.10.

Tabela 4.10 – Características elétricas da célula tripla junção para 25°C e X=350 obtidas do modelo especializado de DOMÍNGUEZ, et al. (2010)

Caraterísticas	Valor
V_{oc} (V)	3,2234
I_{sc} (A)	4,292
V_{mp} (V)	2,8575
Erro (%)	0,4393
I_{mp} (A)	4,2053
Erro (%)	0,2301
P_{mp} (W)	12,017
Erro (%)	0,14167
FF	0,86858
Erro (%)	0,1632

4.3. Célula Tripla-junção (Segundo estudo de caso)

No segundo estudo de caso aplicado das células multi junção, tem-se quatro diferentes condições de temperatura e quatro diferentes condições de concentração. Isto servirá para avaliar principalmente o modelo específico de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) e também para observar de maneira detalhada a forma em que mudam os parâmetros intrínsecos das células multi junção, em relação às variáveis anteriormente mencionadas.

Desta forma, primeiramente foram calculadas as características operacionais para cada uma das condições de trabalho a partir do modelo de cinco parâmetros, como mostrado na Tab. 4.11.

4.3.1. Parametrização

De acordo com os resultados mostrados para o primeiro estudo de caso das células tripla junção, nesta seção foram aplicados somente os métodos de parametrização que obtiveram o menor erro relativo, ou seja o método proposto por XIAO, et al. (2004) e o método para determinação de parâmetros com o uso do complemento Solver do Excel®.

Assim, de maneira semelhante ao procedimento realizado com o módulo de c-Si, foram confeccionadas as curvas I-V da célula tripla junção. As mesmas foram geradas a partir dos métodos de parametrização, em contraste com as curvas caraterísticas obtidas do modelo de

cinco parâmetros, para as diferentes condições de temperatura e concentração, conforme ilustra a Fig. 4.28.

Tabela 4.11 – Características operacionais da célula tripla junção obtidas a partir modelos de cinco parâmetros para diferentes condições de temperatura e concentração

Parâmetro	T(°C) \ X	350	555	700	900
V_{oc} (V)	10	3,4131	3,4383	3,4706	3,4859
	25	3,1442	3,2033	3,2281	3,2495
	80	2,4560	2,4910	2,5347	2,5459
	95	2,3200	2,3442	2,3694	2,3994
I_{sc} (A)	10	4,2984	6,8159	8,4942	10,956
	25	4,3357	6,8531	8,5501	10,993
	80	4,4848	7,0956	8,8671	11,422
	95	4,5035	7,1702	8,9604	11,534
V_{mp} (V)	10	3,0684	3,0910	3,120	3,0985
	25	2,8266	2,8473	2,8694	2,888
	80	2,1335	2,1388	2,1763	2,1859
	95	1,9684	1,9890	2,0104	2,0358
I_{mp} (A)	10	4,2152	6,6374	8,2509	10,738
	25	4,2091	6,6816	8,3288	10,690
	80	4,3271	6,8776	8,5729	11,049
	95	4,3774	6,9403	8,6571	11,114
P_{mp} (W)	10	12,934	20,516	25,743	33,271
	25	11,898	19,025	23,899	30,877
	80	9,2319	14,709	18,657	24,153
	95	8,6167	13,805	17,404	22,626
FF	10	0,88158	0,87545	0,87324	0,87118
	25	0,87274	0,86665	0,86588	0,86437
	80	0,83815	0,83221	0,83010	0,83058
	95	0,8255	0,82129	0,81977	0,81758

Na Fig. 4.28 observa-se, que enquanto a tensão apresenta maior sensibilidade às mudanças de temperatura, para a corrente o nível de concentração é a variável que mais influência mais no seu comportamento.

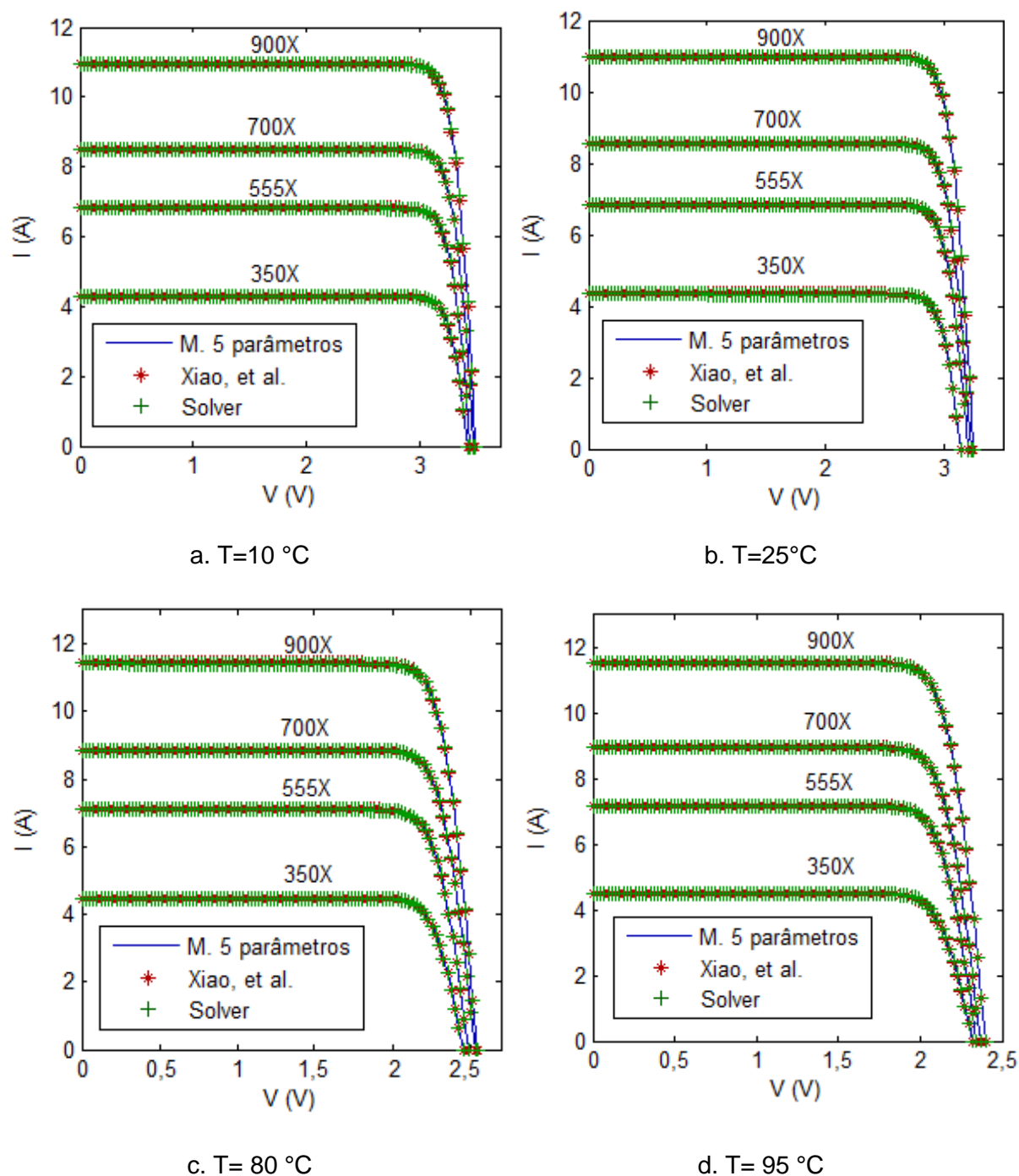


Figura 4.28 – Curva características da célula tripla junção para várias condições de temperatura e concentração (segundo estudo de caso).

Os erros relativos ao modelo de cinco parâmetros, para os métodos de parametrização implementados em todas condições de temperatura e concentração são mostrados na Fig. 4.29.

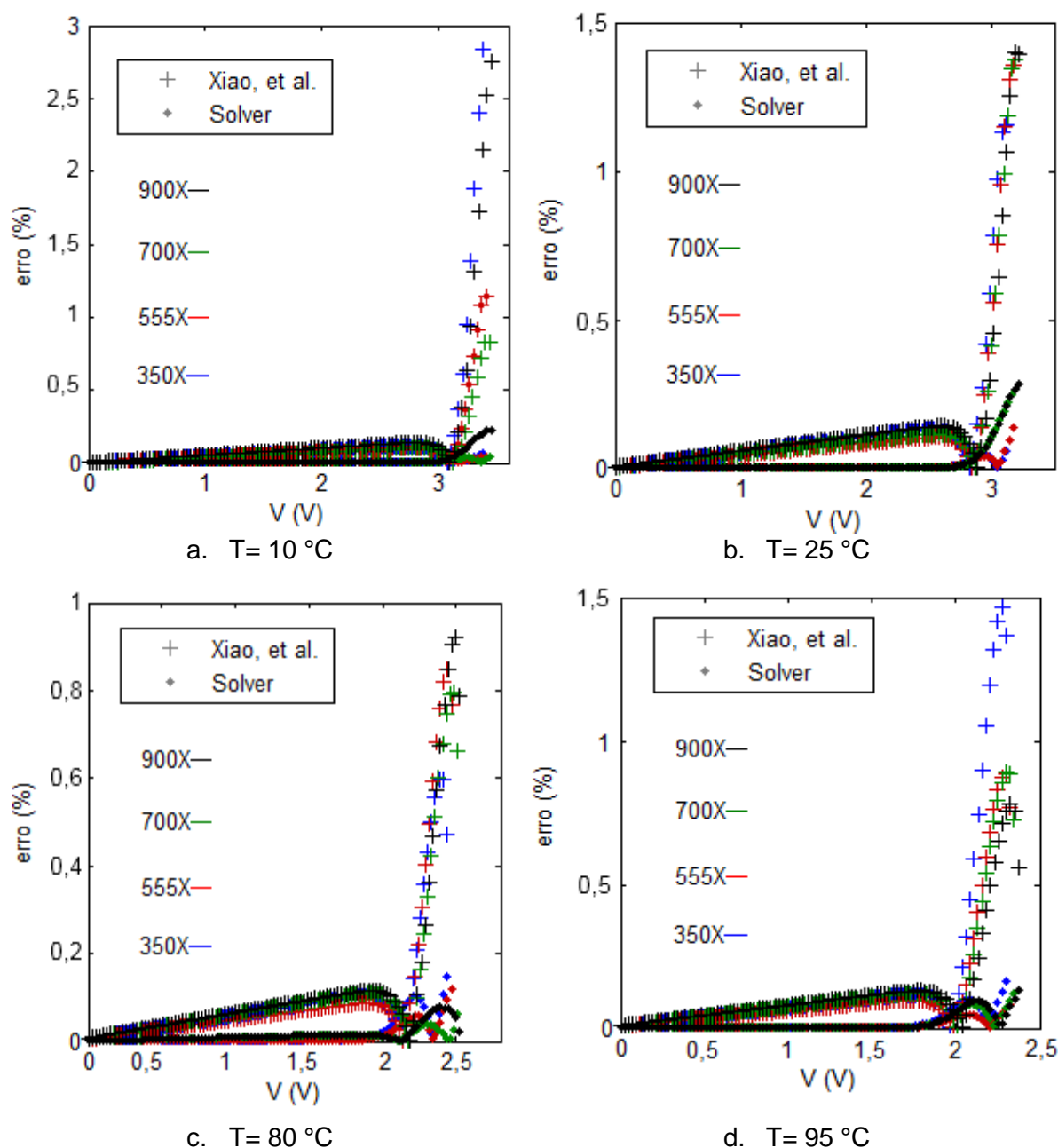


Figura 4.29 – Curva características da célula tripla junção para várias condições de temperatura.

Observa-se que o erro relativo do método de parametrização de XIAO, et al. (2004) apresenta um comportamento distinto comparado ao primeiro estudo de caso. Assim, ele aumenta imediatamente após do ponto de corrente de curto circuito e mostra uma tendência positiva em função da tensão, a qual é interrompida no ponto de inflexão (ponto de convergência do método). Contudo, para nenhuma das condições testadas, o erro relativo de qualquer um dos métodos de parametrização implementado é maior que 3%, sendo que o

método GRG não linear implementado mediante o Solver® apresenta o menor erro (semelhante ao primeiro estudo de caso).

Entretanto, a fim de analisar a o comportamento que exibem as propriedades da célula fotovoltaica tripla junção, quando a mesma é submetida a variações de temperatura e concentração solar, foram geradas superfícies de resposta para a resistência em paralelo, o fator de idealidade do diodo e a resistência em série, conforme ilustram as Figs. 4.30, 4.31 e 4.32, respetivamente.

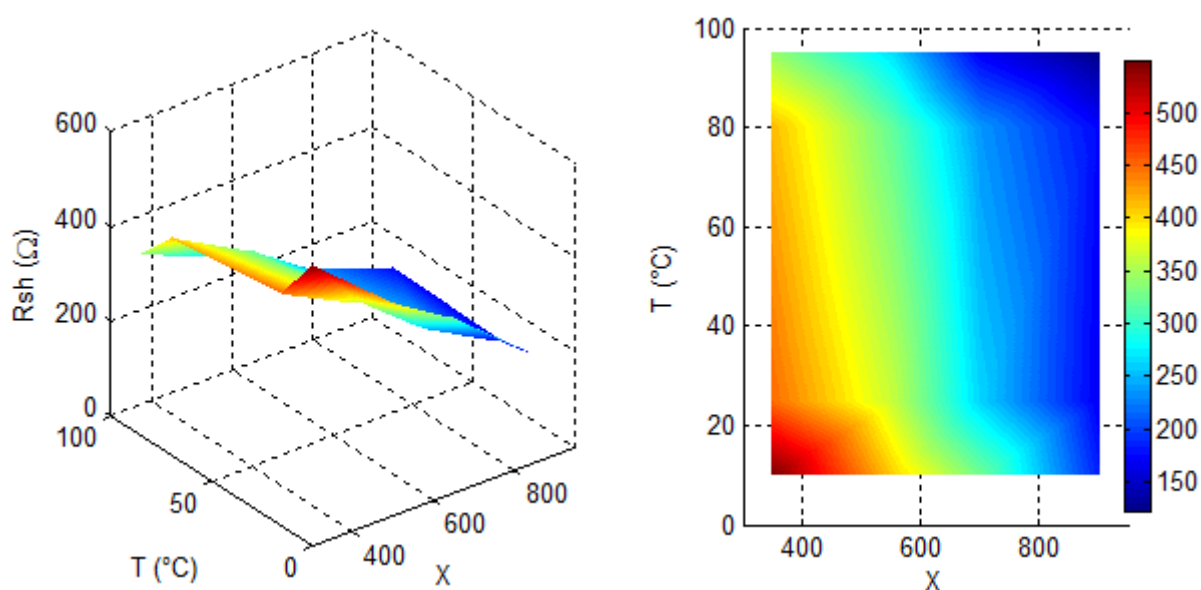
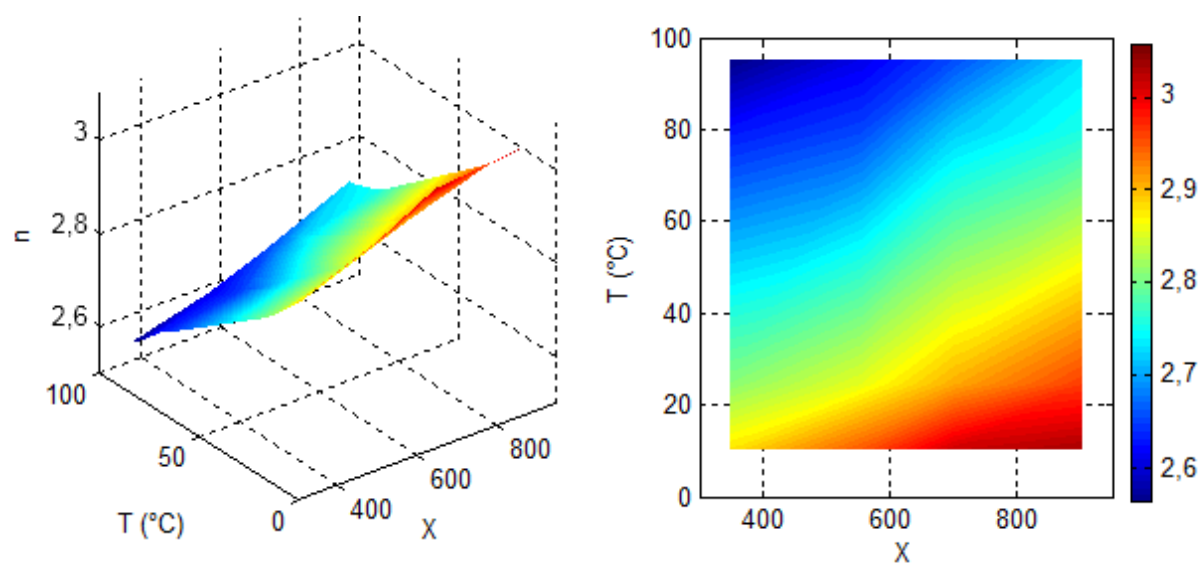


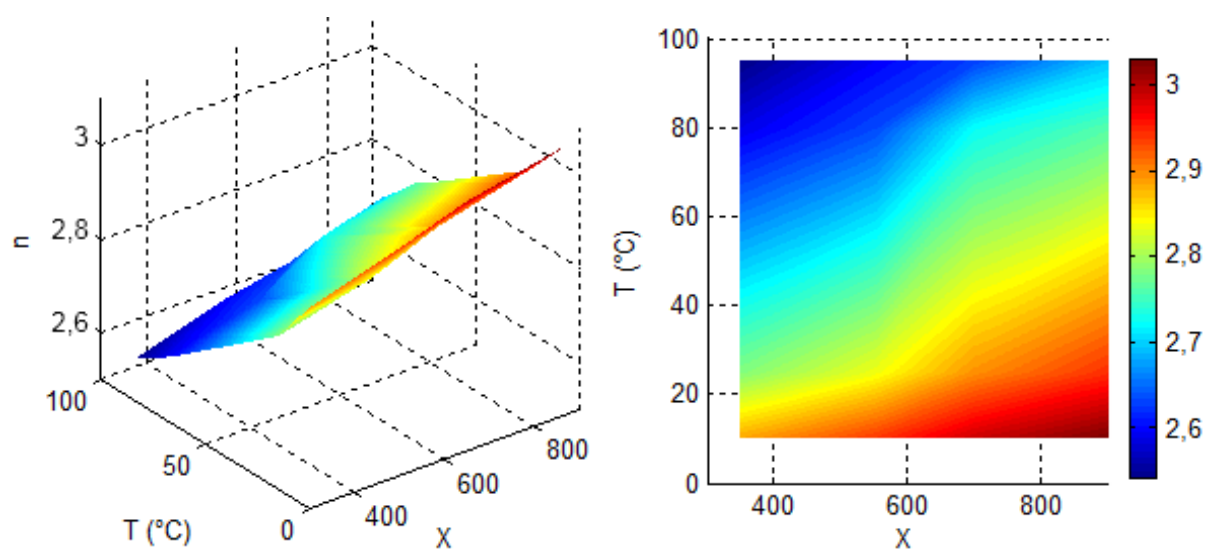
Figura 4.30 – Resistência em paralelo de uma célula tripla junção sob mudanças de radiação e temperatura (método de parametrização do Solver)

Desta forma, observa-se que a resistência em paralelo está influenciada fortemente pelas variações na concentração da radiação solar, porém, esta relação apresenta uma tendência negativa, similarmente ao que ocorre com a temperatura. Assim, este parâmetro atinge o seu maior valor, quando as condições de temperatura e concentração são mínimas.

Por outro lado, o fator de idealidade do diodo parece estar igualmente influenciado tanto pelas mudanças na temperatura como pelas variações da concentração. Não obstante a forma em que estas estão dadas são de diferente natureza, assim este parâmetro aumenta como os incrementos na concentração da radiação solar e diminui quando a temperatura da célula é elevada.



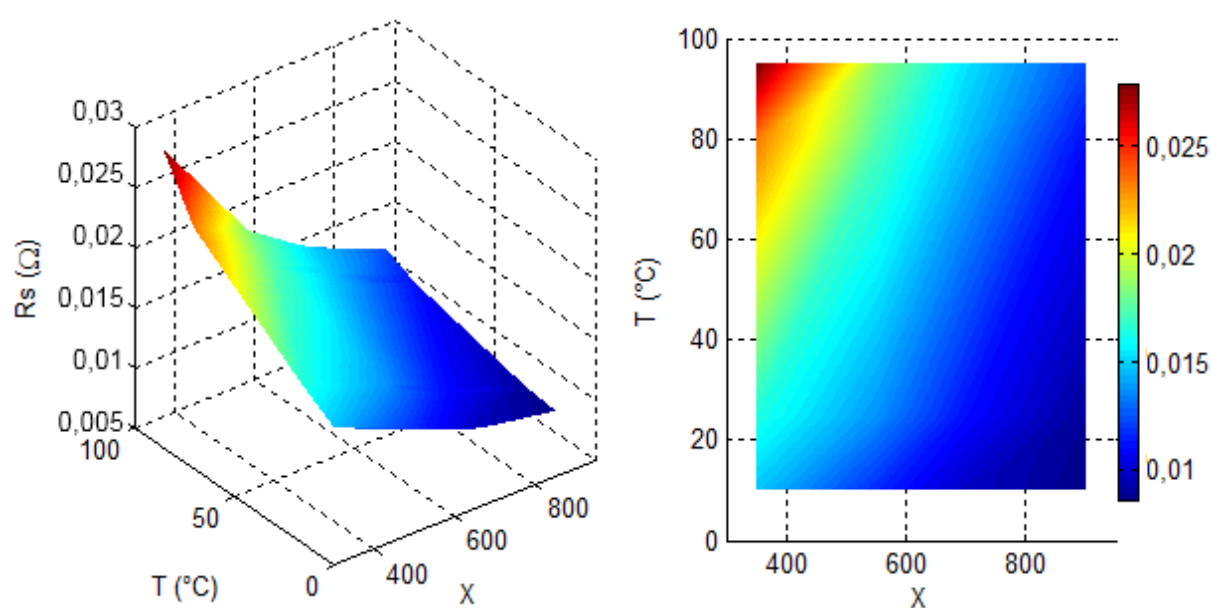
a. Xiao, et al.



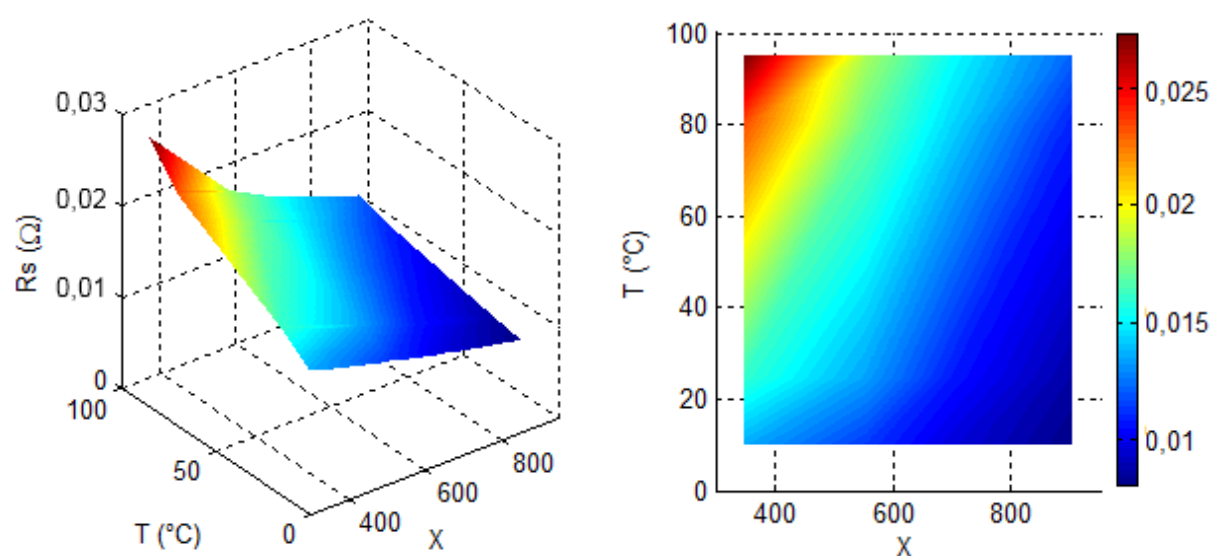
b. Solver

Figura 4.31 – Fator de idealidade do diodo de uma célula tripla junção sob mudanças de radiação e temperatura

Finalmente, se bem a resistência em série aparenta ser mais sensível às mudanças de temperatura que às de concentração, é possível identificar que para altas temperaturas ela é fortemente influenciada pela variação da concentração. Porém, para altos níveis de concentração, torna-se imune à alterações na temperatura. Este parâmetro apresenta uma tendência positiva em relação à temperatura e negativa em relação à concentração.



a. Xiao, et al.



b. Solver

Figura 4.32 – Resistência em série de uma célula tripla junção sob mudanças de radiação e temperatura

São poucas as diferenças apreciáveis para o desempenho do fator de idealidade do diodo e da resistência em série, quando calculadas pelos diferentes métodos utilizados, assim o fato mais notável é que para o método de parametrização de XIAO, et al. (2004) o fator de idealidade do diodo atinge valores superiores em comparação à ferramenta Solver®.

4.3.2. Caracterização pelo modelo de Domínguez

Na implementação do modelo específico para células mult junção proposto por DOMÍNGUEZ, et al. (2010), foi estipulado trabalhar com os dados correspondentes às condições de temperatura de 25 °C e concentração de 350 sóis, como ponto de referência ou de entrada.

De esta forma, estabeleceram-se quatro pontos de temperatura e concentração como condições desejadas, os quais são mostrados na Tab. 4.12. Estas condições foram escolhidas de maneira aleatória. Assim, a Tab. 4.13 mostra os resultados obtidos para as características operacionais da célula em cada ponto de trabalho determinado.

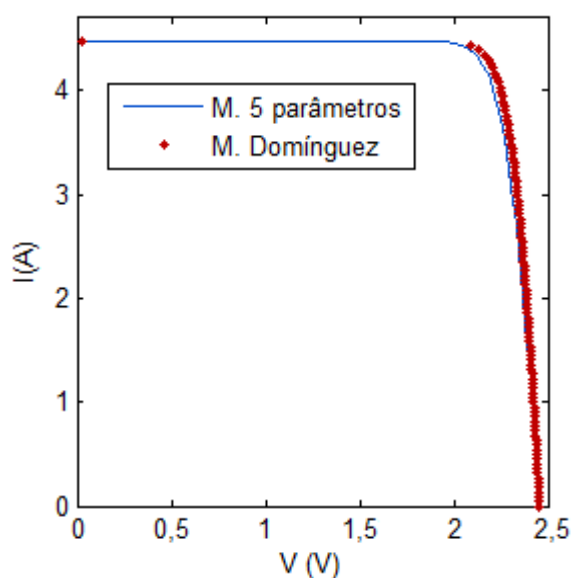
Tabela 4.12 – Condições de trabalho para o modelo de Domínguez

Simulação	Concentração (sóis)	Temperatura °C
1	350	80
2	700	25
3	900	10
4	555	95

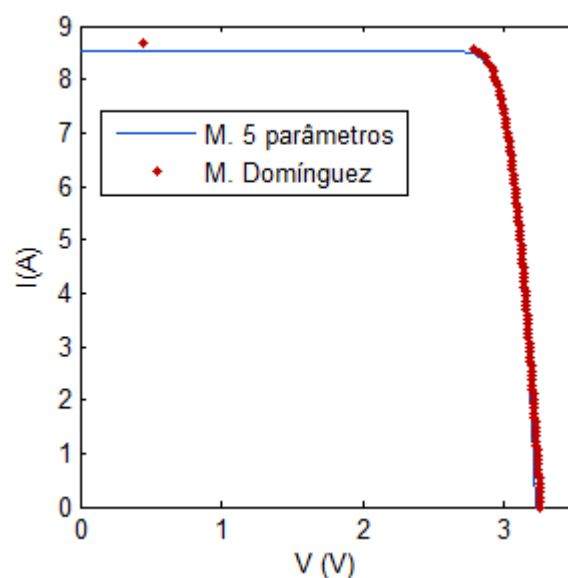
Tabela 4.13 – Características operacionais da célula tripla junção para diferentes condições de temperatura e concentração obtidas do modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) no segundo estudo de caso

Parâmetro	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
n	2,6157	1,6809	2,1312	0,71
R_s (Ω)	0,01597	0,01548	0,015879	0,01578
V_{oc} (V)	2,456	3,2582	3,5379	2,325
Erro (%)	0	0,9324	1,4917	0,81904
I_{sc} (A)	4,4848	8,6714	11,053	7,1413
Erro (%)	0	1,4187	0,8853	0,403
V_{mp} (V)	2,1613	2,8647	3,0781	2,0215
Erro (%)	1,303	0,1638	0,6583	1,634
I_{mp} (A)	4,3489	8,4086	10,83	6,9249
Erro (%)	0,503	0,958	0,8567	0,2218
P_{mp} (W)	9,3993	24,08	33,335	13,99
Erro (%)	1,8133	0,7573	0,1923	1,3401
FF	0,8535	0,8525	0,85246	0,8331
Erro (%)	1,8314	1,5452	2,1488	1,438
Média do erro	0,9084	0,9625	1,0394	0,97599

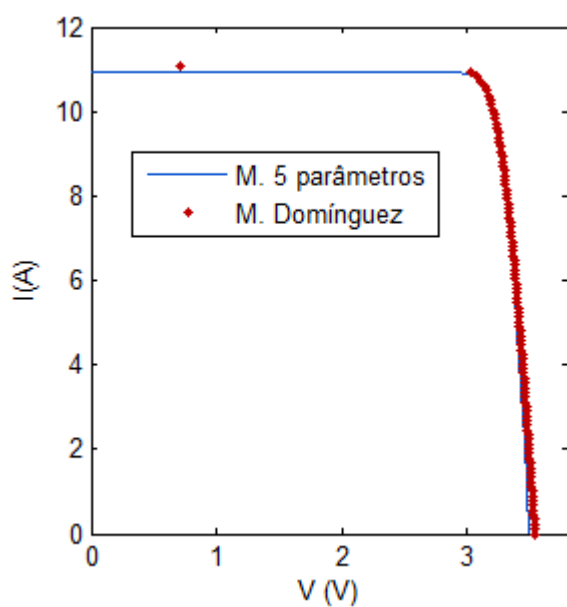
Consequentemente, a Fig. 4.33 mostra as curvas I-V das simulações realizadas implementando o modelo especializado de DOMÍNGUEZ, et al. (2010), em contraste com a curva característica gerada a partir do modelo de cinco parâmetros.



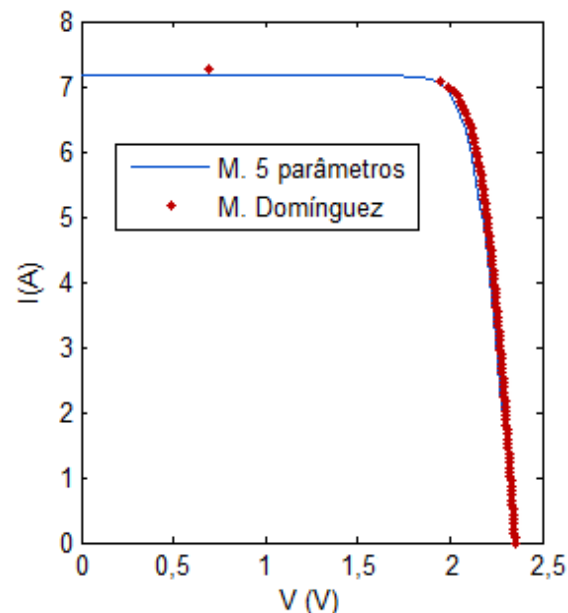
a. Simulação 1



b. Simulação 2



c. Simulação 3



d. Simulação 4

Figura 4.33 – Curva característica I-V da célula tripla junção obtida do modelo de Domínguez.

De maneira oposta ao que acontece na simulação dos outros modelos (Fig. 4.28), onde se tem acumulação de pontos no começo da curva (primeira região da curva I-V) e no final da

curva I-V aparecem só alguns pontos, na Fig. 4.33 a acumulação de pontos se mostra só nesta última parte de curva (terceira região). Isto não corresponde de nenhuma maneira à um fenómeno físico, mas sim a forma de implementação dos modelos. Assim, diferente dos outros modelos, o modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) é dado por uma expressão na qual a tensão é função da corrente.

4.4. Célula Tripla-junção (Terceiro estudo de caso)

A limitação nos dados disponíveis para este estudo de caso, é aproveitada como metodologia de avaliação final para determinar o melhor método de parametrização e de caracterização para células fotovoltaicas multi junção.

4.4.1. Parametrização

A determinação dos parâmetros da célula tripla junção, foi realizada por intermédio do método de XIAO, et al. (2004) e do método GRG não linear (Solver®). As curvas características geradas a partir dos resultados obtidos para cada método nas diferentes condições de concentração, são mostradas na Fig. 4.34.

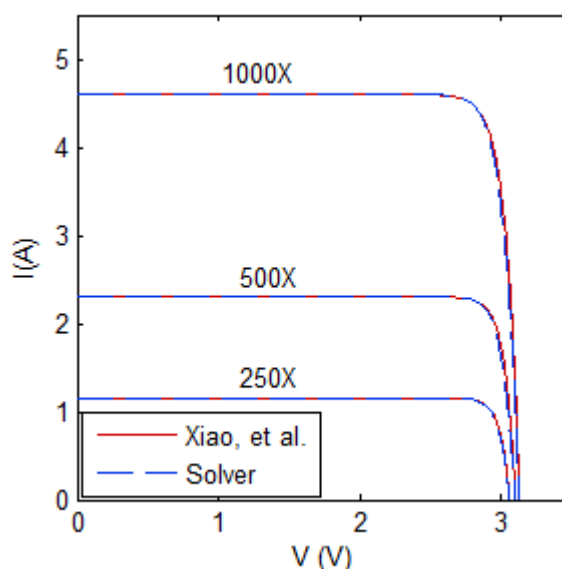


Figura 4.34 – Curva característica I-V da célula tripla junção gerada a partir dos métodos de parametrização

A análise de erros relativos aos dados fornecidos pelo fabricante da célula multi junção, para cada um dos métodos de parametrização implementados é mostrada na Tab. 4.14. Nela,

é possível identificar que em cada um dos parâmetros avaliados, o menor erro foi sempre obtido pelo método de parametrização realizado mediante o complemento Solver do Excel®. Fato que confirma a superioridade na exatidão que este método demonstrou ao longo do presente estudo. A Tab. 4.15 mostra as diferenças entre os parâmetros estimados para cada método de parametrização nas diferentes condições de concentração.

Tabela 4.14 – Características operacionais da célula tripla junção para diferentes condições de concentração geradas a partir dos métodos de parametrização para o terceiro estudo de caso

Parâmetro	X	Xiao, et al.	Erro (%)	Solver	Erro (%)
V_{mp} (V)	250	2,8224	0,4421	2,8200	0.3559
	500	2,8400	0,3534	2,8300	0
	1000	2,8165	0,5880	2,8100	0.3571
I_{mp} (A)	250	1,1255	0,3965	1,1262	0.3399
	500	2,2424	0,3394	2,2499	0.0050
	1000	4,4559	0,5372	4,4639	0.3586
P_{mp} (W)	250	3,1767	0,2111	3,1758	0.1820
	500	6,3683	0,0265	6,3672	0.0443
	1000	12,5500	0,0002	12,5437	0.0505
FF	250	0,9027	0,1916	0,9025	0.1624
	500	0,8932	0,0192	0,8930	0.0014
	1000	0,8716	0,0404	0,8712	0.0908
Média do erro (%)			0,2621		0,1623

Tabela 4.15 – Propriedades intrínsecas da célula tripla junção para diferentes condições de concentração calculadas pelos métodos de parametrização para o terceiro estudo de caso

Parâmetro	X	Xiao, et al.	Solver
n	250	2,3892	2,2310
	500	2,735	2,3589
	1000	3,5008	3,1060
R_s (Ω)	250	9,4149e-04	0,0157
	500	3,0593e-04	0,01684
	1000	3,8831e-04	0,00869
R_{sh} (Ω)	250	-	1,6777e+09
	500	-	7,851e+08
	1000	-	1,677e+07

4.4.2. Caracterização pelo modelo de Dominguez

O modelo de caracterização de dispositivos fotovoltaicos multi junção proposto por DOMÍNGUEZ, et al. (2010), foi implementado primeiramente para as condições de concentração onde as características das células são conhecidas, com o objetivo de encontrar o erro do modelo. Os dados de referência necessários na implementação do mesmo foram tomados para a concentração de 250 sóis.

A Tab. 4.16 mostra as características operacionais obtidas da implementação do modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) para a célula multi junção da empresa AzurSpace (Tab. 3.17), sob diferentes condições de concentração.

Tabela 4.16 – Características operacionais da célula tripla junção para diferentes condições de temperatura e concentração obtidas do modelo Domínguez

Parâmetro	X=250	X=500	X=1000
n	2,231	0,25	0,411
R_s (Ω)	0,0157	0,0155	0,015578
V_{oc} (V)	3,13	3,1347	3,145
Erro (%)	2,287	1,1194	0,4792
I_{sc} (A)	1,15	2,3	4,6
Erro (%)	0	0	0
V_{mp} (V)	2,8643	2,8515	2,8268
Erro (%)	1,9324	0,75972	0,9571
I_{mp} (A)	1,1268	2,2535	4,5071
Erro (%)	0,2831	0,1555	0,6049
P_{mp} (W)	3,2274	6,4259	12,741
Erro (%)	1,18107	0,8775	1,5219
FF	0,89662	0,89128	0,88067
Erro (%)	0,48613	0,19261	0,99427
Média do erro	1,0283	0,5174	0,7595

Da mesma forma, a Fig. 4.35 permite observar as diferenças entre as curvas I-V obtidas mediante a aplicação do modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) e o modelo de cinco parâmetros, nas condições de concentração conhecidas.

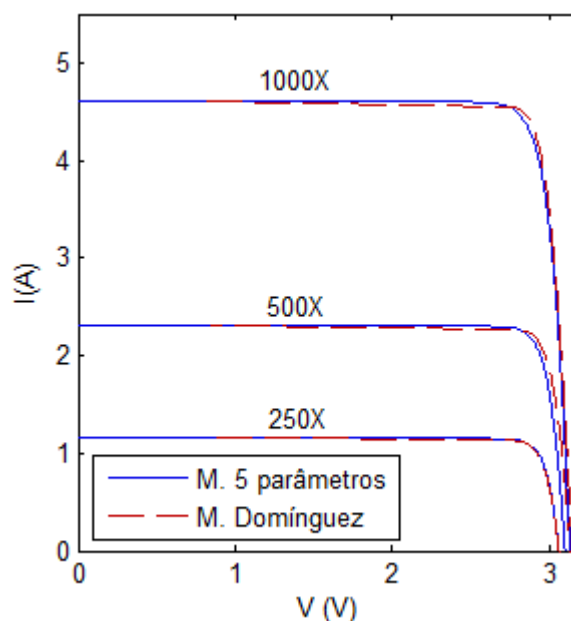


Figura 4.35 – Curva característica I-V da célula tripla junção gerada a partir do modelo de Domínguez para o terceiro estudo de caso

Conforme mencionado no Capítulo III, estima-se que o nível de concentração do modulo pertencente ao Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LEST-nano), seja de aproximadamente 900 sóis. Consequentemente, mediante o modelo de DOMÍNGUEZ, et al. (2010), é simulada esta condição de concentração, primeiro para só uma célula e, posteriormente, para o módulo completo.

São também simulados outros valores de concentração, que foram definidos nos pontos médios situados entre as concentrações conhecidas. Assim estes foram estabelecidos em 375 e 750 sóis.

Este procedimento foi realizado com o objetivo de inspecionar de maneira visual se o modelo consegue manter concordância nos resultados, nas condições de concentração para as quais não foram preestabelecidos os pontos de convergência.

Desta forma, de acordo com o observado na Fig. 4.36, os resultados das simulações propostas aparentam estar dentro da faixa esperada.

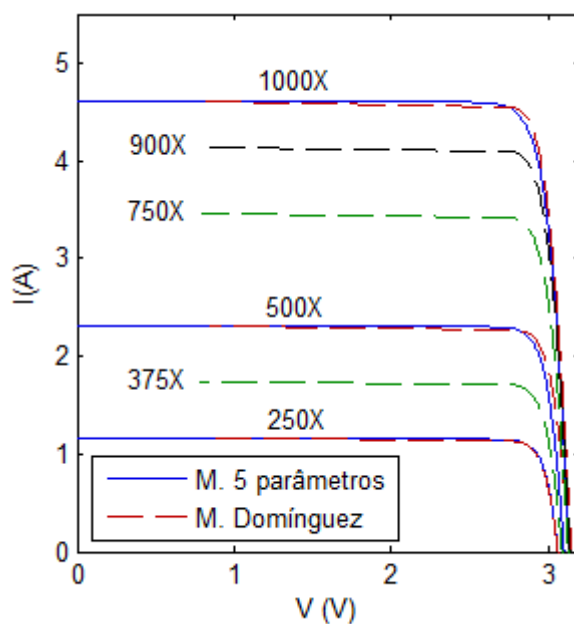


Figura 4.36 – Curva caraterística I-V da célula tripla junção para concentrações diferentes às preestabelecidas para o terceiro estudo de caso

Finalmente, a Fig. 4.37 mostra a curva caraterística estimada para o modulo formado por 20 células de tripla junção ligadas em série com 900 sóis de concentração.

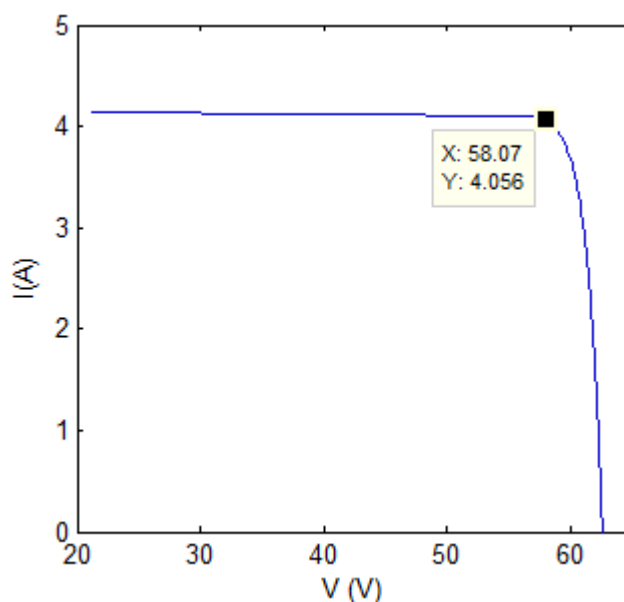


Figura 4.37 – Curva caraterística I-V do modulo multi junção estimada pelo modelo de Domínguez para o terceiro estudo de caso

No decorrer deste capítulo foi provado que para as diferentes situações propostas nos estudos de caso das células fotovoltaicas multi junção, e também para o modulo de c-Si, o

método de parametrização melhores resultados apresentou foi o baseado na aplicação da ferramenta Solver do Excel®.

Assim mesmo, o modelo especializado de DOMÍNGUEZ, et al. (2010) demostro possuir grande robustez e maior faixa de aplicabilidade para diversas situações, que o outro modelo especializado (FERNÁNDEZ, 2012)

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa sobre os distintos dispositivos fotovoltaicos e a análise dos modelos matemáticos, levados a cabo na presente pesquisa, contribuíram para um melhor entendimento do fenômeno físico associado à concentração solar. A pesquisa bibliográfica serviu de base para a análise dos modelos e comparação das curvas características.

Embora a digitalização das curvas características fornecidas pelo fabricante do módulo fotovoltaico seja um procedimento difícil (devido à utilização de software especializado para tratamento de imagens), ficou demonstrado que é de muita utilidade para conseguir reduzir o erro relativo gerado na aplicação dos métodos de parametrização e caracterização.

Quando realizada a comparação entre as curvas I-V digitalizadas do módulo fotovoltaico Kyocera KC85T e as curvas I-V geradas a partir do modelo ideal para vários níveis de radiação e temperatura, a diferença entre as duas ficou mais pronunciada com as variações da temperatura. Este fenômeno é um resultado esperado devido à falta das resistências em série e em paralelo no modelo e sabendo que teoricamente as mesmas apresentam dependência direta com a temperatura.

Ficou demonstrado que a metodologia proposta nesta dissertação para a determinação das propriedades intrínsecas dos dispositivos fotovoltaicos, utilizando a ferramenta Solver do Excel® (“Solver por partes”), apresentou melhores resultados que quando é aplicada esta mesma ferramenta da forma tradicional encontrada na literatura (“Solver todo”). Isto permitiu comprovar o domínio exercido por cada uma destas propriedades nas diferentes “regiões” da curva I-V. No entanto, presume-se que se o número de dados disponíveis para cada região da curva fosse igual, os resultados obtidos em ambos casos seriam muito próximos.

A parametrização realizada com a aplicação dos métodos analíticos para o módulo fotovoltaico de c-Si, apresentou resultados abaixo das expectativas, visto que para algumas condições de temperatura ou radiação o erro relativo obtido a partir destes métodos foi maior

que o erro relativo do modelo ideal. Contudo, o método analítico que apresentou o menor erro para a maioria das condições de trabalho foi o método implementado no trabalho de VERA (2004).

Os parâmetros intrínsecos do módulo fotovoltaico calculados pelo método GRG não linear implementado na forma “Solver® todo” não foram sensíveis em relação às mudanças de radiação e temperatura.

Para o fator de idealidade do diodo, o método GRG não linear implementado “por partes” (Solver® por partes) e o método analítico de BLAS, *et al.* (2002) apresentaram a mesma tendência (aumenta com a radiação e diminui com a temperatura). Já para os métodos VERA (2004) e XIAO, *et al.* (2004), a tendência deste parâmetro se manifestou de maneira oposta (diminui com a radiação e aumenta com a temperatura). No caso da resistência em série, os quatro métodos mostraram o mesmo comportamento para o aumento de radiação, entretanto diferentemente dos demais métodos, o método GRG não linear implementado mediante o “Solver® por partes” apresentou uma tendência positiva para variações de temperatura. Finalmente, para a resistência em paralelo, o método de VERA (2004) mostrou ser diretamente proporcional à radiação, em contraste do exibido pelos demais métodos. No entanto, todos os métodos apresentaram tendência negativa nas variações da temperatura.

Entre os métodos de parametrização analíticos que foram testados neste trabalho, o único que apresentou resultados satisfatórios para dispositivos multi junção foi o proposto por XIAO, *et al.* (2004). Ironicamente, o método que apresentou o menor erro para o módulo de c-Si, apresentou um desempenho pífio para as células multi junção.

Os modelos especializados para caracterização de dispositivos fotovoltaicos multi junção possuem a vantagem de não necessitarem de parametrização prévia, entretanto os algoritmos necessários para implementação dos mesmos são mais complexos, sem mencionar que o custo computacional é maior.

Por intermédio dos diferentes resultados obtidos para o modelo de DOMÍNGUEZ, *et al.* (2010), observou-se que ponto mínimo de tensão na curva I-V nunca atinge o zero (ponto de corrente de curto circuito). Isto se deve à modificação realizada pelo autor do modelo que somente permite utilizar este modelo para tensões maiores que 3 vezes V_{th} , multiplicado pelo fator de idealidade.

Embora o modelo de FERNÁNDEZ (2012) apresentou menor erro relativo que o modelo do DOMÍNGUEZ, *et al.* (2010), para o primeiro estudo de caso das células tripla junção. A necessidade de definir as características de cada uma das subcamadas que conformam a

célula multi junção na implementação de este modelo, o tornaram inviável para os outros estudos de casos realizados para este tipo de célula.

Opostamente ao apresentado para o módulo de c-Si, os parâmetros intrínsecos das células tripla junção apresentaram as mesmas tendências de variação em relação à temperatura e radiação, para os métodos de parametrização utilizados.

O modelo especializado de DOMÍNGUEZ, et al. (2010), demonstrou ser um modelo de caracterização robusto, já que no terceiro estudo de caso, mesmo para as condições onde eram desconhecidas das características de célula tripla junção usadas como critério de convergência, apresentou resultados satisfatórios.

Finalmente, é importante mencionar que o método de estimação de parâmetros GRG não linear implementado mediante a ferramenta Solver do Excel®, apresentou os melhores resultados para todas as aplicações em que foi utilizado. Porém, em razão deste método ser definido para encontrar o mínimo local mais próximo numa função, deve ser aplicado de forma repetitiva para uma mesma análise a fim de encontrar o mínimo global. Assim, o “critério de parada” o de convergência depende maiormente do usuário.

Para futuros trabalhos sugerem-se as seguintes considerações:

Com base nas superfícies de resposta apresentadas para os diferentes parâmetros intrínsecos no segundo estudo de caso das células tripla junção, é possível construir um metamodelo que permita prever o valor destes parâmetros para variações que aconteçam na temperatura da célula ou na concentração.

É recomendado a aplicação de algum método ou algoritmo de otimização que permita agilizar a convergência dos modelos especializados para dispositivos multi junção.

A implementação de uma bancada que permita caracterizar dispositivos fotovoltaicos multi junção, o qual permitirá verificar se os resultados estimados nesta dissertação apresentam valores acertados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUSHAMA, J. et al. Properties of ZnO/CdS/CuInSe₂ Solar Cells with Improved Performance. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 12, n. 1, p. 39-45, Jan 2004. ISSN 10.1002/pip.537.

AGUIRRE, L. A. **Introdução À Identificação De Sistemas - Técnicas Lineares E Não-Lineares Aplicadas A Sistemas Reais**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. ISBN 8570415842.

AHMED, R.; NAMAANE, A.; M'SIRDI, N. K. Improvement in Perturb and Observe Method Using State Flow Approach. **Energy Procedia**, 42, 2013. 614-623.

ANEEL. **Atlas de energia do Brasil**. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 2005.

ANEEL. Matriz de Energia Elétrica , 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: Jan. 2015.

AZUR SPACE SOLAR POWER GMBH. CPV Solar Cells. Disponível em: <http://www.azurspace.com/images/pdfs/DB_3878-00-00_3C42_AzurDesign_5.5x5.5_20140226.pdf>. Acesso em: Nov. 2014.

BEN OR, A.; APPELBAUM, J. Dependence of multi-junction solar cells parameters on concentration and temperature. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 130, p. 234-240, Nov 2014. ISSN 0927-0248.

BLAS, M. A. D. et al. Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. **Renewable Energy**, v. 25, n. 3, p. 371-380, March 2002. ISSN 0960-1481.

BRAGA, D. C. **Modelagem e Estimação dos Parâmetros de um Módulo Fotovoltaico**. Projeto de graduação em Engenharia elétrica: Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

BÜHLER, A. **Estudo de Técnicas de Determinação Experimental e Processamento de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos**. Tesis de Doctorado: UFRG, Porto Alegre, 2011.

BÜHLER, A. **Estudo de Técnicas de Determinação Experimental e Processamento de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos**. Tesis de Doctorado: UFRG, Porto Alegre, 2011.

BURNETT, B. **The Basic Physics and Design of III-V Multijunction Solar Cells**. National Renewable Energy Laboratory. Denver. 2002.

CAMACHO, E. F. et al. **Control of Solar Energy systems**. First. ed. Londres: Springer, 2012.

CARPENDER, M. Avanço da Energia Solar no Brasil. **Jornal Brasileiro de Energia Solar**, São Paulo, v. 1, p. 14, 2014.

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**, v. 29, n. 3, p. 329-337, March 1986. ISSN 0038-1101.

CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. **Journal of Applied Physics**, v. 25, n. 5, p. 676-677, 1954.

COMETTA, E. **Energia Solar, Utilização e Empregos Práticos**. 4ta. ed. São Paulo: Hemus, 2004.

COMISSÃO EUROPEIA. **Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. União Europeia: programa ALTENER, v. I, 2004.

COPELAND, A. W.; BLACK, O. D.; GARRETT, A. B. The Photovoltaic Effect. **Chemical Reviews**, v. 31, n. 1, p. 177-226, 1942.

CURRAL, N. C. D. L. Micro Inversor para Módulos Fotovoltaicos. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~ee07325/?page_id=91>. Acesso em: 2013.

DE OLIVEIRA, V. I. **Propriedades ópticas de filmes finos de silício amorfo hidrogenado dopados com Érbio**. Dissertação de mestrado: Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DOMÍNGUEZ, C.; ANTÓN, I.; SALA, G. Multijunction solar cell model for translating I–V characteristics as a function of irradiance, spectrum, and cell temperature. **PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS**, v. 18, n. 272–284, Mar 2010.

DRUD, A. A GRG code for large sparse dynamic nonlinear optimization problems. **Mathematical Programming**, v. 31, p. 153-191, Jun 1985. ISSN 0025-5610.

DRUMMOND, A. J.; THEKAEKARA, M. P. **The Extraterrestrial Solar Spectrum**. Illinois: Institute of Environmental Sciences, 1993.

DUBEY, G.; TIWARI, N.; SWAPNIL, T. **Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications**. London, UK: Julian Hunt FRS, University College London, 2010. ISBN 978-1-84973-020-4.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Eengineering of Thermal Processes**. Wisconsin: Jhon Wiley & sons, INC., 1980.

EPIA. **Global Market Outlok for photovoltaic 2014-2018**. European Photovoltaic Industry Association. B. 2015. (9789082228403).

ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 22, 2007. 439-449.

FAINE, P. et al. The influence of spectral solar irradiance variations on the performance of selected single-junction and multijunction solar cells. **Solar Cells**, v. 31, n. 3, p. 259-278, 1991. ISSN 0379-6787.

FARRET, F. A. **Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

FERNÁNDEZ, E. F. **MODELIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS SOLARES III-V MULTIUNIÓN Y DE MÓDULOS DE CONCENTRACIÓN**. Tese de doutorado: Universidad de Jaén, Santiago de Compostela, 2012.

FOGEL, D. B.; FOGEL, L. J. **Route Optimization Through Evolutionary Programming**. Twenty-Second Asilomar Conference. [S.I.]: Signals, Systems and Computers. 1988. p. 679,680.

GARRIGÓS, A. et al. Real time estimation of photovoltaic modules characteristics and its application to maximum power point operation. **Renewable Energy**, v. 32, n. 6, p. 1059-1076, May 2007. ISSN 0960-1481.

GOW, J. A.; MANNING, C. D. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. **Electric Power Applications, IEE Proceedings**, v. 146, p. 193-200, Mar 1999.

HAOUARI-MERBAH, M. et al. Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current–voltage curve. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 87, n. 1-4, p. 225-233, May 2005. ISSN 0927-0248.

HASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.

HONSBURG, C.; BOWDEN, S. PV education.org. Disponível em: <www.pveducation.org/pvcdrom>. Acesso em: 2014.

IEA. **Trends in photovoltaics applications**. International Energy Agency. Switzerland. 2009.

IQBAL, M. An Introduction to Solar Radiation. **Academic Press**, 1983. 390.

ISHAQUE, K.; SALAM, Z.; LAUSS, G. The performance of a perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions. **Applied Energy**, 2014. 228-236.

JAIN, S.; AGARWAL, V. Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems. **IET Electr. Power Appl.**, 1, 2007.

KARAM, N. H. et al. Development and characterization of high-efficiency Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs/Ge dual- and triple-junction solar cells. **Electron Devices**, v. 46, n. 10, p. 2116,2125, Oct 1999. ISSN 10.1109/16.792006.

KARAM, N. H. et al. Recent developments in high-efficiency Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs/Ge dual- and triple-junction solar cells: steps to next-generation PV cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 66, n. 1–4, p. 453-466, Feb 2001. ISSN 0927-0248.

KIM, J. Y. et al. Efficient Tandem Polymer Solar Cells Fabricated by All-Solution Processing. **Science Journal**, v. 317, n. 5835, p. 222, July 2007. ISSN 10.1126/science.1141711.

KINSEY, G. S. et al. Concentrator multijunction solar cell characteristics under variable intensity and temperature. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 16, n. 6, 2008. ISSN 1099-159X.

KNAUPP, W. **Power rating of photovoltaic modules from outdoor measurements**. Photovoltaic Specialists Conference. Las Vegas: IEEE. 1991. p. 620 - 624.

KYOCERA, 2014. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5177.pdf>>. Acesso em: Sept 2014.

LAW, D. C. et al. Future technology pathways of terrestrial III–V multijunction solar cells for concentrator photovoltaic systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 94, n. 8, p. 1314-1318, August 2010. ISSN 0927-0248.

LIMA MORAIS, J. **Sistemas Fotovoltaicos, da Teoria à Prática**. Primeira. ed. [S.l.]: PUBLINDUSTRIA, 2009.

LO BRANO, V.; CIULLA, G. An efficient analytical approach for obtaining a five parameters model of photovoltaic modules using only reference data. **Applied Energy**, v. 111, p. 894-903, Nov. 2013. ISSN 0306-2619.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. 1rs. ed. San Francisco: John Wiley & Sons, Ltd, 2003. ISBN 0-471-49196-9.

MAPSET LTD.; GATESHEAD, UK. **Planning and Installing Photovoltaic Systems**. Second. ed. London: Earthscan, 2008.

MARQUES, G. D. C. **Física, Tendências e Perspectivas**. Segunda. ed. São Paulo: Livraria da física, 2005.

MAYER, A. C. et al. Polymer-based solar cells. **Materials Today**, v. 10, n. 11, p. 28-33, Nov. 2007. ISSN 1369-7021.

MEN AT WORK GMBH & CO. KG. ALLES ÜBER PHOTOVOLTAIK, 2014. Disponível em: <<http://www.work-crew.de/photovoltaik/>>. Acesso em: 21 mar. 2015.

MICROSOFT. Definir e resolver um problema usando o Solver, 2006. Disponível em: <<https://support.office.microsoft.com/pt-br/article/Definir-e-resolver-um-problema-usando-o-Solver-9ed03c9f-7caf-4d99-bb6d-078f96d1652c?CorrelationId=375b42a6-b28d-4ce8-b7c0-18e5ebbad15e&ui=pt-BR&rs=pt-BR&ad=BR>>. Acesso em: Nov 2014.

NETO, A. F. D. C. P. et al. **Desenvolvimento de um controlador de carga do tipo ON/OFF**. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES. Florianópolis: CBENS. 2008. p. 10.

NETO, L. D. V. B. M. **Caracterização de geradores fotovoltaicos e desenvolvimento de seguidor de potência máxima para sistemas autônomos aplicados à eletrificação rural**. Tese de doutorado: UFV, Viçosa, 2006.

NREL. Dynamic Maps, Geographic Information System (GIS) Data and Analysis Tools Web. **NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY**., 2011. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/gis/mapsearch/>>. Acesso em: Nov. 2014.

NREL. Research Cell Efficiency Records, 2015. Disponível em: <http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg>. Acesso em: 02 mar. 2015.

OTA, Y.; SAKURADA, Y.; NISHIOKA, K. **Temperature characteristics analysis of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell under concentrated light using spice diode model**. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Honolulu, HI: IEEE. 2010. p. 002093-002096.

PARKER, I. D. Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes. **Journal of Applied Physics**, v. 75, n. 3, p. 1656-1666, February 1994. ISSN 0021-8979.

PIXRL. Photo editor online. Disponível em: <<http://apps.pixlr.com/editor/?loc=es>>. Acesso em: 2015.

RIORDAN, C.; HULSTRON, R. **What is an air mass 1.5 spectrum?** Photovoltaic Specialists Conference. Kissimmee, FL: IEEE. 1990. p. 1085-1088.

SALA, G. P. **Test, rating and specification of PV concentrator components and systems**. Madrid: Europ comission, 2001.

SALAMEH, Z. M.; BOROWY, B. S.; AMIN, A. R. A. Photovoltaic Module-Site Matching Based on the Capacity Factors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 10, p. 326-332, 1995.

SEELING-HOCHMUTH, G. **OPTIMISATION OF HYBRID ENERGY SYSTEMS SIZING**. Dissertation of Dr.-Ing.: University of Kassel, Kassel (GE), 1998.

SEGEV, G.; MITTELMAN, G.; KRIBUS, A. Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 98, p. 57-65, March 2012. ISSN 0927-0248.

SRIDHAR, U.; BASU, A. **Data partitioning schemes for the parallel implementation of the revised simplex algorithm for LP problems**. Parallel Processing Symposium. [S.l.]: Proceedings of Seventh International. 1993. p. 379-383.

SWART, J. W. **“Oficina de Microfabricação: Projeto e Construção de CI’s MOS”**. São Paulo: UNICAMP, 2002.

TAVARES, J.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

TEIXEIRA, W. D. C. **MODELAGEM, ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS E MÉTODO MPPT PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. Tese de doutorado: Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

VERA, L. H. **Programa computacional para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos**. Dissertação de mestrado: UFRGS, Porto Alegre, 2004.

VIEIRA, A. Energia Solar: Pesquisa para Desenvolvimento. **Jornal Brasileiro de Energia Solar**, São Paulo, v. 1, p. 30, 2014.

WS ENERGIA. **Sistemas Concentradores Fotovoltaicos**. Workshop PERCH. Lisboa: Perch. 2008.

XIAO, W.; DUNFORD, W. G.; CAPEL, A. **A novel modeling method for photovoltaic cells**. Power Electronics Specialists Conference. PESC 04: IEEE. 2004. p. 1950-1956.

ZWEIBEL, R. N. E. K. **High-Efficiency CdTe and CIGS Thin-Film Solar Cells: Highlights and Challenges**. 4th World Conference on Photovoltaic Energy conversion. Hawaii : NREL. 2006. p. 317-320.