



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TIAGO ALVES FERNANDES

**ANÁLISE DE MODELOS GLOBAIS NÃO LINEARES PARA MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS DE TECNOLOGIAS CIGS, HIT, ASI-MICRO E ASI-TANDEM**

Recife  
2024

TIAGO ALVES FERNANDES

**ANÁLISE DE MODELOS GLOBAIS NÃO LINEARES PARA MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS DE TECNOLOGIAS CIGS, HIT, ASI-MICRO E ASI-TANDEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Fabrício Bradashia

Coorientador: MSc. Valdemar Moreira C. Junior

Recife  
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Fernandes, Tiago Alves.

Análise de modelos globais não lineares para módulos fotovoltaicos de tecnologias CIGS, HIT e aSi-Micro e aSi-Tandem / Tiago Alves Fernandes. - Recife, 2024.

93 p. : il., tab.

Orientador(a): Fabrício Bradaschia

Coorientador(a): Valdemar Moreira Cavalcante Junior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Eletrônica de Potência. 2. Fotovoltaica. 3. Modelagem. 4. MGNL. 5. Elétrica. I. Bradaschia, Fabrício . (Orientação). II. Cavalcante Junior, Valdemar Moreira . (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

TIAGO ALVES FERNANDES

**ANÁLISE DE MODELOS GLOBAIS NÃO LINEARES PARA MÓDULOS  
FOTOVOLTAICOS DE TECNOLOGIAS CIGS, HIT, ASI-MICRO E ASI-TANDEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro eletricista.

Aprovado em: 23/02/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Fabrício Bradaschia (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Msc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Eduardo José Barbosa (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Marcio Rodrigo Santos de Carvalho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer sinceramente aos meus pais Ronaldo e Andreia, por sempre fazerem de tudo para me apoiar e serem sempre minhas referências de esforço e perseverança, e à minha irmã Marina, que sempre esteve presente torcendo e cuidando de mim.

Agradeço aos amigos que me acompanharam do início ao fim nessa jornada, Julia Cabral, Camilla Domingues e Thiago Wanderley, juntamente com todo o grupo "Bonde CDU", com eles todos esses anos de graduação foram muito mais leves.

Agradeço as grandes amigas que fiz durante a graduação, Beatriz Almeida, Clarissa Gusmão, Iago Daniel, Felipe José, Nathan Pinheiro e também ao grupo "Insolide". Cada conversa, gesto amigável e risada compartilhada contribuíram para tornar esta jornada acadêmica mais leve e significativa.

Agradeço especialmente aos colegas do grupo de pesquisa em FV, Valdemar Moreira, Renato Freitas, Nayara Melo, Diego Hamilton e Eduardo Barbosa. As discussões construtivas e aprendizados diários me enriqueceram como pesquisador e como pessoa.

Agradeço aos meus amigos de laboratório, que acompanharam no meu desenvolvimento acadêmico, me mostraram o que é um bom ambiente de trabalho e tornaram meus dias mais tranquilos e divertidos, sendo eles Antônio Dutra, Camila Bandeira, Carolina Caldeira, Ericles, Eduardo Augusto, Eduardo Barbosa, Gustavo Azevedo, Nestor Medina, Ricardo Moura, Rafael Cavalcanti.

Um agradecimento especial às minhas amigas de colégio que viraram família ao decorrer dos anos, Giovana, Fialho, Lucas C., João, Humberto e Benildes. Desde sempre presentes ao meu lado, oferecendo palavras de incentivo e compreensão tanto nos momentos mais felizes como também nos mais desafiadores.

Agradeço aos professores Marcio Rodrigo Santos e Eduardo José Barbosa por aceitar participar da banca examinadora e pelas contribuições feitas ao trabalho durante o processo de avaliação.

Agradeço também à meus orientadores, Fabrício Bradaschia e Valdemar Moreira que me ajudaram não apenas na confecção desse trabalho mas também por me apresentarem ao mundo da pesquisa e desenvolvimento. Seu apoio constante, crença em meu potencial e incentivo contínuo foram fundamentais em todas as etapas deste projeto.

Agradeço a todos os professores e profissionais que contribuíram para minha formação, direta ou indiretamente.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e ao GEPAE por me receber com tanto carinho e por me promover os meios para desenvolver minha pesquisa e aperfeiçoamento pessoal e profissional.

## RESUMO

Com o cenário da geração solar fotovoltaica em crescente expansão, dominando uma posição cada vez mais proeminente entre as fontes de energia, novas tecnologias estão emergindo, com tecnologias construtivas e características elétricas destoantes das mais conhecidas no mercado, resultando em melhorias na eficiência, diferentes aplicações e novos espaços no mercado para a geração FV ser inserida. Isso tem gerado um aumento significativo nas pesquisas, especialmente aquelas voltadas para o desenvolvimento de modelos matemáticos para células e/ou módulos solares. No que diz respeito a isso, modelos matemáticos são utilizados para diversas finalidades, tais como o monitoramento do desempenho do sistema de geração de energia fotovoltaica, a previsão da produção de energia, o aprimoramento de novos algoritmos para seguimento do ponto de potência máxima e a análise de potenciais falhas em células fotovoltaicas. Dessa forma, é fundamental que esses modelos apresentem alta precisão e flexibilidade para lidar com variações de temperatura e irradiância. Desse modo, este trabalho tem como principal objetivo estudar e comparar os modelos globais não lineares baseados no modelo clássico de um diodo para módulos FV de tecnologias construtivas não usuais. Tanto o compêndio de modelos globais não lineares sendo aplicados à tais tecnologias como a comparação de seus resultados não existem na literatura atual. Com isso, os modelos aqui estudados são avaliados pela sua capacidade de representar com fidedignidade as curvas I-V's e P-V's experimentais disponibilizadas pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Como métricas de avaliação, são utilizados, o erro médio absoluto em potência normalizado (EMAPN) e também o desvio médio quadrático normalizado da corrente (*normalized root mean square deviation - RMSD*) para as tecnologias de silício amorfo (aSi), Cobre-índio-Gálio-Selênio (CIGS) e Heterojunção com Camada Fina Intrínseca (*heterojunction with intrinsic thin layer - HIT*). Com isso, o estudo realizado neste trabalho tem como finalidade realizar uma análise comparativa a fim de determinar quais modelos e suas parametrizações são mais capazes de representar cada uma das tecnologias aqui estudadas.

**Palavras-chaves:** Eletrônica de Potência. Fotovoltaica. Modelagem. MGNL. Elétrica.

## ABSTRACT

The scenario of photovoltaic solar generation steadily expanding, dominating an increasingly prominent position among energy sources. In this context, featuring constructional and electrical characteristics distinct from those well-known in the market. This results in improvements in efficiency, different applications, and new market spaces for PV generation to be integrated. This has led to a significant increase in research, especially in the development of mathematical models for solar cells and/or modules. In this regard, mathematical models are employed for various purposes, such as monitoring the performance of the photovoltaic energy generation system, predicting energy production, enhancing new algorithms for maximum power point tracking, and analyzing potential faults in photovoltaic cells. Thus, it is crucial for these models to exhibit high accuracy and flexibility to handle variations in temperature and irradiance. Therefore, the main objective of this study is to investigate and compare nonlinear global models based on the classical diode model for PV modules of non-conventional construction technologies. Both the compilation of nonlinear global models applied to such technologies and the comparison of their results are absent in the current literature. The models studied here are evaluated for their ability to accurately represent the I-V and P-V curves provided by the National Renewable Energy Laboratory. Evaluation metrics include the Normalized Mean Absolute Power Error (MAEPN) and the Normalized Root Mean Square Deviation (RMSD) for amorphous silicon (aSi), Copper-Indium-Gallium-Selenium (CIGS), and Heterojunction with Intrinsic Thin Layer (HIT) technologies. The purpose of this study is to conduct a comparative analysis to determine which models and their parameterizations are most capable of representing each of the technologies studied here.

**Keywords:** Power Electronics. Photovoltaics. Modeling. GNLM. Electrical.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alótropos do silício: monocristalino, policristalino e amorfo. . . . .	23
Figura 2 – Representação da estrutura construtiva de uma célula FV CIGS. . . . .	25
Figura 3 – Representação da estrutura construtiva de uma célula FV HIT. . . . .	26
Figura 4 – Projeção de crescimento por região do mercado FV de filme fino, 2020-2025. . . . .	27
Figura 5 – Comparação de curvas I-V's das tecnologias estudadas neste trabalho. . . . .	28
Figura 6 – Modelo SDM. . . . .	30
Figura 7 – Modelo DDM. . . . .	31
Figura 8 – Modelo TDM. . . . .	32
Figura 9 – Condições ambientais do conjunto de curvas de validação para as quatro tecnologias avaliadas. . . . .	53
Figura 10 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos para aSi-Micro. . . . .	54
Figura 11 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos para aSi-Tandem. . . . .	57
Figura 12 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos para CIGS. . . . .	59
Figura 13 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos para HIT. . . . .	61
Figura 14 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos modificados para aSi-Micro. . . . .	70
Figura 15 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos modificados para aSi-Tandem. . . . .	71
Figura 16 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos modificados para CIGS. . . . .	72
Figura 17 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos modificados para CIGS. . . . .	73
Figura 18 – Fluxograma do modelo de Silva. . . . .	88
Figura 19 – Fluxograma do modelo de Zhang 1. . . . .	89
Figura 20 – Fluxograma do modelo de Zhang 2. . . . .	90
Figura 21 – Fluxograma do modelo de Wang. . . . .	91
Figura 22 – Fluxograma do modelo de Lang. . . . .	92
Figura 23 – Fluxograma para obtenção do modelo de Lu. . . . .	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites inferiores e superiores originalmente utilizados na busca de parâmetros para o modelo de Silva. . . . .	37
Tabela 2 – Limites inferiores e superiores utilizados na busca de parâmetros para o modelo de Silva modificado. . . . .	38
Tabela 3 – Limites inferiores e superiores originais utilizados na busca dos parâmetros (Zhang 1). . . . .	41
Tabela 4 – Limites inferiores e superiores utilizados na busca dos parâmetros (Zhang 2). . . . .	43
Tabela 5 – Curvas de treinamento e referência utilizados no modelo de Silva para cada tecnologia. . . . .	52
Tabela 6 – Curvas selecionadas para validação dos modelos. . . . .	52
Tabela 7 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para aSi-Micro	55
Tabela 8 – Parâmetros e erros do Modelo de Lu para aSi-Micro . . . . .	56
Tabela 9 – Parâmetros e erros do Modelo de Lu para aSi-Tandem . . . . .	56
Tabela 10 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para aSi-Tandem.	58
Tabela 11 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para CIGS. . .	60
Tabela 12 – Parâmetros e erros do Modelo de Lu para CIGS. . . . .	61
Tabela 13 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para HIT. . . .	62
Tabela 14 – Parâmetros e erros do Modelo de Lu para HIT. . . . .	63
Tabela 15 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para aSi-Micro através dos Modelos de Silva modificados. . . . .	64
Tabela 16 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para aSi-Tandem através dos Modelos de Silva modificados. . . . .	65
Tabela 17 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para CIGS através dos Modelos de Silva modificados. . . . .	66
Tabela 18 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para HIT através dos Modelos de Silva modificados. . . . .	67
Tabela 19 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para aSi-Micro através dos modelos modificados. . . . .	68
Tabela 20 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para aSi-Tandem com Modelos Modificados. . . . .	69
Tabela 21 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para tecnologia CIGS através de Modelos Modificados. . . . .	74
Tabela 22 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para tecnologia HIT através de Modelos Modificados. . . . .	75

Tabela 23 – Resultados da segunda fase da validação dos modelos (EMAPN) para a tecnologia de aSi-Micro. . . . .	76
Tabela 24 – Resultados da segunda fase da validação dos modelos (EMAPN) para a tecnologia de aSi-Tandem. . . . .	76
Tabela 25 – Resultados da segunda fase da validação dos modelos (EMAPN) para tecnologia CIGS. . . . .	77
Tabela 26 – Resultados da segunda fase da validação dos modelos (EMAPN) para tecnologia HIT. . . . .	77
Tabela 27 – Valores de EMAPN médio utilizados no ranqueamento do desempenho dos modelos por tecnologia. . . . .	78
Tabela 28 – Ranque do desempenho dos modelos por tecnologia. . . . .	78
Tabela 29 – Comparação qualitativa do esforço computacional de cada modelo. . .	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AM	<i>Air Mass</i> - Massa de AR
a-Si	Silício Amorfo
BIPV	<i>Building Integrated Photovoltaic System</i> - Integração Fotovoltaica na Construção Civil
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio
c-Si	Silício Cristalino
DDM	Modelo de Célula Fotovoltaica de Dois Diodos
EMAP	Erro Médio Absoluto em Potência
EMAPN	Erro Médio Absoluto em Potência Normalizado
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaico
GCPSO	<i>Guaranteed Convergence Particle Swarm Optimization</i> - Otimização por Enxame de Partículas com Convergência Garantida
HIT	<i>Hetero-junction with Intrinsic Thin layer</i> - Heterojunção com Película Fina
ALM	Método Adaptativo de Levenberg-Marquardt
MAPS	Modelo Adaptável com Povoamento Superficial
MGNL	Modelo Global Não-Linear
MPP	<i>Maximum Power Point</i> - Ponto de Máxima Potência
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> - Laboratório Nacional de Energias Renováveis
NRMSD	<i>Normalized Root Mean Square Deviation</i> - Desvio Médio Quadrático Normalizado
PS	<i>Pattern Search</i>

PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> - Otimização por Enxame de Partículas
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> - Desvio Médio Quadrático
SDM	Modelo de Célula Fotovoltaica de Um Diodo
STC	<i>Standard Test Conditions</i> - Condições Padrões de Teste
TDM	Modelo de Célula Fotovoltaica de Três Diodo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_{ph}$	Corrente fotogerada
$I_{mp}$	Corrente no ponto de máxima potência
$V_{mp}$	Tensão no ponto de máxima potência
$P_{mp}$	Potência no ponto de máxima potência
$I_{sc}$	Corrente de curto-circuito
$V_{oc}$	Tensão de curto aberto
$V_t$	Tensão térmica
$N_s$	Número de células em série no módulo fotovoltaico
$I_{sat}$	Corrente de saturação
$I_{sat1}$	Corrente de saturação referente ao primeiro diodo
$I_{sat2}$	Corrente de saturação referente ao segundo diodo
$I_{sat3}$	Corrente de saturação referente ao terceiro diodo
$\gamma_T$	Coefficiente térmico de máxima potência
$\alpha_{I_{sc}}$	Coefficiente térmico de corrente de curto
$\alpha_{I_{mp}}$	Coefficiente térmico de corrente de máxima potência
$\beta_T$	Coefficiente térmico de tensão de circuito aberto
$\beta_S$	Coefficiente de irradiância para tensão de circuito aberto
$K$	Constante de Boltzmann
$S$	Irradiância
$n$	Fator de idealidade
$R_{sh}$	Resistência <i>shunt</i>
$R_s$	Resistência série
$q$	Carga do elétron
$T$	Temperatura

$V$	Tensão elétrica
$I$	Corrente elétrica
$N_{pontos}$	Número de pontos extraídos da curva I-V real do módulo fotovoltaico
$P_{med}$	Potência medida
$P_{est}$	Potência estimada
$I_{med}$	Corrente medida
$I_{est}$	Corrente estimada
$I_{sc,ref}$	Corrente de curto-circuito de referência
$V_{oc,ref}$	Tensão de circuito aberto de referência
$S_{ref}$	Irradiância de referência
$T_{ref}$	Temperatura de referência
$R_{s,ref}$	Resistência série de referência
$R_{sh,ref}$	Resistência <i>shunt</i> de referência
$I_{sat,ref}$	Corrente de saturação de referência
$I_{ph,ref}$	Corrente fotogerada de referência
$R_{s,ref1}$	Resistência série referente à irradiância
$R_{s,ref2}$	Resistência série referente à temperatura
$K_{R_s}$	Coefficiente linear de temperatura para resistência série
$K_{R_{sh}}$	Coefficiente linear de temperatura para resistência <i>shunt</i>
$\gamma_{R_{sh}}$	Coefficiente exponencial da irradiância para resistência <i>shunt</i>
$\gamma_{R_s}$	Coefficiente exponencial da irradiância para resistência série
$E_g$	Energia do <i>gap</i>
$E_{g,ref}$	Energia do <i>gap</i> de referência
$\varepsilon_{R_s}$	Coefficiente linear de temperatura para resistência série
$\delta_{R_{sh}}$	Coefficiente linear de temperatura para resistência <i>shunt</i>
$\sigma_{R_s}$	Coefficiente linear de irradiância para resistência série

$\epsilon_n$	Coeficiente linear de temperatura para fator de idealidade
$\sigma_n$	Coeficiente linear de irradiância para fator de idealidade
$\alpha_k$	Fator adaptativo
$\mu_k$	Fator de amortecimento
$d_k$	Passo de busca
$A_{red_k}$	Redução atual
$P_{red_k}$	Redução prevista
$R^2$	Coeficiente de determinação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS	21
1.2	METODOLOGIA	21
1.3	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	22
<b>2</b>	<b>TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS NÃO USUAIS E REVISÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS BÁSICOS</b>	<b>23</b>
2.1	TECNOLOGIAS ESTUDADAS E SUAS APLICAÇÕES	23
2.1.1	Silício Amorfo (aSi)	23
2.1.2	Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS)	24
2.1.3	Heterojunção com Camada Fina Intrínseca ( <i>Heterojunction with Intrinsic Thin layer</i> - HIT)	25
2.1.4	Aplicações Específicas	26
2.1.5	Características Elétricas	28
2.2	MODELOS MATEMÁTICOS PARA MÓDULOS FV	29
2.2.1	Modelo de um diodo	30
2.2.2	Modelo de dois diodos	31
2.2.3	Modelo de três diodos	32
2.2.4	Modelo global não linear	32
2.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	33
<b>3</b>	<b>MODELOS GLOBAIS NÃO LINEARES E TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS</b>	<b>34</b>
3.1	MODELO DE SILVA	34
3.1.1	Modificações no Modelo de Silva	37
3.2	ZHANG 1	39
3.2.1	Modificações em Zhang 1	41
3.3	ZHANG 2	42
3.3.1	Modificações Zhang 2	43
3.4	MODELO DE WANG	43
3.4.1	Modificações em Wang	45
3.5	MODELO DE LANG	45
3.5.1	Modificações em Lang	47
3.6	MODELO DE LU	47
3.6.0.1	Modificações em Lu	49
3.7	CONCLUSÕES PARCIAIS	49
<b>4</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MODELOS</b>	<b>50</b>
4.1	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	50
4.2	CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO	51
4.3	RESULTADOS DOS MODELOS AVALIADOS	53

<b>4.3.1</b>	<b>Análise Preliminar de Validação . . . . .</b>	<b>53</b>
4.3.1.1	Análise dos Modelos Originais . . . . .	54
4.3.1.2	Análise dos Modelos Modificados . . . . .	60
<b>4.3.2</b>	<b>Análise Geral de Validação . . . . .</b>	<b>71</b>
4.4	CONCLUSÕES PARCIAIS . . . . .	79
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>80</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	81
5.2	PUBLICAÇÕES NA ÁREA . . . . .	81
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS DOS MGNLS UTILIZA-</b>	
	<b>DOS NO TRABALHO . . . . .</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda mundial por energia elétrica, surgiu também uma constante busca por fontes alternativas de geração. Com o passar dos anos, a pauta da preservação do meio ambiente tornou-se uma questão cada vez mais importante. Portanto, a utilização de fontes de energia renováveis, que tem um impacto muito menor a natureza quando comparadas às fontes de geração convencionais, é fundamental para garantir a sustentabilidade ambiental a longo prazo. Por conta disso, é essencial o contínuo desenvolvimento de novas tecnologias de geração de energias renováveis, como a geração solar fotovoltaica (FV), que tem se mostrado cada vez mais forte em todo o mundo.

Dentre as fontes renováveis de energia, a geração FV se destaca por diversos fatores, como o baixo impacto ambiental, a não emissão de poluentes, a facilidade de instalação, a operação silenciosa, além de uma baixa necessidade de manutenção quando comparada com outras formas de geração. Por conta dessas vantagens, sistemas de geração FV estão se tornando alternativas mais atrativas tanto tecnicamente quanto também economicamente.

De acordo com o Relatório Global de Status de Energias Renováveis 2022 (GSR), observou-se um acréscimo de 175 GW na geração de energia FV em 2021, elevando a capacidade total para 942 GW em escala global. A competitividade econômica da energia solar e a atratividade dos contratos de compra de energia resultaram na adição de 100 GW em novas instalações, contribuindo para um aumento de aproximadamente 20% na capacidade de energia solar centralizada (REN21, 2022).

Já no cenário Brasileiro, de acordo com os dados disponibilizados pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), em 2023, a energia solar FV representou uma produção de 36 GWh (centralizada e distribuída), caracterizando um avanço de 50% em relação ao ano anterior (BASTOS, 2023). Dessa forma, ela corresponde a aproximadamente 3% da geração total de energia elétrica no país (EPE, 2023; BASTOS, 2023). Além disso, conforme o levantamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) em janeiro de 2023, a energia solar FV assumiu a posição de segunda maior fonte na matriz elétrica do Brasil, apresentando uma capacidade instalada operacional de 25,4 GW (ABSOLAR, 2023; BASTOS, 2023).

Para implementação efetiva de sistemas FV, é de suma importância que todos os componentes do sistema possuam modelos matemáticos fidedignos à realidade para que antes da sua instalação seja possível simular e otimizar sua construção (MATHEW et al., 2017). A precisão do modelo elétrico do módulo FV desempenha um papel muito importante, visto que ele pode proporcionar uma variedade de vantagens. Dentre os elementos de um sistema FV, o mais importante de se ter uma modelagem precisa é o módulo FV, uma vez que ele é o principal responsável da geração do sistema (JUNIOR, 2023). Por exemplo, é viável estimar a geração do sistema FV a fim de garantir a estabilidade e confiabilidade

da rede, além de calcular o retorno do investimento de todo o sistema FV para atrair potenciais investidores (SILVA, 2019). Além disso, com o auxílio de um modelo matemático preciso de um módulo FV é possível também auxiliar técnicas de seguimento do ponto de máxima potência baseadas em modelo (TRETER; MICHELS, 2018).

Diferentes tecnologias construtivas apresentam características elétricas e físicas distintas, conferindo diferentes aplicações e tornando a geração FV ainda mais versátil. Por exemplo, além das tecnologias de silício monocristalino (mSi) e policristalino (xSi) muito utilizadas em grandes plantas de geração centralizada, nos últimos anos foi visto um aumento exponencial na utilização de tecnologias como Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS) e silício amorfo (aSi). Essas tecnologias são integradas de forma contínua à módulos FV em superfícies externas de edifícios e empresariais, como paredes, telhados, dispositivos de sombreamento e componentes decorativos (CHEN; AN; HENG, 2022). Essa aplicação é conhecida como *Building-Integrated Photovoltaic* (BIPV) e está em crescente utilização devido a tais tecnologias construtivas de módulos FV poderem ser flexíveis e semi-transparentes, que podem ser instalados em praticamente qualquer superfície (KUHN et al., 2021).

Além disso, tais tecnologias apresentam diversas outras aplicações, como sua presença em satélites (VERDUCI et al., 2022) e, mais atualmente, sua instalação integrada em carros elétricos (OLIVEIRA, 2023). Mesmo as aplicações sendo de pequenos nichos, as suas contínuas expansões chamam atenção e requerem também que modelos matemáticos mais precisos das tecnologias utilizadas sejam desenvolvidos para que a aplicação das mesmas possam ser otimizadas e melhoradas.

Diante disso, é importante investigar diferentes modelos matemáticos para diferentes tecnologias e aplicações, visando suprir uma demanda futura de modelagem e otimização de tecnologias em ascensão, visto que as características de tensão e corrente das células FV demonstram comportamentos diferentes para diferentes tecnologias construtivas. Por exemplo, módulos de silício amorfo possuem valores de tensão muito superiores e valores de corrente muito inferiores quando comparados a módulos de silício monocristalinos e policristalinos (MORALES-ACEVEDO, 2012). Para tecnologias como CIGS ou HIT (*Heterojunction with Intrinsic Thin layer*), que possuem parâmetros internos dos semicondutores bem diferentes dos módulos usuais de silício, tanto mono quanto policristalinos, demanda-se modelos matemáticos e operacionais distintos (AL-HATTAB et al., 2021), ou seja, quando os módulos diferem em seu processo de fabricação, composição físicas e químicas, seus modelos matemáticos podem diferir consideravelmente daqueles modelos convencionais para silício, sendo assim necessário investigar tecnologias utilizadas em diferentes aplicações (aSi, CIGS e HIT), e se necessário realizar alterações para representa-las com maior precisão (KHURSHEED et al., 2019; PIMENTEL, 2020).

Na literatura atual, existem inúmeros métodos para simulação de células FV, como a utilização de inteligências artificiais. No entanto, a abordagem mais frequente para

representar células FV é por meio de circuitos elétricos. Dentre esses, os modelos de circuitos elétricos que oferecem a melhor descrição do comportamento dos módulos FV em uma única condição meteorológica incluem o modelo de um único diodo (SDM - *Single Diode Model*), o modelo de dois diodos (DDM - *Double Diode Model*) e o modelo de três diodos (TDM - *Triple Diode Model*) (JUNIOR, 2023; ZHANG et al., 2022a; SILVA, 2019).

Devido ao comportamento extremamente não linear, a modelagem matemática dos mesmos é um problema muito complexo de ser resolvido. As informações de geração dos módulos FV informadas pelos fabricantes normalmente são determinadas nas condições de teste padrão (*Standard Test Conditions* – STC), irradiância (G) de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura da célula (T) de 25 °C, e um espectro solar médio de massa de ar (*Air Mass* – AM) de 1,5 são utilizados. Contudo, em condições normais de operação, os módulos FV são afetados pela variação de irradiância e mudanças de temperatura a todo momento. Assim, para casos práticos, as informações do *datasheet* já não são mais válidas (JUNIOR, 2023; ZHANG et al., 2022a). Portanto, torna-se importante a utilização de um modelo para o módulo FV, possibilitando a representação do mesmo para diversas condições climáticas.

As principais vantagens do SDM, formado apenas por cinco parâmetros, são a baixa complexidade e boa precisão para uma ampla faixa de pontos de operação, tornando-o um dos modelos mais utilizados (ZHANG et al., 2022a). Para obtenção de um modelo mais preciso, principalmente para baixas irradiâncias, é adicionado outro diodo em paralelo, capaz de representar a perda por recombinação que era negligenciada no SDM, formando o modelo de dois diodos. Essa adição faz com que o DDM adicione mais dois parâmetros aos cinco parâmetros do SDM. Em contrapartida, o aumento de precisão eleva a complexidade para obtenção dos parâmetros do modelo (JUNIOR, 2018; JUNIOR, 2023). Por fim, a adição de um terceiro diodo faz com que o modelo TDM, seja ainda mais preciso do que os modelos SDM e DDM. Além das características apontadas pelos modelos anteriores, o TDM considera a perda associada aos defeitos do cristal de superfície. Sua alta precisão tem sido aproveitada para representar módulos FV com tecnologia de filme fino, condições de baixa irradiância e, também, para investigar efeitos de sombreamento. No entanto, apesar de melhorar a precisão, esta adição eleva o número de parâmetros para nove, aumentando ainda mais a complexidade ao comparar com o SDM (JUNIOR, 2023).

No entanto, utilizando tais modelos elétricos, para cada valor de G e de T, os parâmetros assumem diferentes valores, sendo necessário reconstruir o modelo do módulo PV para cada ponto de operação. Entretanto, sabe-se que as curvas de geração de um módulo FV dependem tanto de G como de T, que variam constantemente. Assim, utilizar de maneira imediata os circuitos elétricos equivalentes para modelar matematicamente módulos FV não é o ideal pois esses modelos que restringem a representar apenas um ponto de operação demonstram limitações e têm utilidade prática reduzida, precisando serem recalculados a todo momento, demandando muito esforço computacional. Com isso, é importante garantir que os modelos utilizados consigam representar o módulo FV em

qualquer condição ambiental possível e sem muita demanda computacional.

Para solucionar esse problema, os modelos globais não-lineares (MGNL) foram propostos. Esses modelos utilizam os mesmos circuito elétricos dos modelos clássicos, mas agora possuem parâmetros adicionais dependentes da variação de  $G$  e  $T$ . Essa dependência é normalmente representada por equação de natureza não-linear diretamente dependentes das variações e/ou valores de referência de  $G$  e  $T$ . O primeiro MGNL para módulos FV foi proposto por (SILVA, 2019). A partir deste, diferentes autores propuseram seus próprios MGNLs. Porém, na literatura atual, não existe uma síntese dessas modelagens nem uma comparação entre suas performances na representação de módulos FV de características construtivas não usuais como a-Si, CIGS e HIT. Vale-se ressaltar também que, para as tecnologias mencionadas, não foram propostos modelos SDM pensando especificamente nas suas características construtivas, já que as principais publicações focam na modelagem de módulos de silício cristalino (c-Si).

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo revisar e comparar a performance de MGNLs baseados no modelo SDM presentes na literatura quando aplicados a tecnologias construtivas não usuais como CIGS, HIT e aSi. Além da análise comparativa dos MGNLs, busca-se introduzir modificações paramétricas e construtivas nos MGNLs existentes, com o intuito de aprimorar suas performances na elaboração da modelagem matemática de módulos FV não usuais, de forma que os modelos modificados possuam uma ótima precisão e correspondência rigorosa com o comportamento físico de módulos FV sob variações das condições ambientais.

## 1.2 METODOLOGIA

Inicialmente, são feitas revisões bibliográficas com a finalidade de levantar os principais MGNLs propostos na literatura para as tecnologias que serão estudadas com foco em no circuito elétrico de um diodo. Todos os modelos e simulações utilizados neste trabalho foram construídos utilizando o *software* MATLAB.

Para todas as tecnologias que são apresentadas neste trabalho, a NREL disponibiliza um banco de dados das curvas experimentais. Os modelos são testados com os dados experimentais, salientado que o estudo é realizado para diferentes condições de temperatura e irradiância, a fim de realizar uma comparação completa dos modelos selecionados. Para comparar a performance dos modelos com seus dados reais, foram utilizadas métricas que comparam sua precisão na geração tanto da curva I-V, Desvio Médio Quadrático Normalizado (NRMSD), como na curva P-V, Erro Médio Absoluto em Potência Normalizado (EMAPN).

São realizadas duas etapas de validação dos resultados, uma análise preliminar que utiliza cinco curvas em diferentes condições ambientais para validar a operação dos modelos construídos e uma análise geral que utiliza 100 curvas aleatórias a fim de comparar a capacidade de generalização dos modelos estudados. Após obter os resultados das análises, é verificado qual modelo apresentou maior fidelidade em comparação com os dados experimentais da NREL. São também realizadas modificações nos modelos que apresentarem melhor desempenho, afim de propor melhorias e tornar os modelos ainda mais fidedignos aos módulos ou células aSi, CIGS e HIT.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

Este trabalho de conclusão de curso é organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2:** Neste capítulo, são apresentadas as tecnologias não convencionais estudadas neste trabalho (aSi, CIGS e HIT). Discutem-se, em comparação com as tecnologias de c-Si, as diferenças no seu processo construtivo, juntamente com uma análise mercadológica e de aplicações específicas dessas tecnologias. Também, é apresentado uma revisão histórica dos modelos matemáticos para módulos FV e suas diferentes formas e aplicações;
- **Capítulo 3:** Neste capítulo, o objetivo é apresentar um conjunto de MGNLs presentes na literatura e explicar sua estrutura de funcionamento. Em seguida, para cada MGNL escolhido, são propostas metodologias de extrapolação paramétricas para melhoria do seu modelo;
- **Capítulo 4:** Neste capítulo, são inicialmente apresentadas a metodologia para obtenção dos resultados, assim como as métricas de comparação e as condições das simulações. Em seguida, os resultados obtidos na estimação dos parâmetros dos módulos de aSi, CIGS e HIT são apresentados, sendo realizada uma análise comparativa de performance para ambos os modelos originalmente propostos como para suas versões modificadas;
- **Capítulo 5:** Neste capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas através dos principais resultados como também as possibilidades de trabalhos futuros.

## 2 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS NÃO USUAIS E REVISÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS BÁSICOS

Este capítulo contempla um embasamento teórico acerca das tecnologias estudadas neste trabalho, bem como uma revisão histórica acerca da modelagem matemática de módulos FV. Primeiramente, são apresentados os aspectos construtivos, mercadológicos e de aplicação para cada uma das tecnologias utilizadas. Em seguida, são apresentados os conceitos básicos da modelagem matemática de módulos FV, incluindo os modelos elétricos clássicos, a definição de MGNL e o diferencial das suas capacidades e aplicações.

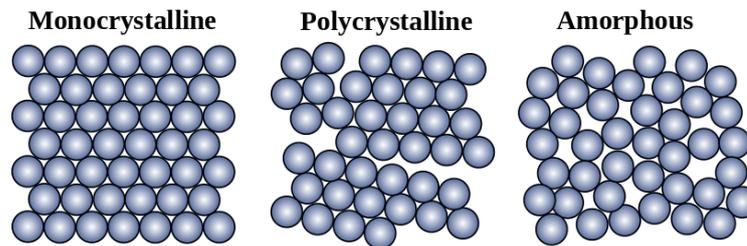
### 2.1 TECNOLOGIAS ESTUDADAS E SUAS APLICAÇÕES

Nesta seção, são apresentadas individualmente todas as tecnologias utilizadas, abordando as estruturas construtivas do semiconductor, aplicações específicas no mercado, características elétricas e suas distinções em relação ao silício cristalino (c-Si).

#### 2.1.1 Silício Amorfo (aSi)

O aSi é a forma não cristalina do silício muito utilizado em células FV e em transistores de filme finos para aparelhos de tela de cristal líquido (*Liquid Crystal Display* - LCD). O silício quando associado por conexões tetraédricas fortes e organizadas que ocorrem por todo o material, forma assim sua forma cristalina. Por outro lado, na configuração amorfa, os átomos estão distribuídos de maneira aleatória e sem coordenação. A Figura 1 apresenta as diferentes formas de organização atômica do silício e suas classificações.

Figura 1 – Alótropos do silício: monocristalino, policristalino e amorfo.



Fonte: (Wikipedia contributors, 2023).

A célula FV de aSi é classificada como uma célula de segunda geração, juntamente com outras tecnologias de filme fino como CIGS, telureto de cádmio (CdTe) e arsenieto de gálio (GaAs) (TSAI; TSAI, 2018). A eficiência das células de aSi puras é inferior quando comparadas tanto com as de c-Si como suas companheiras de geração. Devido a isso, atualmente são realizados vários processos para aumentar a eficiência e absorção das células aSi em diferentes espectros da luz solar (TSAI; TSAI, 2018; WRONSKI et al., 2004).

Para contornar tais problemas na eficiência da célula de aSi puro, existem atualmente duas alternativas. A primeira consiste em depositar uma camada microscópica de silício policristalino hidrogenado durante a produção do *wafers* de aSi, com finalidade tanto de atuar como uma zona de recombinação com menor energia de *gap* como também de aumentar a quantidade de luz absorvida pela célula devido às características do c-Si (KEPPNER et al., 1999; OHMUKAI; TSUYOSHI, 2017). A partir de tais modificações, a célula é agora classificada como silício amorfo micro-morfo (aSi-Micro).

A outra alternativa para aumentar a eficiência de células de aSi consiste em, ao invés de dopar o aSi com c-Si na construção do *wafers*, são empilhadas duas laminas de material semicondutor, uma de silício amorfo e outra de c-Si formando assim uma heterojunção (KEPPNER et al., 1999; YAMAUCHI et al., 2005). A partir dessas modificações, a célula é agora classificada como silício amorfo tandem (aSi-Tandem).

Células e módulos de silício amorfo, por serem muito versáteis, possuem diferentes aplicações, podendo tanto serem utilizados em pequena escala para alimentar baterias de pequenos eletrônicos como calculadoras e relógios, como também em projeto de maior escala como a sua integralização em construções e estruturas arquitetônicas de cidades (TSAI; TSAI, 2018). A aplicação BIPV não apenas amplia e enriquece as opções e funcionalidades para aplicações FV, mas também torna a energia solar mais acessível e integrada ao nosso cotidiano.

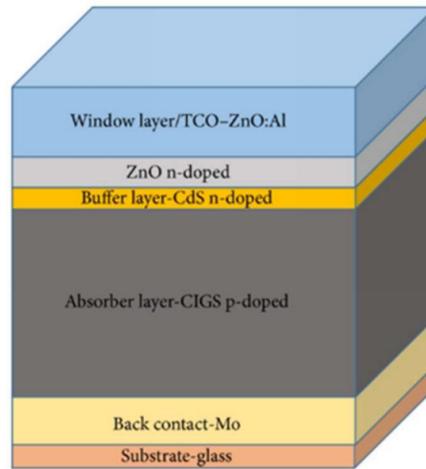
Nas aplicações de BIPV, os módulos FV são incorporados diretamente a materiais de construção, como janelas, claraboias, fachadas, coberturas e paredes exteriores, tornando o BIPV uma solução ideal para aproveitar a eletricidade solar enquanto preserva as funções arquitetônicas e a estética dos edifícios. Devida à crescente demanda de tecnologias de filme fino para serem utilizadas em BIPV, essas tecnologias de filme fino estão sempre em desenvolvimento tecnológico, tanto para melhorar suas especificações de eficiência como também para ser possível customizar seu grau de transparência e sua cor, de modo a não constatar com as cores de onde são instaladas.

### 2.1.2 Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS)

A tecnologia CIGS é fabricada depositando uma fina camada de solução sólida de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) sobre uma base de vidro ou plástico, juntamente com eletrodos na parte frontal e traseira para coletar elétrons, como mostra a Figura 2. Devido ao alto coeficiente de absorção do material e à forte absorção de luz solar, é necessária uma película muito mais fina em comparação com outros materiais semicondutores (BOUABDELLI et al., 2020).

Quando comparada à tecnologia de aSi, células e módulos CIGS são considerados mais promissores, devido à diversas características, incluindo maior eficiência, processos de fabricação simples e produção de baixo custo. Assim como outras tecnologias de filme fino, células CIGS apresentam grande flexibilidade e não são leves, sendo muito versáteis para

Figura 2 – Representação da estrutura construtiva de uma célula FV CIGS.



Fonte: (SALHI, 2022).

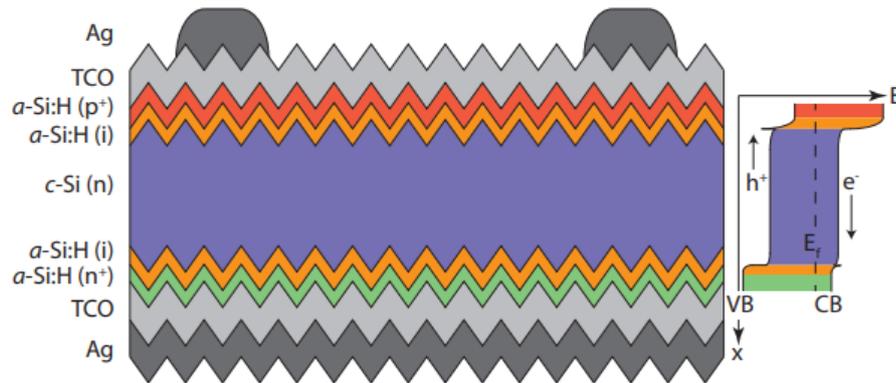
qualquer tipo de aplicação. Dessa forma, tecnologias CIGS são alternativas aos módulos de aSi, podendo ser aplicados tanto em projetos para alimentar pequenos dispositivos eletrônicos como também ser implementados em grandes projetos BIPV e integralizar construções enquanto geram energia elétrica (BOUABDELLI et al., 2020; Marcelo Villalva, 2020).

### 2.1.3 Heterojunção com Camada Fina Intrínseca (*Heterojunction with Intrinsic Thin layer - HIT*)

Tecnologias HIT são uma classificação de tecnologias de células FV baseadas na heterojunção de materiais semicondutores de diferentes energias de *gap*. Considera-se uma tecnologia híbrida, incorporando aspectos de módulos FV cristalinos como também de módulos FV de filme fino (WOLF et al., 2012). Em comparação com as outras tecnologias de filme fino, células HIT apresentam a vantagem de maior eficiência energética em relação tanto à tecnologia aSi quanto à CIGS (YOSHIKAWA et al., 2017; Marcelo Villalva, 2019). A construção mais comum de células HIT é constituída da heterojunção de uma fina superfície de aSi intrínseco (silício puro sem dopantes), camadas de silício dopado em ambas as superfícies da célula e com uma grande camada central de c-Si (WOLF et al., 2012; YOSHIKAWA et al., 2017), como mostra a Figura 4.

As células HIT tem como principais vantagens misturar a já alta eficiência do c-Si com os pontos positivos de células de aSi. Por exemplo, ao utilizar as camadas de aSi é possível reduzir os coeficientes de temperatura do módulo. Além disso, ao separar os contatos ôhmicos da estrutura cristalina do silício reduz-se em muito as perdas por recombinação de elétrons no material semicondutor (YOSHIKAWA et al., 2017). Contudo, por ser uma tecnologia com características próximas das do c-Si, a mesma perde a versatilidade das tecnologias de filme fino como aSi e CIGS e compete diretamente com os módulos

Figura 3 – Representação da estrutura construtiva de uma célula FV HIT.



Fonte: (WOLF et al., 2012).

tradicionais de silício (YOSHIKAWA et al., 2017; Marcelo Villalva, 2019). Entretanto, com seu constante desenvolvimento no aumento da eficiência e no barateamento da sua produção projeta-se um futuro com o aumento da parcela de mercado reservada a tecnologia HIT (YOSHIKAWA et al., 2017).

#### 2.1.4 Aplicações Específicas

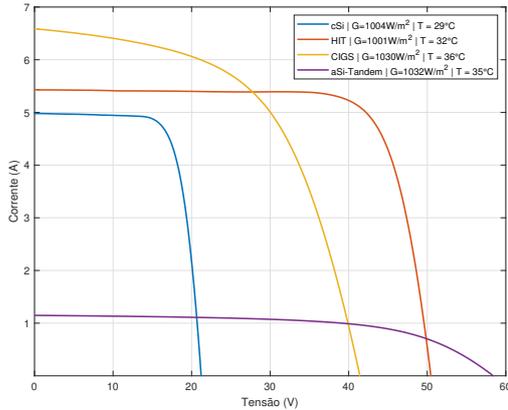
Conforme abordado de forma superficial nas seções anteriores, tecnologias de filme fino, como aSi e CIGS, possuem diferentes aplicações quando comparadas apenas a tecnologias de estrutura cristalina. A principal diferença é a possibilidade de produzir módulos flexíveis, cobrir superfícies não planas com um revestimento fino (podendo chegar a 100 vezes menos espesso que um módulo de c-Si) e serem leves, feitos de plástico. Enquanto tecnologias cristalinas necessariamente são planas, rígidas e muito quebradiças, necessitando de estruturas robustas e pesadas compostas de vidro e alumínio para seu condicionamento (Marcelo Villalva, 2020).

Além das vantagens dadas por conta de aspectos físicos, módulos de filme fino possuem também coeficientes térmicos reduzidos, sendo menos afetada com elevação da temperatura. Além disso, também possuem alta absorção de irradiância difusa, permitindo a instalação em posição vertical, possibilitando sua integração na arquitetura. Podem ser fabricados em dimensões customizadas, pequenas ou grandes, sem restrição devido à natureza quebradiça dos módulos cristalinos nem ter seu desempenho comprometido por micro rachaduras (Marcelo Villalva, 2020; BOUABDELLI et al., 2020; TSAI; TSAI, 2018). Por fim, já existem módulos CIGS com eficiência próxima de módulos tradicionais de silício porem com as vantagens de versatilidade de filmes finos, como o CIGS tetra-gradiente, capaz de chegar a 23,65% de eficiência em ambiente laboratorial (LIU et al., 2022).

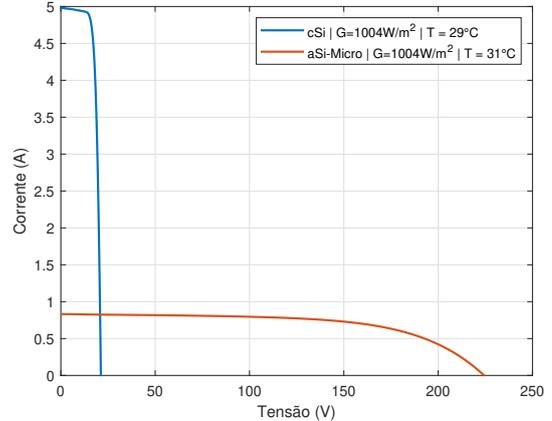
Devido às vantagens listadas, ambas as tecnologias aSi e CIGS são ótimas opções para aplicações em BIPV (Marcelo Villalva, 2020; SHUKLA; SUDHAKAR; BARENDAR, 2017; KUHN et al., 2021). Aplicações BIPV tem experimentado um crescimento notável, refletindo a busca



Figura 5 – Comparação de curvas I-V's das tecnologias estudadas neste trabalho.



(a) Comparação de curvas I-V's entre tecnologias c-Si, aSi-Tandem, CIGS e HIT.



(b) Comparação de curvas I-V's entre tecnologias c-Si e aSi-Micro.

Fonte: Próprio Autor (2024).

pequenas alterações construtivas apresentam grandes aumentos na eficiência das suas células (WOLF et al., 2012; YOSHIKAWA et al., 2017). Com isso, devido a sua estrutura cristalina mais complexa que os módulos de c-Si, mesmo que em menor escala, torna-se necessário investigar os impactos destas mudanças na sua modelagem matemática, visando representar esses tipos de tecnologia em diferentes tipos de simulações e aplicações no futuro.

### 2.1.5 Características Elétricas

Nas seções anteriores, foram discutidos os aspectos construtivos e mercadológicos das tecnologias utilizadas neste trabalho. Agora serão comparadas as características de geração de tais tecnologias. Utilizando o banco de dados disponibilizado pela NREL, foram selecionadas cinco curvas com valores de irradiância e temperatura próximos para cada uma das tecnologias citadas neste trabalho (c-Si, aSi-Micro, aSi-Tandem, CIGS e HIT) com finalidade de ter uma comparação visual das diferentes características elétricas de cada uma dessas tecnologias. Idealmente também seria interessante selecionar módulos de potências similares para fazer tal comparação, entretanto a NREL disponibiliza módulos de modelos específicos para cada tecnologia. Dessa forma, tem-se para as tecnologias de aSi-Micro uma potência de  $100W$ , aSi-Tandem uma potência de  $37,7W$ , CIGS uma potência de  $140W$  e para HIT uma potência de  $212W$ .

Tal análise comparativa está presente na Figura 5, sendo a primeira, Figura 5a, aquela que compara a curva I-V do c-Si com as tecnologias aSi-Tandem, CIGS e HIT, enquanto a Figura 5b compara a curva I-V do c-Si com uma curva de aSi-Micro de características muito destoantes das demais.

É importante ressaltar que, tal análise é superficial e deve ser interpretada apenas

para demonstrar que os formatos e características das curvas I-V's são diferentes entre si. Através da Figura 5a, nota-se que o comportamento tanto das regiões lineares como o joelho da curva se assemelham muito à da curva de c-Si, podendo-se assumir que os MGNL's que representam com exatidão módulos de c-Si possivelmente irão obter bons resultados para HIT também. Já o mesmo não pode ser dito para demais tecnologias, onde para CIGS, por exemplo, são apresentados comportamento bastante não lineares próximos dos pontos de corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) e de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), diferente de módulos de c-Si, podendo essas regiões terem dificuldade de serem representadas por modelos projetados pensando em representar tecnologias de silício convencionais. Agora, em relação às tecnologias de aSi, não apenas no formato da curva, onde na região não linear tem-se uma descida ao ponto de  $V_{oc}$  muito mais suave, mas também são apresentadas grandezas de corrente e tensão de operação muito distintas das de c-Si, podendo esse também ser um problema na hora de construir um modelo matemático para estas tecnologias.

## 2.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA MÓDULOS FV

A energia solar FV destaca-se como uma fonte renovável de operação silenciosa e com manutenção simples e de baixo custo. Como já comentado anteriormente, os módulos FV são constituídos pelas combinações de células de material semicondutor, elemento básico e fundamental dos sistemas FV. Tais célula estão em constante evolução e aprimoramento tecnológico, com suas características de saída impactando na produção de todo o sistema de geração FV (ALY; AHZI; BARTH, 2019).

Assim sendo, os modelos matemáticos dos módulos desempenham um papel essencial na compreensão mais aprofundada de seu funcionamento. Esses modelos têm ampla aplicação em diversos setores relacionados aos sistemas FV, abrangendo áreas como projeto, simulação, controle, planejamento, avaliação de desempenho e dimensionamento (FAHIM et al., 2022). Dessa forma, torna-se fundamental possuir uma forma de prever com precisão o comportamento e a geração para diferentes condições de operação. Com isso, vários circuitos equivalentes foram propostos na literatura na tentativa de representar o comportamento dos módulos FV (GHOLAMI et al., 2022).

Dos modelos básicos propostos na literatura, vários são baseados em uma fonte FV, um ou mais resistores em paralelo e em série e um ou mais diodos (GHOLAMI et al., 2022). Dentre os modelos básicos presentes na literatura, os três mais conhecidos são o SDM, o DDM e o TDM, existindo outros modelos menos conhecidos com estruturas e quantidades de diodos diferentes. Entretanto, quando mais componentes e incógnitas são colocadas no modelo, mais complexo e robusto se torna o problema para determinar todos os seus parâmetros (ZHANG et al., 2022a).

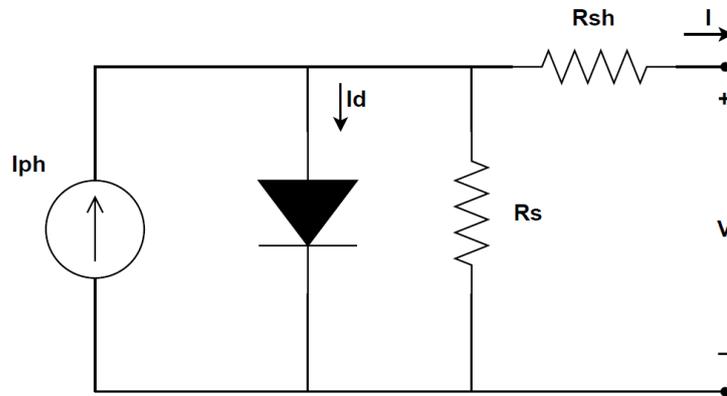
### 2.2.1 Modelo de um diodo

As principais vantagens do SDM, são a baixa complexidade e boa precisão para uma ampla faixa de pontos de operação, tornando-o um dos modelos mais utilizados (ZHANG et al., 2022a). Conseqüentemente, o modelo SDM é o modelo base para o estudo realizado neste trabalho, comparando a performance de modelos matemáticos baseados na sua construção, ou seja, modelos constituídos de cinco parâmetros que modelam a influência de diferentes fatores ambientais em suas características (ZHANG et al., 2022b).

O modelo SDM é composto por 5 parâmetros, sendo eles uma fonte de foto-corrente,  $I_g$  (A), que representa a irradiação solar que atinge a célula solar FV; um diodo paralelo, com um fator de idealidade,  $n$ , que é usado para simular o fenômeno de polarização, uma corrente de saturação reversa,  $I_{sat}$  (A); um resistor de série,  $R_s$  ( $\Omega$ ), que simboliza as perdas devido aos contatos metálicos, junção p-n e interconexões entres os semicondutores e um resistor paralelo ou *shunt*,  $R_{sh}$  ( $\Omega$ ), que representa os defeitos de cristal e impurezas na região de junção dos semicondutores (JUNIOR, 2023).

Através da análise do circuito elétrico equivalente do SDM, presente na Figura 6, é possível obter a equação que determina a corrente de saída do módulo FV:

Figura 6 – Modelo SDM.



Fonte: Próprio Autor (2023).

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{V + IR_s}{nV_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}. \quad (2.1)$$

Onde a tensão térmica,  $V_t$ , pode ser determina através da equação:

$$V_t = \frac{N_s K T}{q}, \quad (2.2)$$

onde  $N_s$  é o número de células em série na construção do módulo,  $K$  é a constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} J/K$ ),  $q$  é a carga de elétron ( $1,602 \cdot 10^{-19} C$ ), e  $T$  é a temperatura da célula em Kelvin.

A corrente de saturação reversa possui uma dependência significativa em relação ao material semiconductor utilizado na construção do módulo, sendo importante saber de

qual material é o módulo trabalhado para utilizar o valor correto para a energia do *gap* do semiconductor. A equação que representa matematicamente a energia de *gap* do material semiconductor em função da temperatura é:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)}, \quad (2.3)$$

onde  $E_g(T)$  é a banda de energia correspondente a temperatura analisada,  $E_g(0)$  é valor da energia de banda próximo da temperatura de  $0\text{ K}$  e  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes.

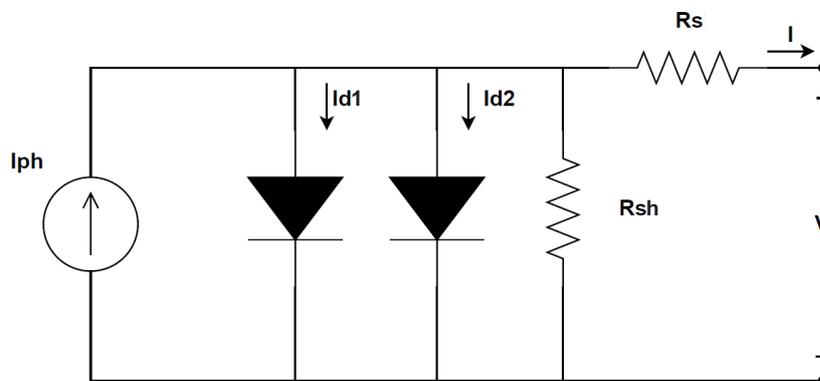
Para o material de c-Si, usa-se  $E_g(0) = 1,12\text{ eV}$ . Enquanto para as tecnologias avaliadas neste trabalho, tem-se: para silício amorfo, usa-se  $E_g(0) = 1,70\text{ eV}$ ; para CIGS, usa-se  $E_g(0) = 1,20\text{ eV}$  e para HIT, usa-se  $E_g(0) = 1,478\text{ eV}$  (SINGH; RAVINDRA, 2012; MORALES-ACEVEDO, 2012; BOUBAKEUR et al., 2020a; FAHR; ROCKSTUHL; LEDERER, 2010a).

### 2.2.2 Modelo de dois diodos

Para obtenção de um modelo mais preciso, principalmente para baixas irradiâncias, é adicionado outro diodo em paralelo, formando o modelo de dois diodos. Essa adição faz com o que o DDM adicione mais dois parâmetros aos cinco parâmetros já existentes do SDM, ficando assim com sete. Portanto, além dos parâmetros mencionados no SDM será incorporado um fator de idealidade ( $n_2$ ) e uma corrente de saturação  $I_{sat2}$  que conseguem representar a perda de recombinação no material semiconductor que era desconsiderada pelo SDM. Por outro lado, o aprimoramento da precisão através do aumento de parâmetros do modelo implica em uma maior complexidade na construção do modelo (JUNIOR, 2018; JUNIOR, 2023).

A Figura 7 apresenta o circuito elétrico equivalente do modelo DDM. Através dele, é possível obter a equação que representa a corrente de saída do módulo FV:

Figura 7 – Modelo DDM.



Fonte: Próprio Autor (2023).

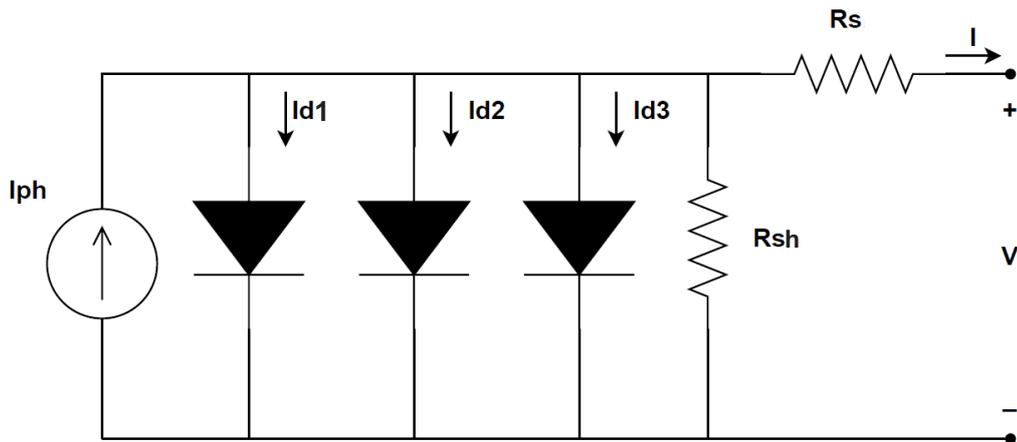
$$I = I_{ph} - I_{sat1} \left[ e^{\left( \frac{V+IR_s}{n_1 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{sat2} \left[ e^{\left( \frac{V+IR_s}{n_2 V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}. \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Modelo de três diodos

A adição de um terceiro diodo faz com que o modelo TDM seja ainda mais preciso do que os modelos SDM e DDM. Além das perdas consideradas pelos modelos anteriores, o TDM considera também a perda associada aos defeitos do cristal de superfície. Atualmente, sua alta precisão é utilizada na tentativa de representar módulos FV em condições de baixa irradiância, investigar efeitos de sombreamento e tecnologias com estruturas cristalinas mais complexas. E da mesma forma que o DDM, ao melhorar a precisão, adicionar dois novos parâmetros totalizando nove para o modelo, também aumenta sua complexidade (GHOLAMI et al., 2022; JUNIOR, 2023).

Através da análise do circuito elétrico equivalente do TDM, presente na Figura 8, é possível obter a equação que representa a corrente de saída do módulo FV:

Figura 8 – Modelo TDM.



Fonte: Próprio Autor (2023).

$$I = I_{ph} - I_{sat1} \left[ e^{\left( \frac{V+IR_s}{n_1 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{sat2} \left[ e^{\left( \frac{V+IR_s}{n_2 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{sat3} \left[ e^{\left( \frac{V+IR_s}{n_3 V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}. \quad (2.5)$$

### 2.2.4 Modelo global não linear

As informações de geração dos módulos FV disponibilizadas pelos fabricantes são normalmente determinadas para as condições STC, Quando em condições normais de operação, os módulos operam em diferentes condições de G e T, variando a todo momento. Com isso, para aplicações práticas, as informações dadas pelos *datasheets* dos módulos

já não são mais suficientes. Os modelos matemáticos clássicos apresentados nas seções anteriores apresentam comportamento extremamente não linear, tornando sua resolução um problema complexo. Além disso, tais modelos clássicos são capazes de representar o módulo FV em apenas uma condição ambiental específica, sendo necessário reconstruir o modelo para cada mínima alteração de  $G$  ou  $T$ , tendo assim suas utilidades práticas comprometidas. Por conta disso, é necessária então a utilização de um modelo de módulo FV que consiga representar o mesmo em diversas condições climáticas (JUNIOR, 2023; SILVA, 2019).

Com finalidade de solucionar tal problema, surgiram os MGNLs. Estes modelos utilizam os mesmos circuitos elétricos dos modelos clássicos, porém os parâmetros elétricos destes modelos possuem grandezas dependentes das variações de  $G$  e  $T$ . O primeiro MGNL para módulos FV foi proposto por (SILVA, 2019) e teve sua estrutura baseada no modelo SDM.

Desde (SILVA, 2019), foram propostos diversos modelos baseados na sua abordagem de modelagem de criar parâmetros dependentes da variação das condições ambientais. Entretanto, tais modelos apresentam sempre diferentes estruturas, sejam elas pela forma que o equacionamento é construído e tratado ou seja pelo diferente modelo clássico utilizado como referência em (JUNIOR, 2018), por exemplo, é proposto um MGNL baseado no modelo DDM ao invés do SDM (JUNIOR, 2023). Para tecnologias não convencionais com estrutura cristalina mais complexa que a do  $c$ -Si como as que são estudadas neste trabalho, na literatura encontram-se MGNL baseados em DDM e TDM para tentar representar seu comportamento I-V (GHOLAMI et al., 2022; JUNIOR, 2018). Entretanto, não existe nenhum trabalho na literatura que para tais tecnologias faça uma síntese dos modelos existentes e muito menos uma comparação dos resultados apresentados para tais modelos. Por conta disso, neste trabalho serão estudados os MGNL's baseados no modelo mais básico (SDM) presentes na literatura atual e a comparação dos resultados obtidos por tais modelos quando aplicados às tecnologias aSi, CIGS e HIT.

## 2.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, são apresentadas as tecnologias utilizadas e estudadas neste trabalho junto de uma análise de seus aspectos construtivos, mercadológicos e elétricos, justificando suas diferenças de módulos tradicionais de  $c$ -Si e a necessidade do estudo de seus modelos matemáticos. Além disso, uma apresentação dos modelos matemáticos clássicos existentes para módulos FV e dos MGNL's, abordagem mais robusta e moderna utilizada atualmente, que terão seus funcionamentos e parametrizações abordadas no capítulo seguinte.

### 3 MODELOS GLOBAIS NÃO LINEARES E TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS

Este capítulo trata dos modelos de módulos FV capazes de realizar a representação em mais de uma condição ambiental. Inicialmente, serão apresentados os modelos de módulos FV encontrados na literatura que foram utilizados neste trabalho, analisando quais deles já tentaram modelar tecnologias não usuais juntamente com todo o equacionamento necessário para construção e compreensão dos modelos. Em seguida, serão discutidas as extrapolações e modificações paramétricas propostas para os modelos já apresentados para que os mesmos consigam representar com maior fidedignidade os módulos FV de tecnologias construtivas diferentes.

A escolha dos MGNLs avaliados neste trabalho foi feita a partir da pré-seleção realizada por (JUNIOR, 2023), onde para as tecnologias de c-Si foi feito um ranqueamento de performance dos MGNLs capazes de representar o comportamento não linear da curva I-V de um módulo FV. Explicações mais detalhadas da operação de cada algoritmo de otimização e dos modelos utilizados neste trabalho estão disponíveis em (JUNIOR, 2023, Cap. 3). Os Fluxogramas que explicitam a operação mais detalhada de cada modelo está disponível no Apêndice A deste trabalho.

#### 3.1 MODELO DE SILVA

O modelo proposto em (SILVA, 2019) foi a primeira técnica global não linear proposta para SDM na literatura. Para cada parâmetro do SDM, podem-se utilizar equações de transposição, dependentes tanto da irradiância como da temperatura, baseadas nas características físicas do módulo. No modelo de Silva, esse equacionamento de transposição não é utilizado para todos os parâmetros do SDM. Dessa forma, através das equações de transposição utilizadas são gerados múltiplos sub parâmetros, que aumentam a quantidade de parâmetros a serem analisados de cinco para oito.

Uma das principais inovações desse modelo consiste na influência das mudanças tanto da irradiância como da temperatura nos oito parâmetros trabalhados. O modelo de Silva inclui quatro parâmetros relacionados à resistência série, três relacionados à resistência paralela, e um relacionado ao fator de idealidade do diodo. Por fim, outras grandezas necessárias para descrição completa do funcionamento do módulo FV ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{ph}$  e  $I_{sat}$ ) são calculados através de equações explícitas dependentes dos oito parâmetros do modelo.

É relevante ressaltar que, devido à natureza generalista do modelo, é inicialmente executado um processo de busca dos parâmetros utilizando um algoritmo de otimização. Dito isso, foi escolhido originalmente pelo autor do modelo o algoritmo de otimização *Pattern Search* (PS) para o processo de estimação dos parâmetros, sendo este capaz de

alcançar elevada precisão na modelagem de células. Entretanto, sabe-se que a escolha do algoritmo de otimização utilizado é fundamental para obtenção de melhores resultados.

Em (JUNIOR, 2023), foi realizada a comparação de resultados do modelo de Silva utilizando diferentes algoritmos de otimização aplicados na extração de parâmetros de módulos fotovoltaicos, e os algoritmos que obtiveram melhor desempenho foram: *Pattern Search* (PS), *Guaranteed Convergence Particle Swarm Optimization* (GCPSO) e *Drone Squadron Optimization* (DSO). Dessa forma, para este trabalho, ao ser utilizado o modelo de Silva, o mesmo será processado utilizando três algoritmos de otimização diferentes.

Para a primeira etapa do modelo, com finalidade de determinar os parâmetros de referência, são definidas constantes básicas, como a constante de Boltzmann ( $k$ ) e a carga elementar do elétron ( $q$ ), em seguida constantes construtivas dos módulos fotovoltaicos, número de células FV em série na construção do módulo ( $N_s$ ), assim como uma curva I-V de referência é fornecida. Através da curva de referência, são atribuídas as grandezas:  $G_{ref}$ ,  $T_{ref}$ ,  $I_{mp,ref}$ ,  $V_{mp,ref}$ ,  $I_{sc,ref}$  e  $V_{oc,ref}$ . Em seguida, a partir das grandezas obtidas através da curva de referência, são calculados os valores de resistência série máxima ( $R_{s,max}$ ) e da resistência paralela mínima ( $R_{sh,min}$ ) a fim de restringir a busca do algoritmo de otimização dentro de uma zona em que os parâmetros ainda tenham significado físico de acordo com as características do módulo. Por fim, utilizando os valores calculados anteriormente como limitantes, utiliza-se o algoritmo de otimização para estimar os parâmetros restantes de interesse da primeira etapa:  $R_{s,ref}$ ,  $R_{sh,ref}$ ,  $n_{ref}$ ,  $I_{sc,ref}$  e  $V_{oc,ref}$ .

A seguir, é definido um conjunto de seis curvas I-V's, denominadas de curvas de treinamento, com diferentes valores de irradiância e temperatura. Após a definição das seis curvas de treinamento, aplica-se então o mesmo algoritmo de otimização da primeira etapa, buscando um menor erro para  $\alpha_{I_{sc}}$  na corrente de curto-circuito gerada pelo modelo e os menores valores de erro para  $\beta_T$  e  $\beta_S$  na tensão de circuito aberto. Após obtidos os valores de  $\alpha_{I_{sc}}$ ,  $\beta_T$  e  $\beta_S$  através do processo de otimização, juntamente com os parâmetros  $I_{sc,ref}$  e  $V_{oc,ref}$  calcula-se então as grandezas  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  a partir das equações:

$$I_{sc} = [I_{sc,ref} + \alpha_{I_{sc}}(T - T_{ref})] \left( \frac{G}{G_{ref}} \right), \quad (3.1)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + \beta_T(T - T_{ref}) + \beta_S V_t \ln \left( \frac{G}{G_{ref}} \right). \quad (3.2)$$

A seguir, é realizado outro processo de otimização com objetivo de buscar os parâmetros que compõem as equações de transposição de  $R_s$  e  $R_{sh}$ . Tem-se como equação para  $R_s$ :

$$R_s = R_{s,ref2}[1 + \kappa_{R_s}(T - T_{ref})] + R_{s,ref1} \left( \frac{G}{G_{ref}} \right)^{\gamma_{R_s}}, \quad (3.3)$$

onde,  $\gamma_{R_s}$ ,  $\kappa_{R_s}$  são coeficientes de variação de  $R_s$  com a irradiância e temperatura, nesta ordem, sendo  $\gamma_{R_s} \leq 0$ . Com  $R_{s,ref1}$  representando a parcela de  $R_s$  impactada pela variação

da irradiância e  $R_{s,ref2}$  a parcela impactada pela variação de temperatura, com as duas parcelas precisando respeitar a relação:

$$R_{s,ref} = R_{s,ref1} + R_{s,ref2}, \quad (3.4)$$

Para  $R_{sh}$ , tem-se a equação:

$$R_{sh} = R_{sh,ref} [1 + \kappa_{Rsh}(T - T_{ref})] \left( \frac{G}{G_{ref}} \right)^{\gamma_{Rsh}}, \quad (3.5)$$

sendo,  $R_{sh,ref}$  a parcela de  $R_{sh}$  que representa a condição de referência,  $\kappa_{Rsh}$  o coeficiente de variação de  $R_{sh}$  com a temperatura e  $\gamma_{Rsh}$  o coeficientes de variação de  $R_{sh}$  com a irradiância, sendo  $\gamma_{Rsh} \leq 0$ .

Para o modelo de Silva, considera-se que o fator de idealidade do diodo não varia de acordo com as mudanças na irradiância e temperatura. Dessa forma, o valor de  $n$  encontrado na etapa de referência seguirá sendo aplicado para todas as condições ambientais em que o módulo seja exposto, ou seja:

$$n = n_{ref}. \quad (3.6)$$

Neste momento, tem-se os oito parâmetros necessários para descrever matematicamente o funcionamento do painel fotovoltaico ( $R_{s,ref1}$ ,  $R_{s,ref2}$ ,  $\kappa_{Rs}$ ,  $\gamma_{Rs}$ ,  $R_{sh,ref}$ ,  $\kappa_{Rsh}$ ,  $\gamma_{Rsh}$ , e  $n_{ref}$ ) que foram estimados através dos processos de otimização. Por fim, os últimos dois parâmetros restantes do SDM ( $I_{ph}$  e  $I_{sat}$ ) são calculados de forma explícita através das equações:

$$I_{ph} = I_{sc} \left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right), \quad (3.7)$$

$$I_{sat} = \frac{I_g - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} - 1}. \quad (3.8)$$

A fim de preservar a significância física dos parâmetros identificados e assegurar a convergência do problema, é importante estabelecer limites inferiores e superiores para cada um dos parâmetros procurados pelo algoritmo de otimização. Dessa forma, a busca de  $n$  é delimitada através da tecnologia trabalhada, onde para silício cristalino é realizada a busca entre zero e dois, enquanto os outros parâmetros tem seus valores delimitados através das equações presentes a seguir:

$$R_{S,max} = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}, \quad (3.9)$$

$$R_{sh,min} = \frac{V_{mp}}{I_{sc} - I_{mp}}, \quad (3.10)$$

$$k_{R_s,max} = \frac{\frac{R_{s,max} - R_{s,ref}}{R_{s,ref}} - 1}{(T - T_{ref})}, \quad (3.11)$$

$$k_{R_{sh},min} = \frac{\frac{R_{sh,min}}{R_{s,ref}} - 1}{(T - T_{ref})}, \quad (3.12)$$

$$\gamma_{R_s,min} = \frac{\log\left(\frac{R_{s,max} - \frac{R_{s,ref}}{2}}{R_{s,ref}}\right)}{\log\left(\frac{G}{G_{ref}}\right)}, \quad (3.13)$$

$$\gamma_{R_{sh},min} = \frac{\log\left(\frac{R_{sh,min}}{R_{sh,ref}}\right)}{\log\left(\frac{G}{G_{ref}}\right)}. \quad (3.14)$$

Por fim, os limites utilizados para o modelo de Silva original estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites inferiores e superiores originalmente utilizados na busca de parâmetros para o modelo de Silva.

Parâmetro	Min	Max
$R_{s,ref}$	0	$R_{S,max}$
$R_{sh,ref}$	$R_{sh,min}$	10000
$K_{R_{sh}}$	$-k_{R_{sh},min}$	0
$K_{R_s}$	$-k_{R_s,max}$	$k_{R_s,max}$
$\gamma_{R_{sh}}$	$\gamma_{R_{sh},min}$	0
$\gamma_{R_s}$	$\gamma_{R_s,min}$	0
$n$	0	2
$\alpha_{I_{sc}}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$
$\beta_{V_{oc}}$	-1	$10^{-3}$

Fonte: Adaptado de (SILVA, 2019).

### 3.1.1 Modificações no Modelo de Silva

O modelo de Silva, assim como outros modelos que serão apresentados neste trabalho, foi desenvolvido e parametrizado para representar fidedignamente módulos de tecnologias construtivas mais conhecidas e utilizadas no mercado, como silício monocristalino, silício policristalino e telureto de cádmio (SILVA, 2019). No capítulo 4 são apresentados os melhores resultados obtidos pelos modelos originais para as tecnologias a-Si, CIGS e HIT, de características tanto físicas quanto elétricas muito diferentes das usuais, onde são comprovados que os resultados obtidos não são satisfatórios. Dessa forma, torna-se necessário realizar diferentes modificações e extrapolações paramétricas no modelo de Silva para averiguar se o mesmo consegue, de alguma forma, representar tais tecnologias não usuais.

Além da extensão dos limites de busca do algoritmo de otimização utilizado já mencionada na seção anterior onde, além do PS também são utilizados o GCPSO e o DSO, onde são realizadas, também, extrapolações nos limites de busca dos algoritmos de otimização para os parâmetros do modelo.

Inicialmente, para cada tecnologia estudada, foi analisado o impacto do limite de busca do fator de idealidade do diodo, visto que, com a mudança física da junção P-N do módulo, o valor do  $n$  iria divergir quando comparado com as tecnologias de silício. Ao aplicar o modelo de Silva sem nenhuma alteração nos limites de  $n$ , foi observado que para a maioria das tecnologias (CIGS, aSi-micro e aSi-Tandem), o valor encontrado pelo algoritmo de otimização sempre estava saturado no limite superior do mesmo, significando que o valor procurado pelo algoritmo de otimização está além do limite de busca estabelecido. Por conta disso, foi realizado o aumento do limite superior de  $n$  para cada tecnologia até que o valor encontrado para o mesmo estivesse não estivesse mais limitado pelo teto da busca. Através dessa metodologia, é possível obter resultados mais precisos para a etapa de referência do MGNL de Silva.

A seguir, de forma semelhante à modificação paramétrica de  $n$ , foram observados quais os demais parâmetros que estavam saturados tanto pelos seus limites inferiores como pelos superiores e realizadas extrapolações para aumentar o limite da busca do algoritmo de otimização. Através dessa análise, foram propostas modificações para os limites superiores de  $\gamma_{R_s}$  e  $\gamma_{R_{sh}}$ , bem como o limite inferior de  $k_{R_{sh}}$ , a fim de que, ao aplicar o modelo de Silva os valores obtidos pelo algoritmo de otimização estejam dentro do intervalo de busca e não saturados.

Dessa forma, os novos limites para busca dos parâmetros propostos para o modelo de Silva modificado estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites inferiores e superiores utilizados na busca de parâmetros para o modelo de Silva modificado.

<b>Parâmetro</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
$R_{s,ref}$	0	$R_{S,max}$
$R_{sh,ref}$	$R_{sh,min}$	10000
$K_{R_{sh}}$	$-k_{R_{sh},min}$	$k_{R_{sh},min}$
$K_{R_s}$	$-k_{R_s,max}$	$k_{R_s,max}$
$\gamma_{R_{sh}}$	$\gamma_{R_{sh},min}$	$-\gamma_{R_{sh},min}$
$\gamma_{R_s}$	$\gamma_{R_s,min}$	$-\gamma_{R_s,min}$
$n$	0	10
$\alpha_{I_{sc}}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$
$\beta_{V_{oc}}$	-1	$10^{-3}$

Fonte: Próprio Autor (2023)

Os resultados obtidos através do modelo de Silva original e do modelo de Silva modi-

ficado são discutidos e comparados no capítulo seguinte deste trabalho.

### 3.2 ZHANG 1

Em 2022, Zhang propôs dois MGNL's fundamentados no SDM, capazes de representar módulos FV em diferentes condições ambientais. Diferente do modelo de Silva, os modelos elaborados por Zhang não precisam de valores ou curva de referência para busca seus parâmetros (ZHANG et al., 2022b; ZHANG et al., 2022a). Ambos os modelos de Zhang foram propostos utilizando o algoritmo de otimização GCPSO para busca de parâmetros e com equacionamento de transposição diferente do utilizado em Silva, entretanto, ainda assim baseado no modelo físico do módulo FV.

É importante ressaltar que, assim como em Silva, os modelos de Zhang foram desenvolvidos para representar módulos de silício monocristalino e silício policristalino. Dessa forma, após a aplicação dos modelos originais, é também analisada a necessidade de modificação e extrapolação paramétrica para os modelos de Zhang.

Em (ZHANG et al., 2022b), assim como em Silva, o modelo tem como objetivo determinar os cinco parâmetros do circuito equivalente SDM que descreve o comportamento de um módulo FV. Dessa vez, utilizando o GCPSO como algoritmo de otimização e trazendo diferentes inovações quando comparado com outros modelos da literatura. Sendo a primeira delas, a não necessidade de se ter uma curva de referência para o treinamento do modelo, devido o mesmo ser treinado por uma vasta quantidade de curvas experimentais em diferentes condições ambientais. Outra inovação, quando comparado a outros modelos, é a consideração da interferência do efeito da temperatura na operação dos módulos, muitas vezes tendo seu efeito ignorado em outros modelos matemáticos. Portanto, Zhang abdica da facilidade de implementação matemática e optando por maior robustez e precisão considerando ambos efeitos da irradiância e temperatura além de utilizar um grande numero de curvas no treinamento do modelo.

O equacionamento dos parâmetros do SDM utilizados no modelo de Zhang, estão presentes nas equações:

$$I_{ph} = [I_{ph,ref} + \alpha_{I_{sc}}(T - T_{ref})] \left( \frac{G}{G_{ref}} \right), \quad (3.15)$$

$$I_{sat} = I_{sat,ref} (T/T_{ref})^3 e^{\frac{q}{kn} \left( \frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \right)}, \quad (3.16)$$

$$R_s = R_{s,ref} + \varepsilon_{R_s}(T - T_{ref}) + \sigma_{R_s}(G - G_{ref}), \quad (3.17)$$

$$R_{sh} = (R_{sh,ref} + \delta_{R_{sh}}(T - T_{ref})) \left( \frac{G_{ref}}{G} \right), \quad (3.18)$$

$$n = n_{ref} + \epsilon_n(T - T_{ref}) + \sigma_n(G - G_{ref}). \quad (3.19)$$

Observa-se que as Equações (3.15)-(3.19) não são unicamente dependentes dos atuais níveis de irradiância e temperatura, pois também são afetadas por valores de referência. Para eliminar o impacto desses valores de referência, o autor realiza modificações e reestruturações nas equações por meio de manipulações algébricas.

Com isso, a equação da corrente fotogerada pode ser reescrita como:

$$I_{ph} = (I_{ph,ref}/G_{ref} - \alpha_{Isc}T_{ref}/G_{ref}) \cdot S + \alpha_{Isc} \cdot ST/G_{ref}, \quad (3.20)$$

podendo assim, isolar as parcelas que possuem apenas constantes e simplificar a expressão para (introduzindo os subparâmetros A e B):

$$I_{ph} = A \cdot S + B \cdot ST. \quad (3.21)$$

De forma semelhante ao realizado com a  $I_{ph}$ , o mesmo é realizado para  $I_{sat}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  e  $n$ , obtendo assim as equações simplificadas:

$$I_{sat} = CT^3 e^{-\frac{qE_g}{knT}}. \quad (3.22)$$

$$R_{sh} = \frac{G + HT}{S}. \quad (3.23)$$

$$R_s = J + L \cdot T + M \cdot S, \quad (3.24)$$

$$n = N + O \cdot T + P \cdot S. \quad (3.25)$$

Outra variável importante para qualquer modelagem de dispositivo semiconductor é a energia de banda ( $E_{gap}$ ) do mesmo. Neste modelo, é levada em conta o impacto da variação da temperatura na energia de banda do material semiconductor. O equacionamento para energia de banda e sua versão simplificadas podem ser expressos como:

$$E_g(T) = E_g(0) - \left( \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \right), \quad (3.26)$$

$$E_g(T) = D - \left( \frac{ET^2}{T + F} \right). \quad (3.27)$$

Assim, analisando as equações simplificadas, os cinco parâmetros do SDM estão agora vinculados a 14 subparâmetros ( $\Gamma = A, B, C, D, E, F, G, H, J, L, M, N, O, P$ ) não vinculados a nenhum valor de referência. Este primeiro modelo de Zhang baseia-se então em utilizar o GCPSO para encontrar as melhores soluções para a função objetivo a partir da busca dos melhores valores para as seus quatorze subparâmetros. É importante também comentar que o GCPSO tem caráter aleatório e, por conta disso, não necessita de um ponto inicial a ser escolhido.

Por fim, para manter o significado físico dos parâmetros encontrados e garantir a convergência do problema, é necessário delimitar limites inferiores e superiores para cada um dos parâmetros buscados pelo algoritmo de otimização. Tais limites estão presentes na Tabela 3, onde os valores de STC são extraídos dos *datasheets* dos módulos estudados.

Tabela 3 – Limites inferiores e superiores originais utilizados na busca dos parâmetros (Zhang 1).

Parâmetro	Min	Max
A	0	$10^{(-3)} \cdot (1, 5I_{sc,STC} - \alpha_{Isc}T_{STC})$
B	0	$10^{-2} \cdot \alpha_{Isc}$
C	0	$10^4$
D	0,5	1,5
E	0	0,01
F	0	$10^5$
G	$(\frac{V_{m,STC}}{I_{sc,STC} - I_{m,STC}} - 0, 298) \cdot 10^3$	$10^8$
H	-100	0
J	-1,298	$\frac{V_{oc,STC} - V_{m,STC}}{I_{m,STC}} + 0, 298$
L	0	$10^{-3}$
M	$-10^{-3}$	$10^{-3}$
N	-0,5	5,98
O	-0,01	0
P	$-10^{-3}$	$10^{-3}$

Fonte: Adaptado de (ZHANG et al., 2022b).

### 3.2.1 Modificações em Zhang 1

O modelo de Zhang 1, assim como de Silva, foi proposto com a finalidade de representar fidedignamente módulos do tipo silício cristalino (ZHANG et al., 2022b). Neste sentido, investigou-se se seria possível aplicar o modelo de Zhang 1 para representar tecnologias de composição cristalina diferentes das de silício, ou se certas modificações e adaptações seriam necessárias.

Inicialmente, já que o modelo de Zhang 1 leva em consideração o impacto de  $E_{gap}$  e sua variação na temperatura na modelagem do módulo, foram utilizados os valores de  $E_{gap}$  específicos de cada tecnologia estudada neste trabalho. Onde para aSi tem-se  $E_{gap} = 1, 7eV$  (FAHR; ROCKSTUHL; LEDERER, 2010b), para HIT tem-se  $E_{gap} = 1, 48eV$  (MORALES-ACEVEDO; HERNÁNDEZ-COMO; CASADOS-CRUZ, 2012) e para CIGS tem-se  $E_{gap} = 1, 2eV$  (BOUBAKEUR et al., 2020b).

Em seguida, aplicou-se o modelo de Zhang 1 sem nenhuma alteração em seus limites ou parâmetros de busca e foi observado que para todas as tecnologias não ocorreu nenhuma saturação ou problema na busca paramétrica através do algoritmo de otimização. Entretanto, quando os parâmetros encontrados eram transformados em curvas I-V, o modelo apenas conseguiu representar as tecnologias com curvas I-V com características semelhantes as do silício cristalino como HIT e CIGS, para ambos os tipos de silício amorfo o modelo descaracterizou totalmente a curva I-V do módulo FV, considerou-se então que a estrutura de equações do modelo Zhang 1 não consegue representar curvas I-V de características muito diferentes do c-Si, sendo assim uma limitação do modelo.

### 3.3 ZHANG 2

Em (ZHANG et al., 2022a), é proposto um método também sem necessidade de valores de referência e treinado a partir de várias curvas experimentais em diferentes condições ambientais. Inicialmente são estabelecidas as equações dos parâmetros físicos do SDM ( $I_{ph}$ ,  $I_{sat}$ ,  $n$ ,  $R_s$  e  $R_{sh}$ ) já independentes de valores de referência ( $G_{ref}$ ,  $T_{ref}$ ) para construção do modelo matemático. Tal conjunto de equações é chamado pelo autor de *improved transformation equations without reference condition* (ITEWRC) e podem ser definidos por:

$$I_{ph} = (z_1 + z_2 \cdot T)S, \quad (3.28)$$

$$I_{sat} = z_3 T^3 e^{\frac{z_4}{T}} S^{y_{I_{sat}}}, \quad (3.29)$$

$$n = (z_5 + z_6 \cdot T)S^{y_n}, \quad (3.30)$$

$$R_s = (z_7 + z_8 \cdot T)S^{y_{R_s}}, \quad (3.31)$$

$$R_{sh} = (z_9 + z_{10} \cdot T)S^{y_{R_{sh}}}. \quad (3.32)$$

Assim, semelhante ao outro modelo de Zhang, tem-se os cinco parâmetros principais do SDM dependentes de outros 14 subparâmetros  $\Phi = (z_1 - z_{10}, y_{I_{sat}}, y_n, y_{R_s}, y_{R_{sh}})$  não dependentes de valor de referência. Com as equações já determinadas, é utilizado o mesmo algoritmo de otimização GCPSO para encontrar o conjunto de parâmetros que melhor represente o modelo matemático do módulo FV estudado.

Por fim, para delimitar a resolução do problema de otimização, os limites inferior e superior para cada parâmetro são estabelecidos a partir da Tabela 4, onde os valores de referência em STC são extraídos dos *datasheets* dos módulos FV que serão modelados.

Tabela 4 – Limites inferiores e superiores utilizados na busca dos parâmetros (Zhang 2).

Parâmetro	Mínimo	Máximo
$z_1$	$0,5 \cdot I_{sc,STC}/S_{STC}$	$1,5 \cdot I_{sc,STC}/S_{STC}$
$z_2$	0	$1,5 \cdot \alpha_{I_{sc,STC}}/S_{STC}$
$z_3$	0	$10^3$
$z_4$	$-1,5 \cdot E_{g,STC}q/K$	$-0,5 \cdot E_{g,STC}q/K$
$z_5$	1	4
$z_6$	-0,1	0
$z_7$	0	0,01
$z_8$	0	$10^{-3}$
$z_9$	$10^2$	$10^4$
$z_{10}$	-100	0
$y_{I_0}$	-1,5	1,5
$y_n$	0	1,5
$y_{R_s}$	0	1,5
$y_{R_{sh}}$	-0,1	0

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2022a).

### 3.3.1 Modificações Zhang 2

O modelo de Zhang 2 foi proposto com finalidade de representar módulos do tipo silício cristalino (ZHANG et al., 2022a). Com isso, foi investigada a necessidade de realizar adaptações ou modificações no modelo proposto para averiguar se o mesmo conseguiria representar tecnologias diferentes das de silício.

Portanto, foram feitas as devidas correções paramétricas em relação a  $E_{gap}$  para cada tecnologia, e também foi realizada a mesma análise da faixa de parâmetros para o SDM que o modelo de Zhang 2 poderia encontrar. Com isso, como modificações para o modelo de Zhang 2, foi proposto apenas estender os limites de busca dos parâmetros relacionados ao  $n$  e ao  $R_s$ , ou seja, foram extrapolados os limites de busca do parâmetros  $z_5$  até o  $z_8$ .

## 3.4 MODELO DE WANG

Em (WANG et al., 2021), foi apresentado um modelo de módulo FV multi-parâmetros, que adiciona elementos aos cinco parâmetros característicos do modelo SDM. Essa extensão proporciona uma compreensão mais aprofundada do modelo em diversas condições ambientais. Como outros MGNLs, esse modelo consegue estimar parâmetros e consequentemente o comportamento de células e módulos FV para diversas condições ambientais.

Para este modelo, a corrente de saída do módulo FV é a principal grandeza a ser

modelada,  $I = g(x)$ , que é utilizada como referência para o problema da estimação dos parâmetros. Dessa forma, o conjunto de parâmetros que são buscado pelo modelo são representados por  $X = [T_{ref}, G_{ref}, R_{sh,ref}, n_{ref}, I_{sat,ref}, E_g, N_s, I_{sc,ref}, \alpha_{Isc}, \alpha_{Isc}, V_{oc,ref}, \beta, R_{s,ref}, I_{ph,ref}, \alpha_{Imp}, m]^T$ . Com isso, o modelo SDM de cinco parâmetros é transformado em um modelo de 15 parâmetros para descrever com maior fidedignidade o comportamento do módulo FV mediante a mudanças ambientais.

Como primeira etapa do modelo, é selecionada uma curva I-V para extrair parâmetros de referência. com finalidade de ajustar a corrente gerada pelo modelo com a corrente da curva experimental de referência. A extração dos parâmetros é também resolvida por uma função objetivo, mas para este modelo não é utilizado um algoritmo de otimização e sim o método adaptativo de Levenberg-Marquardt (ALM) para resolver as equações de caráter não linear do módulo FV. Para tal modelo, a equação que descreve a função objetivo pode ser escrita como:

$$F(X) = \begin{pmatrix} I_{1,est} \\ I_{2,est} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{j,est} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{N,est} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} I_{1,med} \\ I_{2,med} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{j,med} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{N,med} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g(V_{1,med}, X) \\ g(V_{2,med}, X) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(V_{j,med}, X) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(V_{N,med}, X) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} I_{1,med} \\ I_{2,med} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{j,med} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{N,med} \end{pmatrix} = 0, \quad (3.33)$$

sendo  $I_{j,est}$  e  $I_{j,med}$  as correntes geradas pelo modelo e as medidas experimentalmente, respectivamente;  $V_{j,med}$  a tensão medida; X o vetor de parâmetros; N a quantidade de pontos medidos da curva I-V.

Dito isso, uma vez que o método ALM converge e são obtidos os parâmetros do modelo na condição de referência, são utilizadas equações de translocação para recalcular os parâmetros do modelo em outras condições ambientais. As transformações realizadas para parâmetro podem ser descritas como:

$$R_{sh} = R_{sh,ref} \frac{G_{ref}}{G}, \quad (3.34)$$

$$R_s = R_{s,ref} - \left[ \frac{n}{I_{sat}} \exp\left(\frac{-V_{oc}}{n}\right) \right], \quad (3.35)$$

$$n = n_{ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right), \quad (3.36)$$

$$I_{sat} = I_{sat,ref} \left( \frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \exp \left[ \frac{E_g N_s}{n_{ref}} \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T} \right) \right], \quad (3.37)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left[ I_{ph,ref} + \alpha_{I_{mp}} (T - T_{ref}) \right], \quad (3.38)$$

$$I_{sc} = \frac{G}{G_{ref}} I_{sc,ref} + \alpha_{I_{sc}} (T - T_{ref}), \quad (3.39)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + \beta (T - T_{ref}) + n \ln \left( \frac{G}{G_{ref}} \right). \quad (3.40)$$

### 3.4.1 Modificações em Wang

Em seu trabalho, (WANG et al., 2021) define seu modelo apenas como uma técnica para extração de parâmetros de módulos FV e não especifica se o mesmo foi proposto para alguma tecnologia construtiva específica, sendo assim um modelo mais generalista. Entretanto, quando analisa-se a curva I-V apresentada no seu trabalho (o valor de  $E_{gap}$  utilizado, os parâmetros extraídos e a aplicação dos mesmos) é possível afirmar que se trata de um módulo de silício cristalino.

Diante desse contexto, ao examinar o equacionamento e a estrutura mais generalista de se obter os parâmetros deste modelo, a única mudança proposta foi a extensão do parâmetro de busca de  $n$ , onde no trabalho inicial foi limitado entre zero e dois e meio (valor típico para módulos de silício cristalino), para poder representar outras tecnologias construtivas a busca de  $n$  foi estendida para 10 assim como foi feito no modelo de Silva.

## 3.5 MODELO DE LANG

O modelo proposto em (LANG; ZHANG, 2020) aborda a identificação dos parâmetros do SDM a partir de um método híbrido para estimar a potência de saída de um módulo FV em diversas condições ambientais. Esse método combina um modelo de circuito equivalente simplificado com uma técnica algébrica de ajuste de curva. Para aprimorar a eficiência computacional e reduzir a complexidade, o método utiliza dos três pontos-chave da curva I-V para extrair informações e formar seu equacionamento, sendo estes três pontos: Curto circuito (SC), circuito aberto (OC) e ponto de máxima potência (MP). Reduzindo assim, o processo de busca para um único parâmetro, o fator de idealidade ( $n$ ). A identificação dos parâmetros é por fim realizada através de um problema de otimização.

Neste modelo, é utilizada a função W de Lambert para resolver a equação da corrente de saída do módulo fotovoltaico. A Equação implícita de  $I$  utilizando a função W de Lambert pode ser descrita por:

$$I = \frac{R_{sh}(I_{ph} + I_{sat}) - V}{R_s + R_{sh}} - \frac{nV_t}{R_s} W \left[ \frac{I_{sat}}{nV_t} \frac{R_s R_{sh}}{R_s + R_{sh}} e^{\frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} \frac{V + R_s(I_{ph} + I_{sat})}{nV_t}} \right]. \quad (3.41)$$

Como já mencionado anteriormente, este modelo utiliza de três pontos característicos para construir seu equacionamento inicial como é mostrado a seguir:

$$SC : I_{sc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{I_{sc}R_s}{nV_t} \right)} - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}}, \quad (3.42)$$

$$OC : 0 = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{V_{oc}}{nV_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}, \quad (3.43)$$

$$MPP : I_{mp} = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{nV_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}}. \quad (3.44)$$

Através das equações 3.42 - 3.44 e da utilização da regra de Cramer, é possível descrever os parâmetros  $I_{ph}$ ,  $I_{sat}$  e  $R_{sh}$  como funções de  $R_s$  e  $n$ , como é mostrado a seguir:

$$R_{sh} = \frac{A}{(I_{mp} - I_{sc})e^{\frac{V_{oc}}{nV_t}} + I_{sc}e^{\frac{I_{mp}R_s + V_{mp}}{nV_t}} - I_{mp}e^{\frac{I_{sc}R_s}{nV_t}}}, \quad (3.45)$$

$$I_{sat} = \frac{1}{A} [V_{oc}(I_{sc} - I_{mp}) - V_{mp}I_{sc}], \quad (3.46)$$

$$I_{ph} = \frac{1}{A} [I_{sc}V_{oc}(e^{\frac{I_{mp}R_s + V_{mp}}{nV_t}} - 1) + I_{sc}V_{mp}(1 - e^{\frac{V_{oc}}{nV_t}}) + I_{mp}V_{oc}(1 - e^{\frac{I_{sc}R_s}{nV_t}})], \quad (3.47)$$

$$A = (V_{mp} + R_s I_{mp} - V_{oc})e^{\frac{I_{sc}R_s}{nV_t}} + (V_{oc} - R_s I_{sc})e^{\frac{I_{mp}R_s + V_{mp}}{nV_t}} + (R_s I_{sc} - R_s I_{mp} - V_{mp})e^{\frac{I_{sc}R_s}{nV_t}}. \quad (3.48)$$

Então, é possível classificar os parâmetros como dependentes ( $I_{ph}$ ,  $I_{sat}$  e  $R_{sh}$ ) e independentes ( $R_s$  e  $n$ ). Entretanto, para que durante a resolução do problema seja garantido que os valores obtidos ainda possuam valores condizentes com os reais, é necessário respeitar a condição:

$$D = \{(n, R_s) | n \in R_+; 0 \leq R_s \leq R_s^{max}(n)\} \quad (3.49)$$

onde  $R_s^{max}(n)$  é:

$$R_s^{max}(n) = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} + \frac{nV_t}{I_{mp}} \left( 1 + W_{-1} \left( -e^{\frac{V_{oc} - nV_t - 2V_{mp}}{nV_t}} \right) \right), \quad (3.50)$$

ou seja, para qualquer valor de  $n$  positivo em  $D$ , existe também um valor máximo de resistência em série  $R_s^{max}$ . Implicando que as outras três incógnitas terão valores positivos desde que o valor de  $R_s$  seja inferior a  $R_s^{max}$ . O valor de  $R_s$  é determinado a partir do ponto de circuito aberto, presente na Equação 3.43 e em conjunto com das Equações 3.44-3.45, respeitando o limite do valor máximo de  $R_s$ .

Após a definição do método, é essencial determinar os parâmetros para a condição ambiental de referência por meio de um processo de otimização. Nesse sentido, o processo

requer uma faixa adequada para o valor de  $n$  e o ponto de operação de  $R_s$ , restrito pela condição da Equação (3.50).

Por fim, tendo conhecimento dos parâmetros físicos encontrados na etapa anterior, para encontrar os parâmetros nas diferentes condições de irradiância e temperatura são utilizadas as equações de transposição a seguir:

$$n = n_{ref}, \quad (3.51)$$

$$R_s = R_{s,ref}, \quad (3.52)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph,ref} + \alpha_{I_{sc}}(T - T_{ref})], \quad (3.53)$$

$$I_{sat} = I_{sat,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{1}{k} \left( \frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \right) \right], \quad (3.54)$$

$$R_{sh} = \frac{G_{ref}}{G} R_{sh,ref}. \quad (3.55)$$

É importante ressaltar que, ao iniciar o modelo de Lang, é possível estabelecer os valores máximo e mínimo para  $n$  por meio de fórmulas fornecidas pelos autores. Entretanto, uma simplificação foi realizada nessa etapa, onde foi delimitado o valor usual de  $n_{min}$  e  $n_{max}$  baseado em outros modelos que fazem o mesmo tipo de busca, como o de Silva ou Zhang. Como o modelo proposto foi idealizado para modelagem de módulos de silício cristalino, foram utilizados adotados  $n_{min} = 0,5$  e  $n_{max} = 2,5$ .

### 3.5.1 Modificações em Lang

O modelo de Lang também é definido como um modelo para extrair parâmetros de módulos de silício cristalino (LANG; ZHANG, 2020). Com isso, foi investigada a necessidade de adaptar ou modificar o modelo originalmente proposto para averiguar se o mesmo consegue representar tecnologias diferentes das de silício cristalino.

Assim, para o modelo de Lang, visto que é necessário apenas parametrizar os valores de  $n$  e  $R_s$  para o problema de otimização foram analisados os limites dessas grandezas. Foi constatado que os limites originais de  $R_s$  atendem aos valores esperados para todas as tecnologias estudadas, enquanto  $n$  estava originalmente limitado entre zero e dois e meio novamente. Com isso, para o modelo de Lang, a única adaptação proposta é a extensão da busca de  $n$  para ser entre 0 e 10.

## 3.6 MODELO DE LU

O modelo proposto em (LU et al., 2022) foi desenvolvido com o objetivo de conseguir representar fidedignamente células e módulos fotovoltaicos de tecnologias não usuais.

Partindo do fato de que modelos SDM tem dificuldade em modelar características I-V de células com estruturas cristalinas mais complexas, o modelo de Lu utiliza da modelagem a partir da *Power Law Model* (PLM) proposta por (HANEFFA; KARMALKAR, 2009).

Diferentemente dos modelos baseados em SDM, o modelo proposto por Lu não precisa determinar valores de referência a partir de uma determinada condição e em seguida se adaptar através de equações de translação.

No modelo de Lu, são utilizados 4 parâmetros, a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e dois parâmetros que ditam a forma da curva I-V ( $m$  e  $\gamma$ ), que são usados para transformar a mesma para a condição de operação desejada.

O modelo PLM pode ser descrito através das equações:

$$i = 1 - (1 - \gamma)v - \gamma v^m, \quad (3.56)$$

sendo:

$$i = \frac{I}{I_{sc}}, \quad (3.57)$$

$$v = \frac{V}{V_{oc}}. \quad (3.58)$$

O modelo de Lu determina os parâmetros do PLM através do ponto de máxima potência da curva I-V. Deste mesmo ponto, também são determinados os parâmetros de dependência de irradiância e temperatura do modelo. Com isso, o modelo desenvolvido por Lu aproveita a simplicidade inerente das expressões PLM, onde as características da curva I-V e a potência de saída são estabelecidas sem a exigência de um procedimento iterativo, resultando em uma simplificação da complexidade e dos custos computacionais associados à obtenção do modelo.

A fim de obter o comportamento da curva I-V e a potência de saída para diferentes condições ambientais, é necessário relacionar os parâmetros do PLM com as variações de irradiância e temperatura. Para isso, é aplicada a Equação 3.56 no ponto de máxima potência, sendo  $v = v_p$  e  $i = i_p$ . Dessa forma, tem-se a equação:

$$i_p = 1 - (1 - \gamma)v_p - \gamma v_p^m, \quad (3.59)$$

onde,  $I_p$  e  $V_p$  são os valores de corrente e tensão que geram máxima potência, enquanto  $i_p = \frac{I_p}{I_{sc}}$  e  $v_p = \frac{V_p}{V_{oc}}$  são suas características normalizadas. Sabe-se que neste ponto de operação a variação da potência em relação à tensão é igual a zero, obtendo assim:

$$1 - 2(1 - \gamma)v_p - \gamma(m + 1)v_p^m = 0. \quad (3.60)$$

Em seguida, encontra-se o valor de  $m$  a partir das Equações 3.59 e 3.60 e em seguida simplificando a equação explicita através da função W de Lambert:

$$m = \text{LambertW}[\ln(v_p) \cdot (a + 1)v_p^{a+1}](\ln(v_p))^{-1} - a, \quad (3.61)$$

onde,

$$a = (2i_p - 1) \cdot (v_p + i_p - 1)^{-1} - 1. \quad (3.62)$$

Por fim, parâmetro  $\gamma$  é obtido através da Equação (3.59).

$$\gamma = (1 - v_p - i_p) \cdot (v_p^m - v_p). \quad (3.63)$$

Com todos os parâmetros e variáveis conhecidas, é então necessário apenas estabelecer as equações que regem a corrente e tensão de saída do módulo. Para isso, os autores propuseram as seguintes equações:

$$I_p(S, T) = I_{p,STC} \frac{S}{S_{STC}} \left[ 1 + \alpha_{I_p}(T - T_{STC}) \right], \quad (3.64)$$

$$V_p(S, T) = V_{p,STC} + C_2 N_s V_{t,STC} \ln \frac{S}{S_{STC}} + C_3 N_s \left[ V_{t,STC} \ln \frac{S}{S_{STC}} \right]^2 + \beta_{V_p}(T - T_{STC}), \quad (3.65)$$

onde  $\alpha_{I_p}$  e  $\beta_{V_p}$  são os coeficientes de temperatura de  $I_p$  e  $V_p$ , respectivamente, e  $C_2$  e  $C_3$  são os coeficientes que relacionam  $V_p$  à irradiância.

É importante comentar também que, caso não se tenha conhecimento dos valores de  $C_2$ ,  $C_3$  e  $n$ , os autores indicam realizar uma etapa de ajuste de curvas para encontrar tais parâmetros. Enquanto  $\alpha_{I_p}$  e  $\beta_{V_p}$  são constantes mais facilmente encontradas em *datasheet* com mais facilidade as outras não são facilmente encontradas. Entretanto, para esta aplicação a etapa de procura de tais constantes não será necessário pois a NREL disponibiliza tais parâmetros em sua base de dados sobre os módulos utilizados.

### 3.6.0.1 Modificações em Lu

No modelo de Lu, por ser um modelo puramente matemático de ajuste de curva sem nenhum processo iterativo ou estabelecimento de valor de referência não é necessário nenhuma modificação ou extrapolação na parametrização do modelo, já que os parâmetros, que em outros modelos precisariam ser expandidos seus limites de busca, em Lu eles são valores de entrada disponibilizados por *datasheet* ou pela NREL.

## 3.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, é apresentado uma revisão geral dos MGNLs para módulos FV baseados em SMD presentes na literatura, demonstrando a construção e funcionamento dos modelos matemáticos que são utilizados neste trabalho. Além de analisar e discutir as metodologias utilizadas para extrapolação paramétrica a fim de tornar possível a representação fidedigna das tecnologias aSi, CIGS e HIT.

## 4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MODELOS

Neste capítulo, são discutidas as métricas e metodologias utilizadas na avaliação dos modelos estudados juntamente com os resultados obtidos por todos eles. Inicialmente são definidos os critérios de avaliação da qualidade dos modelos analisados. Em seguida, são discutidas as condições ambientais das simulações para cada tipo de tecnologia. Por fim, os resultados obtidos, tanto para os modelos originais quanto para os modelos de parâmetros extrapolados, são apresentados, comparados e discutidos, na tentativa de melhor representar as tecnologias não usuais.

### 4.1 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Em sua maioria, os problemas de modelagem de módulos FV são formulados como problemas de otimização. Nesse contexto, os parâmetros do modelo são otimizados com o objetivo de deixar as curvas I-V's geradas pelo modelo matemático as mais próximas possíveis das curvas obtidas experimentalmente para diferentes condições ambientais (ZHANG et al., 2022b). Dessa forma, a função objetivo do problema de otimização é sempre dada como uma função de erro para ser minimizada.

Para este trabalho, foi utilizado como métrica de parada para o algoritmo de otimização o Erro Médio Absoluto em Potência (EMAP). Essa função objetivo foi escolhida devido à maioria das aplicações de modelagem de módulos FV desejarem uma estimativa precisa da máxima potência gerada.

O EMAP de uma curva P-V foi proposto pela primeira vez no trabalho de (SILVA, 2019), onde são comparadas ponto a ponto as potências geradas pelo modelo matemático e pela curva obtida experimentalmente. O EMAP pode ser representado a partir da equação:

$$EMAP = \frac{\sum_{j=1}^{N_{pontos}} |P_{j,med} - P_{j,est}|}{N_{pontos}}, \quad (4.1)$$

sendo  $P_{med}$  a potência medida das curvas fornecidas pelo ensaio experimental do NREL e  $P_{est}$  a potência calculada pelo modelo, enquanto  $N_{pontos}$  é a quantidade de pontos presentes na curva P-V experimental.

Já que são analisadas curvas I-V's em diferentes condições ambientais e por isso gerando diferentes níveis de potência, se vê a necessidade de criar uma figura de mérito que consiga analisar de forma honesta todas as diferentes condições. Dessa forma, para conseguir equiparar a análise de erro em diferentes níveis de potência, o EMAP é normalizado pela potência máxima da curva P-V analisada ( $P_{mp}$ ), sendo chamado de EMAPN.

Outra função objetivo utilizada na literatura é o desvio médio quadrático da corrente (*root mean square deviation - RSMD*). Entretanto sua aplicação está focada na representação de curvas I-V's, apresentando uma menor acurácia na estimativa de potência.

Entretanto, justamente por ser amplamente utilizada na literatura, o seu valor normalizado por  $I_{sc}$  também será utilizado como figura de mérito neste trabalho. É possível calcular a RSMD normalizada (NRSMD) a partir da equação:

$$NRSMD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_{pontos}} (I_{j,med} - I_{j,est})^2}{N_{pontos}}}}{I_{sc}} \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

sendo  $I_{med}$  a corrente medida das curvas fornecidas pelo ensaio experimental do NREL,  $I_{est}$  a corrente calculada pelo modelo e  $I_{sc}$  o valor da corrente de curto circuito da curva medida, enquanto  $N_{pontos}$  é a quantidade de pontos presentes na curva P-V experimental.

## 4.2 CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Neste trabalho, são utilizadas curvas presentes no banco de dados da NREL (MARION et al., 2014), onde as curvas foram selecionadas em diferentes condições ambientais para cada tecnologia.

Em diversos modelos, é presente a necessidade da etapa de treinamento para busca de parâmetros de referência, seguida da aplicação de equações de transposição para a condição ambiental desejada. Em relação à quantidade de curvas selecionadas para a etapa de treinamento dos modelos, de acordo com o estudo de (SILVA, 2019), é visto uma imprecisão considerável no modelo quando utilizadas de uma a cinco curvas para essa etapa, enquanto que a partir de seis curvas utilizadas, essa imprecisão é minimizada. Assim, utilizando seis curvas nesta etapa, é utilizado uma quantidade relativamente pequena de curvas I-V e uma precisão aceitável com menor esforço computacional.

Para o modelo de (SILVA, 2019), são utilizadas curvas de referência para cada tecnologia em condições ambientes semelhantes as utilizadas para as tecnologias analisadas no trabalho original, as curvas utilizadas por cada tecnologia na etapa de treinamento estão presentes na Tabela 5 com a curva em negrito sendo a curva de referência. Para os modelos de (WANG et al., 2021) e (LANG; ZHANG, 2020) são utilizadas curvas próximas às condições de STC como referência. Por ultimo, em (LU et al., 2022) são utilizados como valores de referência as informações de operação em STC disponibilizadas pela NREL.

Na etapa seguinte, encontra-se a validação do modelo, muito importante para a obtenção de um modelo matemático preciso. Esta etapa tem como objetivo avaliar se o modelo gerado pela etapa de treinamento consegue representar de forma precisa o módulo FV em condições distintas das quais ele foi treinado. A partir da etapa de validação, é assegurado que o modelo não está enviesado pelo seu treinamento e que o mesmo possui capacidade de generalização, importante para sua aplicação. O processo de validação é apresentado de duas formas distintas:

- A primeira fase tem como objetivo realizar uma análise preliminar da validação, assegurando o funcionamento de cada modelo e sua operação para curvas específi-

Tabela 5 – Curvas de treinamento e referência utilizados no modelo de Silva para cada tecnologia.

Curvas de Treinamento para o Modelo de Silva							
aSi-Micro		aSi-Tandem		CIGS		HIT	
$G(W/m^2)$	T(°C)	$G(W/m^2)$	T(°C)	$G(W/m^2)$	T(°C)	$G(W/m^2)$	T(°C)
<b>929</b>	<b>43</b>	942	33	<b>906</b>	<b>35</b>	<b>1106</b>	<b>29</b>
868	27	<b>906</b>	<b>35</b>	833	34	1001	32
702	43	812	27	723	24	869	28
593	35	579	29	520	23	588	22
510	30	493	28	433	21	436	32
316	26	285	25	247	25	268	23

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 6 – Curvas selecionadas para validação dos modelos.

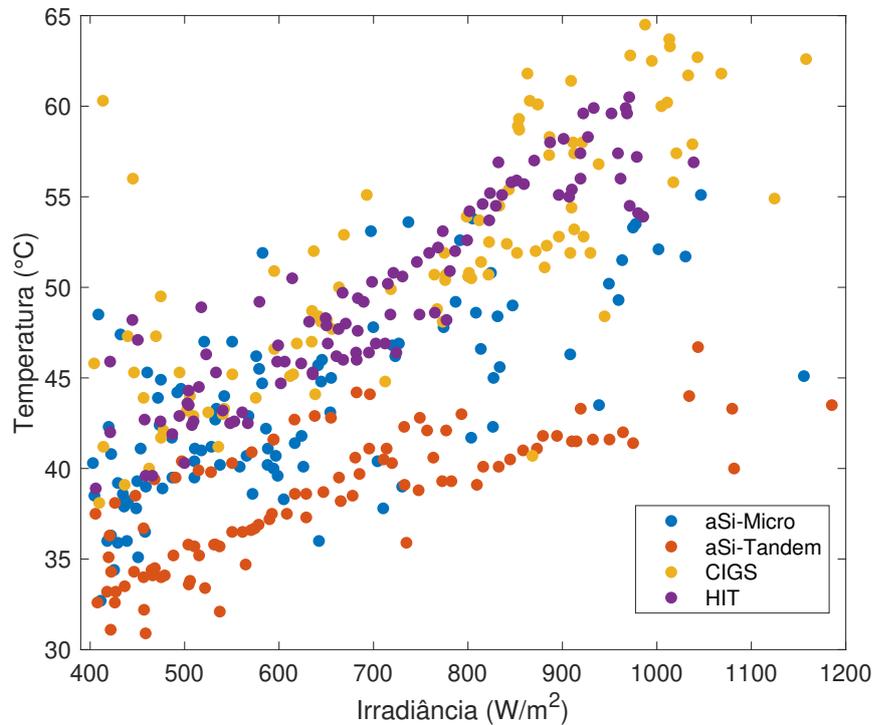
aSi-Micro		aSi-Tandem		CIGS		HIT	
$G(W/m^2)$	T(°C)	$G(W/m^2)$	T(°C)	$G(W/m^2)$	T(°C)	$G(W/m^2)$	T(°C)
1004	31	1032	35	1030	36	1048	49
960	30	894	28	960	33	966	29
868	27	720	25	869	32	869	28
702	24	670	28	609	20	723	23
565	27	588	23	440	34	436	32
278	23	271	24	266	23	268	23

Fonte: Próprio Autor (2023).

cas em diferentes condições ambientais, presentes na Tabela 6, justamente com as representações gráficas obtidas através destas curvas e seus parâmetros extraídos para cada condição avaliada, permitindo observar mais a fundo a operação de cada MGNL estudado e as características dos modelos matemáticos por eles construídos;

- A segunda fase realiza uma análise mais generalista, avaliando para todas as tecnologias estudadas um grande conjunto de curvas em diferentes condições ambientais, apresentado na Figura 9. Nesta etapa, planeja-se identificar qual dos modelos possui maior capacidade de generalização e precisão ao representar curvas I-V's nas mais distintas condições ambientais, sendo essa análise a que permite criar um ranqueamento definitivo de quais os melhores MGNLs em questão de performance.

Figura 9 – Condições ambientais do conjunto de curvas de validação para as quatro tecnologias avaliadas.



Fonte: Próprio Autor (2023).

### 4.3 RESULTADOS DOS MODELOS AVALIADOS

Após a apresentação das métricas de avaliação, das condições de simulação e da definição do funcionamento de todos os modelos trabalhados, é então realizada a comparação dos mesmos para aferir qual possui maior fidedignidade a módulos FV reais.

Vale relembrar que todos os modelos apresentados foram sujeitos a dois processos de validação e foram utilizados para extrair parâmetros de quatro tecnologias diferentes: aSi-Micro, aSi-Tandem, CIGS e HIT, resultando em um modelo matemático específico para cada. Para evitar enviesamento nos resultados, as curvas utilizadas no processo de validação dos modelos são todas diferentes das utilizadas na etapa de treinamento.

#### 4.3.1 Análise Preliminar de Validação

Na primeira fase da validação, são comparadas as curvas P-V geradas pelos modelos a fim de analisar visualmente a fidelidade das curvas geradas junto com suas métricas de erro. Importante também salientar que, inicialmente, serão feitas as comparações apenas entre os modelos originais, posteriormente serão apresentadas as modificações no modelo de Silva, resultantes da mudança no algoritmo de otimização. Por fim, será realizada uma comparação geral incluindo todos os modelos com busca paramétrica modificada.

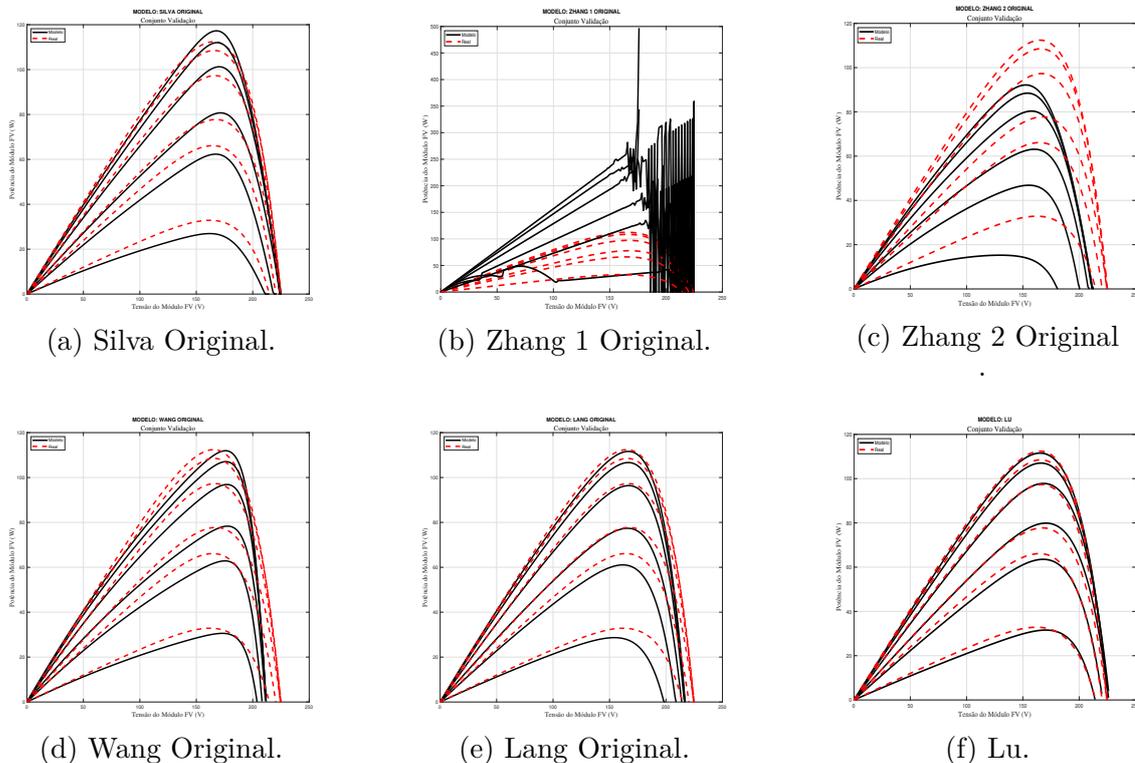
#### 4.3.1.1 Análise dos Modelos Originais

Nesta seção, são apresentados os resultados em formato de gráficos P-V's gerados pelos modelos, bem como em formato de tabela, com todos os parâmetros extraídos por cada modelo não modificado, juntamente com suas métricas de EMAPN e NRMSD para cada curva apresentada.

Os resultados obtidos para as curvas de validação para a tecnologia de aSi-Micro estão presentes na Figura 10. Nela, é possível observar que os modelos de Silva, Zhang 2, Wang, Lang e Lu tentam ajustar as curvas reais, sendo Zhang 2 o modelo com maiores desvios. Por outro lado, o modelo de Zhang 1 foi o único que não conseguiu representar a curva, desconfigurando totalmente o comportamento de uma curva P-V de um módulo FV.

Diante dos resultados obtidos para Zhang 1, foram realizadas tentativas de modificações na estrutura do código e no limites de busca de parâmetros na tentativa de representar as tecnologias de silício amorfo para o modelo, mas não foi obtido sucesso. Por fim, foram comparadas as faixas de valores que os parâmetros SMD poderiam alcançar a depender dos parâmetros do modelo de Zhang e comparado com o modelo de Silva que obteve sucesso na modelagem, e foi concluído que o modelo de Zhang teria a possibilidade de encontrar os mesmos parâmetros que Silva e que os mesmos estão em “par de igualdade” na aplicação. Sendo assim, mesmo com as devidas modificações e adaptações, o modelo de Zhang 1 não conseguiu representar bem certas tecnologias aqui analisadas.

Figura 10 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos para aSi-Micro.



Fonte: Próprio Autor (2023).

Através da Tabela 7, são apresentados os parâmetros extraídos por cada modelo e suas métricas de erro para cada curva. Os parâmetros do modelo de Lu estão presentes na Tabela 8 por abranger diferentes tipos de parâmetros.

Tabela 7 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para aSi-Micro

Modelo de Silva Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	41,83217	2076,287	2	0,836526	3,61E-11	2,050619	2,556395
960	30	43,27748	2123,971	2	0,7983	3,12E-11	2,313396	3,060859
868	27	47,03623	2251,843	2	0,717425	1,95E-11	1,954607	2,551741
702	24	55,21401	2457,027	2	0,577287	1,29E-11	1,806524	2,252079
565	27	63,99047	2524,748	2	0,469026	2,50E-11	6,082938	7,890671
278	23	126,8476	3176,416	2	0,232002	1,76E-11	12,15327	14,74589
Modelo de Zhang 1 Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	47,27258	48953,46	1,309347	2,734689	1,28E-02	-	-
960	30	47,30406	51197,18	1,267995	2,607166	4,29E-03	80,05604	95,92333
868	27	47,36948	56623,65	1,18169	2,336491	3,04E-04	-	-
702	24	47,4886	70013,34	1,025547	1,872811	1,16E-06	69,2022	85,54374
565	27	47,58937	86989,96	0,895729	1,520873	6,42E-09	57,8294	87,77428
278	23	47,79586	176796,3	0,625563	0,739432	1,15E-17	35,38125	124,7392
Modelo de Zhang 2 Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	48,32391	1064,885	2,458815	0,821065	7,24E-09	14,00054	15,56458
960	30	46,60779	1072,392	2,463462	0,784327	6,89E-09	14,41672	16,06985
868	27	42,86003	1091,503	2,47448	0,707115	5,62E-09	13,9449	15,44957
702	24	36,31504	1123,349	2,495446	0,570227	5,38E-09	14,3989	16,14628
565	27	31,28281	1139,389	2,512646	0,460276	1,07E-08	19,92228	22,78066
278	23	18,34869	1235,461	2,579971	0,225598	1,91E-08	33,01603	38,48745
Modelo de Wang Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	9,972905	805,2045	1,871643	0,884876	2,39E-11	4,936847	6,965206
960	30	9,97421	842,1097	1,871643	0,845093	2,11E-11	5,325952	7,4233
868	27	9,97781	931,3656	1,871643	0,76138	1,44E-11	5,05321	7,239076
702	24	9,980959	1151,603	1,871643	0,613567	9,83E-12	4,666639	7,252243
565	27	9,977757	1430,841	1,871643	0,495599	1,44E-11	6,49746	8,551533
278	23	9,981833	2908,005	1,871643	0,242689	8,63E-12	7,31364	9,486236
Modelo de Lang Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	10	805,2045	1,871643	0,884876	2,38E-11	4,928047	6,948531
960	30	10	842,1097	1,871643	0,845093	2,10E-11	5,314144	7,402885
868	27	10	931,3656	1,871643	0,76138	1,43E-11	5,03543	7,206689
702	24	10	1151,603	1,871643	0,613567	9,72E-12	4,645673	7,210519
565	27	10	1430,841	1,871643	0,495599	1,43E-11	6,468878	8,521076
278	23	10	2908,005	1,871643	0,242689	8,53E-12	7,266376	9,443016

Fonte: Próprio Autor (2023).

Observa-se que os modelos de Lu e Silva foram os que melhor conseguiram representar a tecnologia de aSi-Micro com suas técnicas originais, apresentando EMAPN médio de 3,64% e 4,39% e um NRMSD médio de 3,64% e 5,51% respectivamente. Seguidos em

Tabela 8 – Parâmetros e erros do Modelo de Lu para aSi-Micro

Modelo de Lu					
G	T	M	$\Gamma$	EMAPN	NRMSD
1004	31	6,627285	0,924027	1,047322	1,612389
960	30	6,788749	0,920087	1,263587	2,013582
868	27	7,200251	0,911252	1,282000	1,776089
702	24	7,943298	0,898114	1,878099	2,186324
565	27	8,447784	0,890139	3,037732	5,676379
278	23	11,4129	0,863964	4,513138	8,571421

Fonte: Próprio Autor (2023).

desempenho pelos modelos de Lang e Wang com EMAPN's médios de 5,60% e 5,63% e NRMSD médio de 7,79% e 7,82% respectivamente também. Por fim, os modelos de Zhang 2 e Zhang 1, onde Zhang 2 apresentou 18,28% de valor de EMAPN médio e 20,75% de NRMSD médio, enquanto Zhang 1 desconfigurou as curvas P-V a ponto de terem curvas que não foram capazes de serem calculadas os valores de erro. Para certas curvas de Zhang 1, os resultados foram tão desconfigurados que o *MATLAB* ficou impossibilitado de calcular o valor das métricas EMAPN e NRMSD, pois era obtido um valor de "*Not a Number*", significando que foram retornados valores do tipo  $\frac{0}{0}$  ou  $\frac{\infty}{\infty}$ , por conta disso, tais valores foram desconsiderados e retirados das tabelas.

A Figura 11 apresenta as curvas P-V's geradas pelo conjunto de validação para tecnologia de aSi-Tandem. As Tabelas 9 e 10, demonstram os parâmetros extraídos por cada modelo e suas métricas de erro agora para a tecnologia de aSi-Tandem.

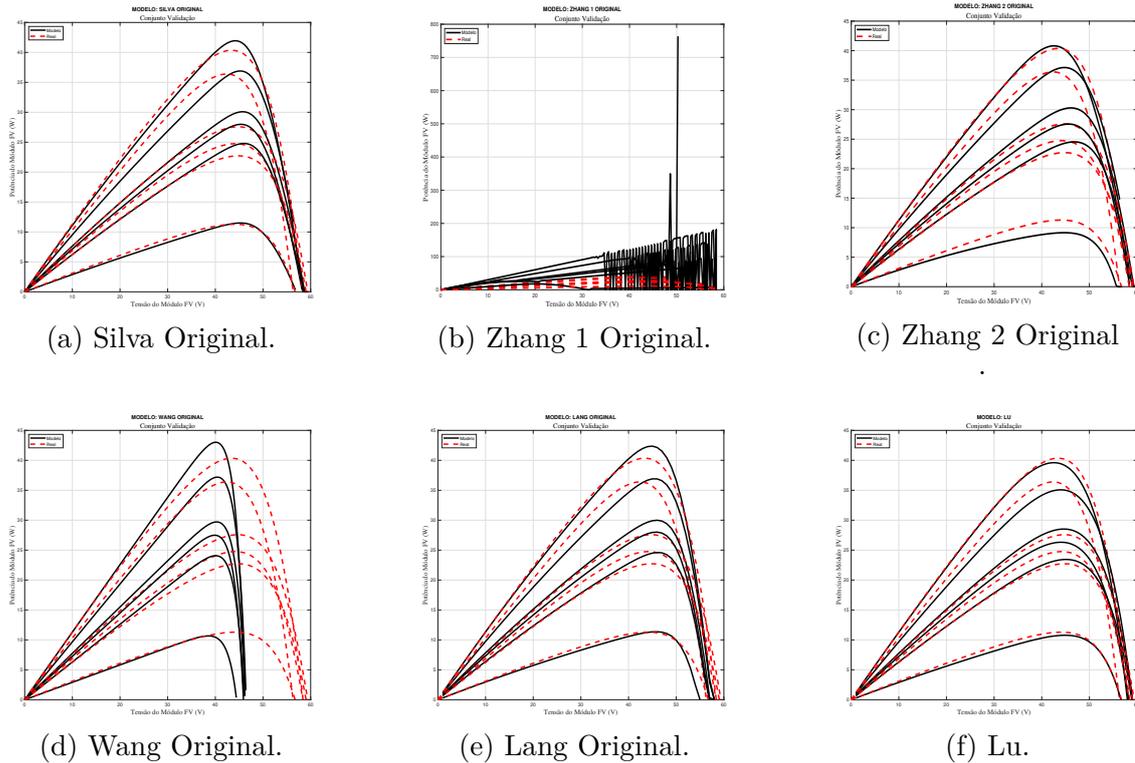
Tabela 9 – Parâmetros e erros do Modelo de Lu para aSi-Tandem

Modelo de Lu					
G	T	M	$\Gamma$	EMAPN	NRMSD
1032	35	6,871412	0,882200	1,412415	1,627642
894	28	7,616407	0,860814	6,372639	8,666902
720	25	8,339668	0,847702	1,735828	2,194659
670	28	8,34608	0,850745	3,352688	4,397534
588	23	9,011355	0,838471	1,354634	1,631018
271	24	11,46658	0,822833	3,541268	6,176882

Fonte: Próprio Autor (2023).

Para a tecnologia de aSi-Tandem, é novamente observado que cinco dos modelos conseguiram representar as curvas P-V's com diferentes níveis de erro. Onde novamente Zhang 1 foi o modelo que não conseguiu representar a curva P-V, desconfigurando o comportamento da mesma. E dessa vez, o modelo de Wang teve uma queda no desempenho comparado a sua aplicação para aSi-Micro. Enquanto isso, os modelos de Lu e Silva con-

Figura 11 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos para aSi-Tandem.



Fonte: Próprio Autor (2023).

tinuam sendo os melhores modelos a representarem as curvas, com EMAPN médios de 2,96% e 3,41% e com NRMSD médios de 4,12% e 4,69% respectivamente.

A Figura 12 apresenta as curvas P-V's geradas pelo conjunto de validação para a tecnologia CIGS. Enquanto nas Tabelas 11 e 12 estão representados os parâmetros extraídos por cada modelo e suas métricas de erro também para tecnologia CIGS.

Dessa vez, diferente do que ocorreu para tecnologias de aSi, é observado que todos os modelos conseguiram gerar curvas P-V's que se adequassem as curvas reais, variando apenas o grau de acerto entre cada modelo. Tal resultado pode ser explicado, pois curvas I-V's e P-V's de módulos CIGS são mais semelhantes a das tecnologias de silício cristalino do que as de silício amorfo que possuem características I-V's e P-V's muito distintas quando comparadas ao silício cristalino, facilitando assim a criação do seu modelo matemático por técnicas propostas originalmente para silício cristalino.

O mesmo comportamento é visto quando analisados os resultados mostrados nas Tabelas 11 e 12, onde, de maneira geral, há uma redução no valor de erro em todos os modelos. A partir dessa tecnologia, nota-se uma mudança nos algoritmos que obtiveram melhor resultado, com Silva, Zhang 2 e Zhang 1 obtendo valores de erro consideravelmente menores que Lu, onde Silva, Zhang 2 e Zhang 1 apresentaram, respectivamente, valores de EMAPN médio de 1,42%, 1,64% e 2,24% e de NRMSDN médio de 1,72%, 1,90% e 2,32%.

No trabalho feito por (JUNIOR, 2023), foi constatado que para tecnologias de silício

Tabela 10 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para aSi-Tandem.

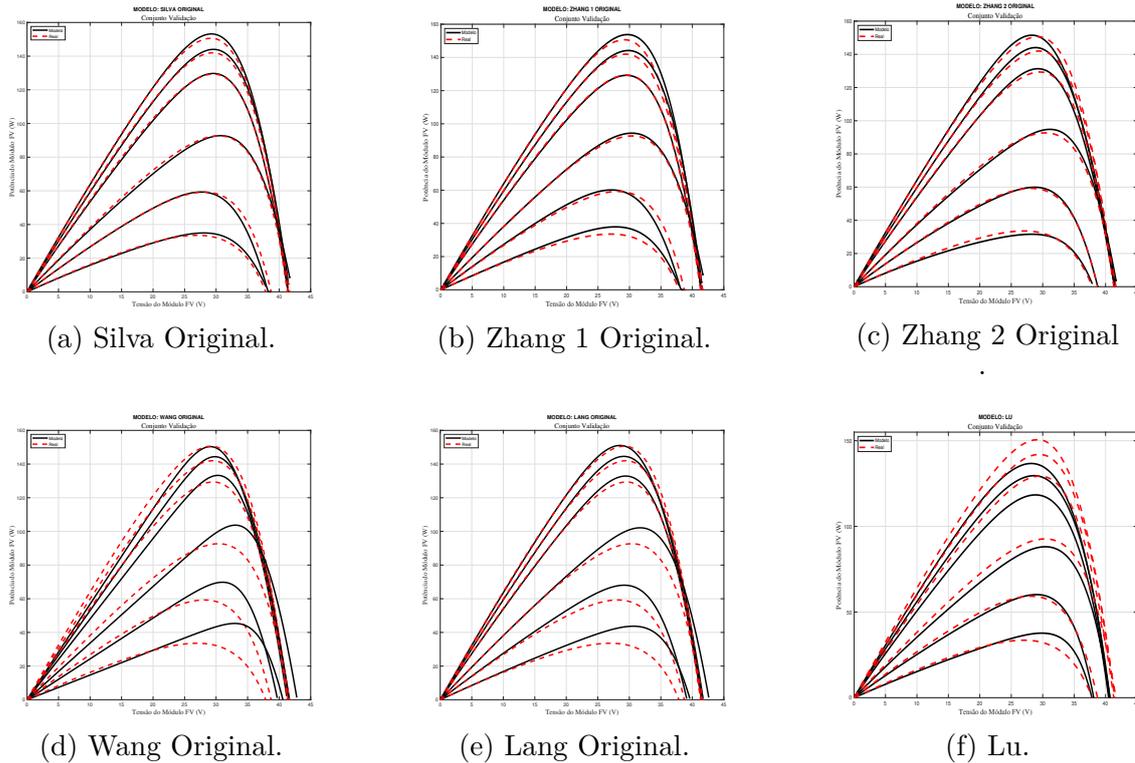
Modelo de Silva Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	8,452467	285,7617	2	1,177808	2,63E-13	1,817358	2,331229
894	28	9,152323	340,3589	2	1,007555	9,10E-14	6,599571	8,37895
720	25	10,41306	443,0326	2	0,805306	5,71E-14	2,842371	3,850942
670	28	10,89145	483,6238	2	0,751889	9,16E-14	3,947424	5,184522
588	23	11,89695	566,977	2	0,654161	4,17E-14	2,416897	3,055232
271	24	21,90742	1456,505	2	0,30017	4,97E-14	2,872627	5,356503
Modelo de Zhang 1 Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	9,84761	32639,48	0,843334	3,803858	6,06E-18	132,888	168,9578
894	28	9,873174	37677,93	0,884659	3,240859	2,74E-17	113,346	149,3068
720	25	9,90741	46783,5	0,916064	2,591331	1,26E-16	-	-
670	28	9,918577	50274,73	0,911365	2,428832	1,79E-16	117,6048	167,748
588	23	9,933477	57285,98	0,938907	2,106041	3,73E-16	-	-
271	24	9,998075	124295,7	0,973147	0,972995	4,02E-15	50,94882	135,6089
Modelo de Zhang 2 Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	8,296468	349,6686	3,184334	1,183081	1,18E-08	1,372358	1,699526
894	28	7,584465	404,2572	3,199392	1,016308	5,65E-09	6,443698	8,280861
720	25	6,784717	434,7958	3,222232	0,815545	4,41E-09	3,414277	4,234708
670	28	6,622926	416,0869	3,229863	0,761662	6,55E-09	4,801027	5,944328
588	23	6,128617	458,4491	3,24375	0,664418	3,83E-09	2,702517	3,605735
271	24	4,272318	487,3993	3,327385	0,306591	6,46E-09	10,64293	12,97435
Modelo de Wang Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	-0,00012	9127,907	2	1,131133	1,26E-10	17,17394	24,31301
894	28	-6,73E-05	10536,91	2	0,96875	5,57E-11	13,67927	21,34104
720	25	-5,18E-05	13083,33	2	0,77636	3,89E-11	19,60635	26,47937
670	28	-6,78E-05	14059,7	2	0,72602	5,57E-11	20,10896	26,42153
588	23	-4,34E-05	16020,41	2	0,631936	3,05E-11	19,29308	26,78814
271	24	-4,86E-05	34760,15	2	0,291731	3,44E-11	19,05211	28,67895
Modelo de Lang Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	5,541742	243,9841	2,5	1,201176	1,21E-10	2,082009	2,570768
894	28	5,541742	281,6461	2,5	1,029426	6,20E-11	5,577071	6,676645
720	25	5,541742	349,7106	2,5	0,825227	4,62E-11	4,273475	5,682773
670	28	5,541742	375,8084	2,5	0,771494	6,20E-11	5,569178	7,067009
588	23	5,541742	428,217	2,5	0,671845	3,78E-11	3,974127	5,607601
271	24	5,541742	929,1203	2,5	0,310125	4,18E-11	4,125065	6,046757

Fonte: Próprio Autor (2023).

crystalino, os modelos que melhor representam o comportamento de um módulo FV são justamente os de Silva, Zhang 2 e Zhang 1. Dito isso, quando o comportamento I-V e P-V da tecnologia estudada começa a se assemelhar a do silício cristalino é esperado que os modelos apontados por (JUNIOR, 2023) se destaquem nos resultados, sendo justamente isso que foi observado para tecnologia CIGS.

A Figura 13 mostra as curvas P-V's geradas pelo conjunto validação da tecnologia

Figura 12 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos para CIGS.



Fonte: Próprio Autor (2023).

HIT. Enquanto as Tabelas 13 e 14 expressam os parâmetros extraídos por cada modelo e suas métricas de erro para a mesma tecnologia.

Para a tecnologia HIT, foi observado o mesmo comportamento do CIGS, onde todos os modelos conseguiram representar as curvas P-V's do módulos FV. Desta vez, com valores de erro ainda menores do que para tecnologia CIGS como mostram as Tabelas 13 e 14. Tal resultado pode ser explicado pelo fato das curvas I-V's de tecnologia HIT serem ainda mais próximas das do silício cristalino do que as de CIGS. Mais uma vez, como destacado em (JUNIOR, 2023), os três modelos com melhor representação das curvas I-V's e P-V's foram Zhang 1, Silva e Zhang 2 que apresentaram valores de EMAPN médio de 0,55%, 0,88% e 0,99% e de RMDSN médio de 1,08%, 1,46% e 1,93% respectivamente.

Nesta seção, é constatado que, para tecnologias como HIT e CIGS, que possuem curvas I-V's e P-V's similares das de silício cristalino, já é possível obter resultados razoáveis com os modelos originais encontrados na literatura. Entretanto, para tecnologias de aSi com comportamentos I-V's relativamente distintas do silício cristalino, parte dos modelos já não apresentam bons resultados, com o modelo de Zhang 1 chegando a descaracterizar totalmente a curva de potência em diferentes condições ambientais. Observa-se também que, para estas tecnologias, em alguns modelos alguns parâmetros como  $n$  ou  $R_s$  ficaram saturados em seus valores máximos, limitados pelas configurações de busca propostas nos trabalhos originais. Assim, espera-se que, com mais liberdade para o algoritmo de otimização buscar os parâmetros, os resultados obtidos sejam melhores.

Tabela 11 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para CIGS.

Modelo de Silva Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	0,789738	42,63489	2	6,729448	0,000117	0,6039	0,699246
960	33	0,821007	44,35157	2	6,261834	9,18E-05	0,966088	0,98072
869	32	0,855661	46,74955	2	5,664029	8,46E-05	0,521499	0,950375
609	20	1,030511	56,88339	2	3,942783	2,99E-05	1,736409	2,403028
440	34	1,137013	66,41658	2	2,867641	0,0001	1,943362	2,498407
266	23	1,508027	87,16959	2	1,723577	3,85E-05	2,769343	2,794263
Modelo de Zhang 1 Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	0,536272	37,71578	2,252672	6,758744	0,000392	1,221083	1,384528
960	33	0,606272	40,77839	2,261004	6,30664	3,26E-04	1,267969	1,321267
869	32	0,697272	45,1637	2,263751	5,711005	3,07E-04	0,386074	0,508592
609	20	0,957272	66,41585	2,297087	4,020647	1,41E-04	1,243933	1,491012
440	34	1,126272	88,74375	2,257984	2,889439	0,000346	3,195709	3,485712
266	23	1,300272	150,9295	2,28857	1,754142	1,72E-04	6,13143	5,726405
Modelo de Zhang 2 Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	1,236405	44,34619	1,573867	6,824707	6,46E-06	1,597295	1,728443
960	33	1,208058	44,7144	1,584983	6,361976	5,46E-06	1,100694	1,179526
869	32	1,181041	45,18045	1,600847	5,759241	5,64E-06	0,850512	0,901956
609	20	1,059849	47,04584	1,658785	4,03886	2,98E-06	1,601054	1,778611
440	34	1,040622	48,32269	1,713588	2,91574	1,48E-05	0,825811	1,153546
266	23	0,910481	51,04617	1,802036	1,763799	1,03E-05	3,892359	4,684499
Modelo de Wang Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	1,333254	8796,117	1,149433	5,683639	4,15E-08	3,706086	7,698025
960	33	1,332747	9437,5	1,149433	5,299295	2,74E-08	2,973079	7,664095
869	32	1,33256	10425,78	1,149433	4,797547	2,38E-08	3,414309	7,926743
609	20	1,329861	14876,85	1,149433	3,367027	4,16E-09	8,580465	10,54992
440	34	1,332847	20590,91	1,149433	2,42855	3,15E-08	9,914079	10,92055
266	23	1,330526	34060,15	1,149433	1,470123	6,51E-09	19,96337	19,70624
Modelo de Lang Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	1,152811	43,98058	1,639928	6,753263	1,10E-05	1,205686	1,350902
960	33	1,152811	47,1875	1,639928	6,296226	8,19E-06	0,864089	0,956115
869	32	1,152811	52,12888	1,639928	5,699977	7,40E-06	1,033347	1,20672
609	20	1,152811	74,38424	1,639928	3,999455	2,09E-06	5,561905	5,677356
440	34	1,152811	102,9545	1,639928	2,885477	9,05E-06	6,966946	6,690424
266	23	1,152811	170,3008	1,639928	1,746356	2,89E-06	16,63845	15,07151

Fonte: Próprio Autor (2023).

#### 4.3.1.2 Análise dos Modelos Modificados

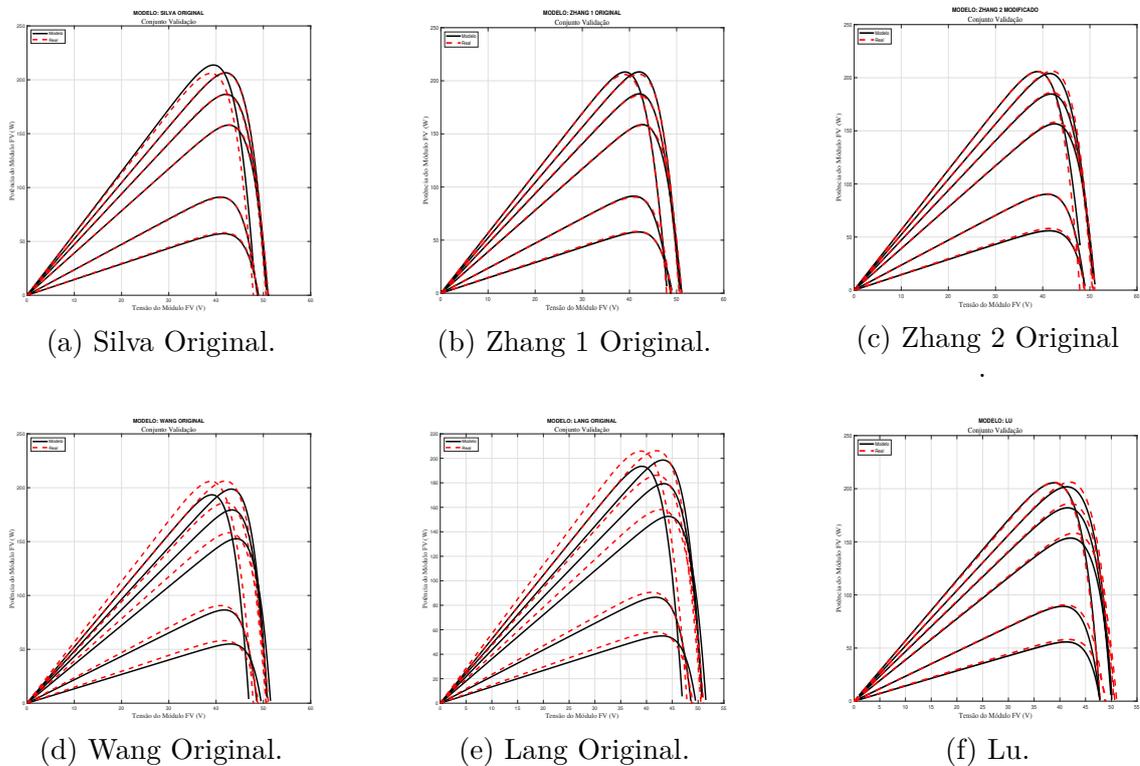
Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos através dos modelos modificados na tentativa de melhorar os resultados encontrados na seção anterior. Os resultados serão apresentados através dos gráficos P-V's gerados por cada modelo, além de tabelas apresentando todos os parâmetros encontrados e seus parâmetros de erro EMAPN e NRMSD.

Tabela 12 – Parâmetros e erros do Modelo de Lu para CIGS.

Modelo de Lu					
G	T	M	$\Gamma$	EMAPN	NRMSD
1030	36	5,108957	0,876495	6,608926	6,942489
960	33	5,499072	0,863046	6,342482	6,86403
869	32	5,954086	0,849428	6,528542	7,225538
609	20	7,92373	0,819244	6,043697	7,384435
440	34	8,909215	0,802697	3,341326	4,91655
266	23	11,29914	0,793594	6,477409	7,492003

Fonte: Próprio Autor (2023).

Figura 13 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos para HIT.



Fonte: Próprio Autor (2023).

Destaca-se que os métodos de Zhang 1 e Lu não serão mostrados neste seção pelo fato dos seus métodos não terem nenhuma busca de parâmetro extrapolada ou nenhuma outra mudança na estrutura do seu modelo. Acentua-se também que nesta seção, o modelo de Silva será analisado para os três algoritmos de otimização que obtiveram melhor resultado de acordo com (JUNIOR, 2023).

Inicialmente, serão analisados, para todas as tecnologias, os resultados da extração paramétrica e dos erros para o modelo de Silva modificado utilizando os algoritmos de otimização PS, GCPSO e DSO. A Tabela 15 é a que representa os resultados para aSi-micro, a Tabela 16 para aSi-Tandem, a Tabela 17 para CIGS e por fim, a Tabela 18 que

Tabela 13 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para HIT.

Modelo de Silva Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,344106	-373,412	1,28629	5,685699	3,95E-08	2,688946	3,742812
966	29	0,371058	1155,19	1,28629	5,245597	3,68E-09	0,366508	0,965423
869	28	0,372406	1583,532	1,28629	4,718381	3,20E-09	0,468195	0,882864
723	23	0,379144	3230,16	1,28629	3,92486	1,66E-09	0,313343	0,694706
436	32	0,367015	5903,964	1,28629	2,367083	4,77E-09	0,406221	0,619659
268	23	0,379144	33104,76	1,28629	1,454704	1,44E-09	1,061848	1,832749
Modelo de Zhang 1 Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,501997	92849,1	1,096732	5,654382	1,73E-09	0,424775	0,76101
966	29	0,512516	100732,8	1,09663	5,211959	9,74E-11	0,32016	0,588108
869	28	0,547618	111976,9	1,096509	4,688605	8,32E-11	0,428607	0,831605
723	23	0,596957	134589,8	1,096327	3,900876	3,78E-11	0,476714	0,900414
436	32	0,712774	223182,5	1,09597	2,352396	1,50E-10	0,584739	1,131842
268	23	0,766301	363091,3	1,095761	1,445968	3,69E-11	1,088466	2,243501
Modelo de Zhang 2 Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,598409	2494,215	1,243327	5,674204	1,64E-08	1,542901	3,645386
966	29	0,540696	2514,62	1,269758	5,23023	2,62E-09	0,747131	1,345976
869	28	0,513423	2541,371	1,282015	4,705041	2,76E-09	0,75345	1,483338
723	23	0,464125	2588,548	1,306587	3,914551	2,14E-09	0,561364	0,883861
436	32	0,379399	2722,835	1,354778	2,360642	1,18E-08	0,558181	1,408162
268	23	0,294674	2858,621	1,420359	1,451037	9,47E-09	1,822242	2,806778
Modelo de Wang								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,317924	9551,527	1,079976	5,234783	1,85E-09	4,964361	7,744789
966	29	0,315032	10362,32	1,079976	4,825172	5,78E-11	4,098692	7,077526
869	28	0,31481	11518,99	1,079976	4,340656	4,81E-11	4,488572	7,495262
723	23	0,313577	13845,09	1,079976	3,611382	1,87E-11	4,872096	7,895812
436	32	0,315563	22958,72	1,079976	2,177822	1,00E-10	3,279381	6,53872
268	23	0,313474	37350,75	1,079976	1,338659	1,87E-11	5,645041	9,651533
Modelo de Lang Original								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,320999	9551,527	1,079976	5,234783	1,82E-09	4,920045	7,695055
966	29	0,320999	10362,32	1,079976	4,825172	5,78E-11	4,077684	7,064612
869	28	0,320999	11518,99	1,079976	4,340656	4,80E-11	4,469126	7,48021
723	23	0,320999	13845,09	1,079976	3,611382	1,87E-11	4,724816	7,817319
436	32	0,320999	22958,72	1,079976	2,177822	1,00E-10	3,289269	6,540932
268	23	0,320999	37350,75	1,079976	1,338659	1,87E-11	5,651189	9,660817

Fonte: Próprio Autor (2023)

representa os resultados para HIT.

Para todas as tecnologias analisadas, observou-se melhoria nos resultados obtidos através da extensão dos parâmetros de busca no modelo de Silva. Também foi observado que, para certas tecnologias, a mudança do algoritmo de otimização resultou em valores de erro ligeiramente menores que os obtidos através do PS, originalmente usado no modelo de Silva. Para aSi-Micro, é observado que utilizando o GCPSO obtêm-se valores de erros

Tabela 14 – Parâmetros e erros do Modelo de Lu para HIT.

Modelo de Lu					
G	T	M	$\Gamma$	EMAPN	NRMSD
1030	36	5,108957	0,876495	6,608926	6,942489
960	33	5,499072	0,863046	6,342482	6,864030
869	32	5,954086	0,849428	6,528542	7,225538
609	20	7,923730	0,819244	6,043697	7,384435
440	34	8,909215	0,802697	3,341326	4,916550
266	23	11,29914	0,793594	6,477409	7,492003

Fonte: Próprio Autor (2023).

ligeiramente menor quando comparado com os outros, com valores médios de EMAPN e NRMSD médios de 3,28% e 4,08%, respectivamente. Para a tecnologia aSi-Tandem, os melhores resultados também ocorrem quando utilizado o GCPSO, que obteve valores de erro mais baixo, apresentando valores médios de EMAPN e NRMSD de 3,22% e 4,36%. Enquanto para as tecnologias CIGS e HIT, o algoritmo de otimização que demonstrou melhores resultados foi o PS, apresentando valores médios de EMAPN e NRMSD de 1,14% e 1,38% para os módulos CIGS e 0,80% e 1,37% para módulos HIT. É importante lembrar que esta análise abrange um espaço amostral reduzido, já que conclusões mais definitivas são feitas a partir segunda etapa da validação, realizada com 100 curvas I-V's.

Considerando estes resultados, nas tabelas seguintes de comparação de resultados, serão representados os modelos de Silva que obtiveram os menores valores de erro para cada tecnologia, ou seja, para ambos os aSi, serão apresentados novamente Silva utilizando GCPSO, e para CIGS e HIT, serão apresentados novamente Silva PS. Vale salientar também que as representações gráficas para os três modelos de Silva estão expressos Figuras 14, 15, 16 e 17 junto com resultados dos demais modelos.

Dito isso, as curvas P-V's geradas pelos modelos através do conjunto de validação para a tecnologia de aSi-micro estão presentes na Figura 14. Enquanto na Tabela 19 estão representados os parâmetros encontrados por cada modelo e seus parâmetros de erro.

Ao comparar os resultados obtidos pelos outros modelos para aSi-Micro, observa-se que o modelo de Silva nas suas três configurações obteve melhores resultados que os outros modelos analisados. Entretanto, é observada uma grande melhora nos resultados obtidos pelo modelo de Zhang 2 quando comparado a sua aplicação sem alteração paramétrica, onde agora apresenta valores médios de 3,77% e 4,54% para EMAPN e NRMSD, enquanto no seu modelo original apresentou 18,28% e 20,75%. O modelo de Lang também apresentou melhores resultados após sua extensão paramétrica, porém melhoras mais moderadas quando comparadas a Zhang 2, apresentando agora o valores médios de 4,01% e 5,50% para EMAPN e NRMSD, enquanto no seu modelo sem modificações apresentou 5,61% 7,79%. Enquanto isso, o modelo de Wang mesmo determinando parâmetros muito

Tabela 15 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para aSi-Micro através dos Modelos de Silva modificados.

Modelo Silva Modificado PS								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	10,75289	5239,964	5,536944	0,821687	1,48E-04	0,569229	0,891830
960	30	10,36223	5244,363	5,536944	0,783905	1,36E-04	1,128505	1,525927
868	27	10,11932	5295,946	5,536944	0,704089	1,07E-04	0,310434	0,763373
702	24	9,730599	5201,714	5,536944	0,565656	7,90E-05	0,171855	0,251144
565	27	8,258843	4779,794	5,536944	0,458223	8,65E-05	5,532212	6,785529
278	23	9,135805	4214,112	5,536944	0,223577	4,34E-05	12,31227	14,61215
Modelo Silva Modificado GCPSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	8,96913	5282,311	5,551819	0,821397	1,51E-04	0,415232	0,741928
960	30	9,232161	5292,238	5,551819	0,783724	1,39E-04	0,922897	1,393537
868	27	10,02126	5357,487	5,551819	0,704061	1,09E-04	0,304216	0,754533
702	24	10,81035	5285,782	5,551819	0,565755	8,10E-05	0,173099	0,285728
565	27	10,02126	4873,709	5,551819	0,458373	8,87E-05	5,683082	6,896367
278	23	11,07338	4356,665	5,551819	0,22366	4,48E-05	12,18722	14,44335
Modelo Silva Modificado DSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	12,10824	5180,978	5,541665	0,821908	1,49E-04	0,884153	1,142938
960	30	11,14581	5175,167	5,541665	0,784031	1,37E-04	1,318591	1,671662
868	27	9,994964	5199,763	5,541665	0,704082	1,07E-04	0,318204	0,782156
702	24	8,574094	5070,561	5,541665	0,565540	7,94E-05	0,22948	0,31723
565	27	6,525672	4650,849	5,541665	0,458065	8,68E-05	5,454315	6,750259
278	23	7,236232	4025,163	5,541665	0,223488	4,31E-05	12,57499	14,93599

Fonte: Próprio Autor (2023).

diferentes dos encontrados no seu modelo original, apresentou o mesmo desempenho de sua parametrização original, obtendo valores médios de EMAPN e NRMSD de 5,80% e 7,60% respectivamente.

Na Figura 15 são mostradas as curvas P-V's geradas pelos modelos modificados para a tecnologia de aSi-Tandem e na Tabela 20 os valores de parâmetros encontrados e seus valores de erro para cada curva I-V no conjunto de validação.

Para a tecnologia aSi-Tandem as três versões do modelo de Silva também obtiveram o melhor resultado dentre todos os modelos analisados. Após os modelos de Silva, o que obteve melhor resultado foi o modelo de Lang, apresentando valores médios de EMAPN e NRMSD de 3,50% e 4,57%. E para esta tecnologia, o modelo que apresentou uma melhora considerável nos seus resultados foi o modelo de Wang, apresentando agora valores médios de EMAPN e NRMSD de 5,96% e 7,79%, onde antes apresentavam valores de

Tabela 16 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para aSi-Tandem através dos Modelos de Silva modificados.

Modelo Silva Modificado PS								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	2,110017	423,6833	6,365994	1,149668	0,000112	1,027789	1,273914
894	28	2,602107	509,4797	6,365994	0,986182	6,72E-05	6,818952	8,823007
720	25	2,731143	819,2171	6,365994	0,789436	5,04E-05	2,4585	3,742048
670	28	2,44596	1091,186	6,365994	0,736978	5,97E-05	4,918688	6,011325
588	23	2,797894	1303,906	6,365994	0,642092	4,03E-05	2,709401	2,9591
271	24	2,428066	10448,27	6,365994	0,295791	2,90E-05	1,767057	3,490301
Modelo Silva Modificado GCPSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	2,296236	403,9802	6,159155	1,150473	8,22E-05	1,001649	1,313148
894	28	2,809157	488,757	6,159155	0,98681	4,90E-05	6,818998	8,836176
720	25	3,02898	785,8318	6,159155	0,789845	3,67E-05	2,367236	3,699648
670	28	2,809157	1038,878	6,159155	0,737318	4,36E-05	4,867041	5,973541
588	23	3,175528	1249,604	6,159155	0,642345	2,93E-05	2,646354	2,930458
271	24	3,102254	9788,554	6,159155	0,295816	2,13E-05	1,618986	3,435992
Modelo Silva Modificado DSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	2,441037	400,5562	6,135708	1,150942	7,93E-05	1,109724	1,403191
894	28	2,91709	485,1689	6,135708	0,987074	4,71E-05	6,813139	8,803151
720	25	2,99701	785,8587	6,135708	0,789818	3,53E-05	2,459186	3,73114
670	28	2,68237	1046,238	6,135708	0,737217	4,21E-05	5,033541	6,101054
588	23	3,015662	1258,994	6,135708	0,642256	2,82E-05	2,817276	3,08322
271	24	2,443943	10265,94	6,135708	0,295794	2,06E-05	1,42878	3,381494

Fonte: Próprio Autor (2023).

18,15% e 25,67%. Por fim, o modelo de Zhang 2 com a busca paramétrica estendida apresentou resultados ligeiramente piores quando comparado com sua parametrização original, apresentando valores médios de EMAPN e NRSMD de 5,37% e 6,78% enquanto no seu modelo original apresentou 4,90% e 6,12%. Tal resultado pode ter ocorrido devido a limitações do modelo, não conseguindo encontrar um bom conjunto de parâmetros quando lhe foi apresentado uma gama maior de possibilidades, ou simplesmente o modelo treinado não foi favorecido pelo conjunto de curvas de validação escolhido. Quando for feita a análise mais generalista com 100 curvas de validação, tal questionamento é melhor respondido.

A Figura 16 apresenta as curvas P-V's geradas através dos modelos modificados para a tecnologia CIGS, enquanto a Tabela 21 apresenta os valores de parâmetros encontrados pelos modelos e seus valores de erro para cada curva I-V no conjunto de validação.

Tabela 17 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para CIGS através dos Modelos de Silva modificados.

Modelo Silva Modificado PS								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	0,702808	60,26046	2,547587	6,684121	0,001245	0,646459	0,688369
960	33	0,683223	62,57589	2,547587	6,215152	0,001011	0,46997	0,541386
869	32	0,619966	64,1604	2,547587	5,615969	0,000925	0,37246	0,532738
609	20	0,662062	74,98868	2,547587	3,906817	0,000376	1,51998	1,979221
440	34	0,36197	70,58053	2,547587	2,833834	0,000869	1,52169	1,921836
266	23	0,517107	84,00418	2,547587	1,704696	0,000352	2,29940	2,616516
Modelo Silva Modificado GCPSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	0,643125	56,07808	2,440982	6,682836	0,000852	0,502177	0,566572
960	33	0,644413	57,67228	2,440982	6,216722	6,88E-04	0,925743	0,905219
869	32	0,646241	59,46799	2,440982	5,622668	6,30E-04	0,405816	0,611294
609	20	0,652809	67,86627	2,440982	3,909877	2,49E-04	1,849949	2,258914
440	34	0,658871	71,56663	2,440982	2,845331	0,000621	1,923174	2,3957
266	23	0,66837	84,91317	2,440982	1,707602	2,48E-04	2,402114	2,633353
Modelo Silva Modificado DSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	0,797823	56,77553	2,453158	6,699907	0,000895	1,052356	1,182292
960	33	0,768486	58,61868	2,453158	6,228627	7,22E-04	0,598823	0,662466
869	32	0,669904	60,17556	2,453158	5,624145	6,60E-04	0,403597	0,584327
609	20	0,715156	69,19781	2,453158	3,912652	2,62E-04	1,57963	2,08323
440	34	0,241382	68,40436	2,453158	2,829324	0,000635	1,018503	1,454009
266	23	0,462077	80,703	2,453158	1,703968	2,53E-04	2,637609	2,901562

Fonte: Próprio Autor (2023).

Para a tecnologia CIGS, mais uma vez é observado que o modelo de Silva foi o que melhor representou as curvas do conjunto de validação, com o de Zhang 2 sendo o melhor em sequência, apresentando MAEPN e NRMSD médios de 3,39% e 4,80%. Quanto aos outros modelos, Wang modificado obteve os mesmos valores paramétricos que seu modelo original, logo também obteve as mesmas métricas de erro. Por sua vez, o modelo de Lang com parâmetros estendidos apresentou piores resultados que seu modelo original, apresentando agora valores médios de EMAPN e NRMSD de 7,89% e 10,98% enquanto no seu modelo original obteve 5,38% e 5,15%. A piora nos resultados de Wang e Lang quando comparados ao seu modelo original, pode ser explicada pelo fato dos modelos originais já serem suficientes para a representação, ao estender a busca paramétrica deixa apenas o algoritmo de otimização com maior dificuldade de encontrar o ponto de mínimo global e aumenta as chances da busca ficar presa em um mínimo local.

Tabela 18 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para HIT através dos Modelos de Silva modificados.

Modelo Silva Modificado PS								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,367486	-485,077	1,287605	5,686632	3,99E-08	2,368398	3,381455
966	29	0,363293	1092,064	1,287605	5,245657	3,76E-09	0,407952	0,995957
869	28	0,357991	1432,479	1,287605	4,71845	3,27E-09	0,543033	0,981493
723	23	0,349149	2734,513	1,287605	3,924901	1,69E-09	0,215878	0,558184
436	32	0,327097	3742,859	1,287605	2,367143	4,85E-09	0,31299	0,495649
268	23	0,308683	17545,66	1,287605	1,454713	1,47E-09	0,9811	1,805037
Modelo Silva Modificado GCPSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,37036	-268,154	1,281152	5,683083	3,71E-08	2,760753	3,681964
966	29	0,366598	1050,714	1,281152	5,245742	3,38E-09	0,40795	0,965365
869	28	0,361771	1386,841	1,281152	4,718502	2,94E-09	0,547723	0,980828
723	23	0,35353	2628,546	1,281152	3,924927	1,51E-09	0,206562	0,542005
436	32	0,331825	4242,505	1,281152	2,367121	4,40E-09	0,348555	0,541992
268	23	0,312199	19656,49	1,281152	1,454711	1,32E-09	0,953826	1,786279
Modelo Silva Modificado DSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,370705	-246,503	1,281038	5,68248	3,71E-08	2,849706	3,770929
966	29	0,366922	1056,606	1,281038	5,245734	3,37E-09	0,40632	0,964782
869	28	0,362067	1393,1	1,281038	4,718494	2,93E-09	0,546509	0,979494
723	23	0,353779	2629,45	1,281038	3,924908	1,51E-09	0,207077	0,542425
436	32	0,331956	4290,834	1,281038	2,367125	4,40E-09	0,350148	0,544144
268	23	0,312229	19686,18	1,281038	1,454703	1,32E-09	0,953095	1,786236

Fonte: Próprio Autor (2023).

Por fim, para a tecnologia HIT, a Figura 17 apresenta as curvas P-V's geradas através dos modelos modificados e a Tabela 22 apresenta os valores de parâmetros encontrados pelos modelos e seus valores de erro para cada curva I-V no conjunto de validação.

Os resultados para tecnologia HIT apresentaram o Modelo de Zhang 2 como o de melhor desempenho entre os outros modelos modificados, apresentando valores médios de EMAPN e NRMSD de 0,7617 e 1,48% respectivamente. Dentre os modelos modificados, logo em seguida os modelos de Silva se mostraram os que melhor representaram as curvas P-V's e I-V's, sendo a variante utilizando o PS como algoritmo de otimização que obteve melhor resultado. Enquanto isso, os modelos de Lang e Wang mesmo com mudanças paramétricas obtiveram os mesmos resultados de parâmetros extraídos e métricas de erro de quando aplicados os modelos originais. Tal resultado pode ser explicado pois dentre as tecnologias estudadas neste trabalho, a HIT é a que mais se assemelha em características

Tabela 19 – Parâmetros extraídos e erros do conjunto validação para aSi-Micro através dos modelos modificados.

Modelo Silva Modificado GCPSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	8,96913	5282,311	5,551819	0,821397	1,51E-04	0,415232	0,741928
960	30	9,232161	5292,238	5,551819	0,783724	1,39E-04	0,922897	1,393537
868	27	10,02126	5357,487	5,551819	0,704061	1,09E-04	0,304216	0,754533
702	24	10,81035	5285,782	5,551819	0,565755	8,10E-05	0,173099	0,285728
565	27	10,02126	4873,709	5,551819	0,458373	8,87E-05	5,683082	6,896367
278	23	11,07338	4356,665	5,551819	0,22366	4,48E-05	12,18722	14,44335
Modelo Zhang 2 Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	23,59084	2370,261	3,968455	0,843268	4,72E-06	0,725255	0,875994
960	30	22,86629	2380,907	3,970032	0,804933	4,31E-06	0,932288	1,228446
868	27	21,26534	2405,014	3,965079	0,724055	3,20E-06	0,817073	1,041576
702	24	18,44349	2456,608	3,991343	0,582559	2,51E-06	1,051633	1,434653
565	27	16,2609	2510,526	4,087881	0,471303	4,07E-06	4,994453	6,328156
278	23	10,30457	2695,039	4,250724	0,230301	3,73E-06	14,09396	16,30923
Modelo Wang Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	11,67202	2996,863	4,869715	0,834447	5,37E-05	2,110536	3,195658
960	30	11,67431	3134,219	4,869715	0,796873	5,09E-05	3,000832	4,081243
868	27	11,68112	3466,418	4,869715	0,717782	4,32E-05	2,919106	4,580492
702	24	11,6877	4286,112	4,869715	0,578307	3,66E-05	4,42337	6,517297
565	27	11,68077	5325,399	4,869715	0,46722	4,32E-05	8,320661	10,07311
278	23	11,6892	10823,2	4,869715	0,228725	3,46E-05	14,02036	17,12682
Modelo Lang Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1004	31	45,08359	1388,906	1,922884	0,871331	2,46E-11	4,453128	5,925725
960	30	45,08359	1452,565	1,922884	0,83214	2,18E-11	4,725427	6,170001
868	27	45,08359	1606,523	1,922884	0,749669	1,50E-11	3,755342	5,396295
702	24	45,08359	1986,413	1,922884	0,604096	1,03E-11	3,344061	4,989916
565	27	45,08359	2468,074	1,922884	0,487976	1,50E-11	3,748353	5,086451
278	23	45,08359	5016,05	1,922884	0,238938	9,06E-12	4,053518	5,470655

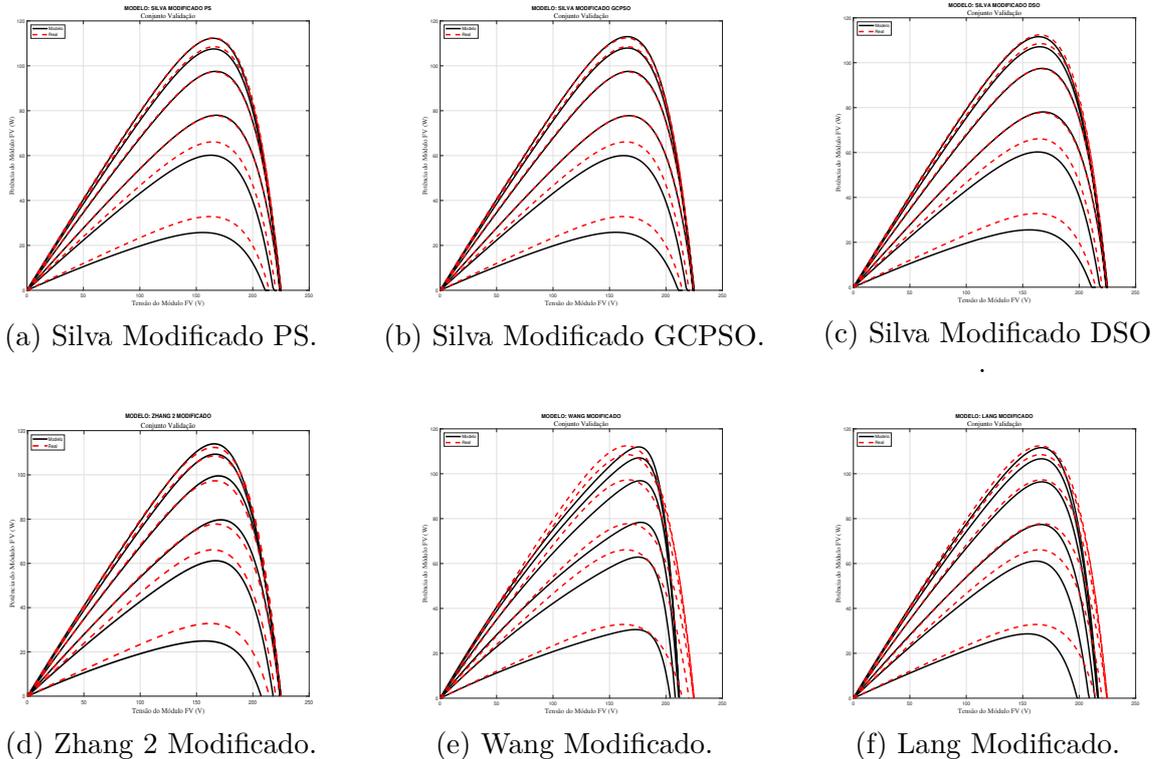
Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 20 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para aSi-Tandem com Modelos Modificados.

Modelo Silva Modificado GCPSO								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	2,296236	403,9802	6,159155	1,150473	8,22E-05	1,001649	1,313148
894	28	2,809157	488,757	6,159155	0,98681	4,90E-05	6,818998	8,836176
720	25	3,02898	785,8318	6,159155	0,789845	3,67E-05	2,367236	3,699648
670	28	2,809157	1038,878	6,159155	0,737318	4,36E-05	4,867041	5,973541
588	23	3,175528	1249,604	6,159155	0,642345	2,93E-05	2,646354	2,930458
271	24	3,102254	9788,554	6,159155	0,295816	2,13E-05	1,618986	3,435992
Modelo Zhang 2 Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	0,318	444,4095	6,013669	1,157078	8,38E-05	1,312836	2,087468
894	28	0,311	450,8349	5,973485	0,993782	3,77E-05	7,793129	10,11733
720	25	0,308	460,6998	6,048516	0,797403	2,68E-05	3,494736	4,021483
670	28	0,311	464,0276	6,148286	0,744781	3,87E-05	3,986357	4,826796
588	23	0,306	470,1253	6,134385	0,649602	2,14E-05	3,130786	4,294631
271	24	0,307	507,9891	6,648911	0,299763	2,61E-05	12,49437	15,34431
Modelo Wang Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	1,889408	479,167	6,386074	1,159841	1,09E-04	1,779219	2,259886
894	28	1,915554	553,1324	6,386074	0,993619	8,05E-05	5,67325	7,367554
720	25	1,925369	686,8061	6,386074	0,796389	7,04E-05	4,148505	5,560644
670	28	1,914351	738,0602	6,386074	0,744658	8,05E-05	4,586483	6,141062
588	23	1,931482	840,987	6,386074	0,648293	6,44E-05	5,15198	7,255967
271	24	1,925064	1824,725	6,386074	0,29927	6,73E-05	14,44562	18,1616
Modelo Lang Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1032	35	8,679845	256,9454	2,566013	1,210287	1,20E-10	1,120927	1,452576
894	28	8,679845	296,6081	2,566013	1,037319	6,27E-11	5,803211	7,312934
720	25	8,679845	368,2884	2,566013	0,831584	4,70E-11	3,23091	4,077512
670	28	8,679845	395,7727	2,566013	0,777409	6,27E-11	4,90673	6,771242
588	23	8,679845	450,9654	2,566013	0,677036	3,86E-11	3,131395	3,980944
271	24	8,679845	978,4785	2,566013	0,312517	4,26E-11	2,817162	3,84522

Fonte: Próprio Autor (2023).

Figura 14 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos modificados para aSi-Micro.



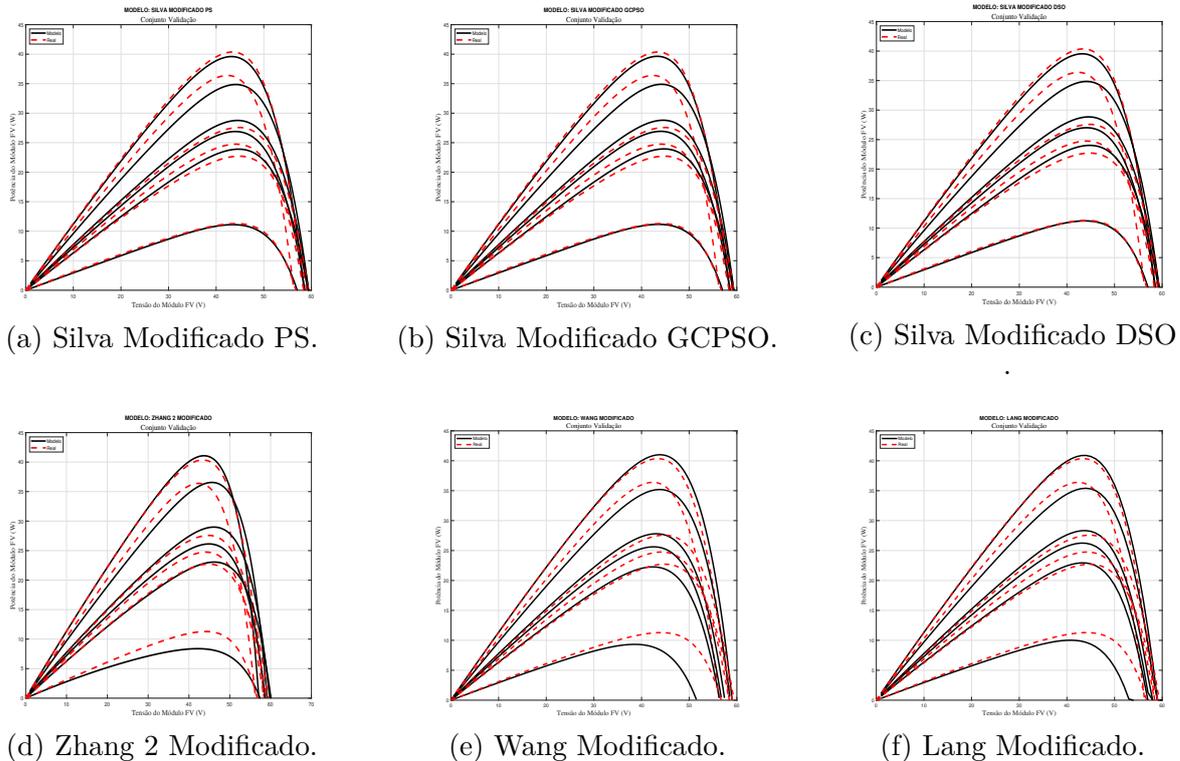
Fonte: Próprio Autor (2023).

elétricas ao silício cristalino, logo que a maioria dos modelos originais já conseguiram resultados satisfatórios para esta tecnologia. Dessa forma, é importante ressaltar que dentre todos os modelos analisados o que melhor conseguiu representar a tecnologia HIT foi o de Zhang 1, obtendo valores médios de EMAPN e NRMSD de 0,55% e 1,08%.

Observou-se, através desta análise, que, para a maioria dos modelos avaliados, a modificação e extrapolação da busca paramétrica permitiram aos mesmos adequar com maior fidedignidade as curvas experimentais das tecnologias de características elétricas e construtivas diferentes do silício cristalino. Ocorreu também que para alguns modelos, o aumento do parâmetro de busca gerou resultados ligeiramente piores quando comparados com os algoritmos originais, como foi o caso de Zhang 2. E tendo modelos que mesmo com a extrapolação da busca paramétrica, para certas tecnologias obtiveram os exatos mesmos resultados, como foi o caso de Wang e Lang para as tecnologias semelhantes ao c-Si.

Vale ressaltar também que para todos os modelos e tecnologias estudadas, apresentou-se maiores valores de erro tanto em potência quanto em corrente para menores valores de irradiância. Tais resultados são esperados, pois em (MAVROMATAKIS; VIGNOLA; MARION, 2017) foi constatado que a eficiência de células e módulos fotovoltaicos decaem de forma não linear com a diminuição da irradiância incidente, dessa forma os modelos baseados em SDM tem dificuldade de representar tais decaimentos e perdas por conta da baixa irradiância. Entretanto, modelos baseados no DDM conseguem representar melhor tais

Figura 15 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos modificados para aSi-Tandem.



Fonte: Próprio Autor (2023).

características dos módulos FV (JUNIOR, 2018; JUNIOR, 2023).

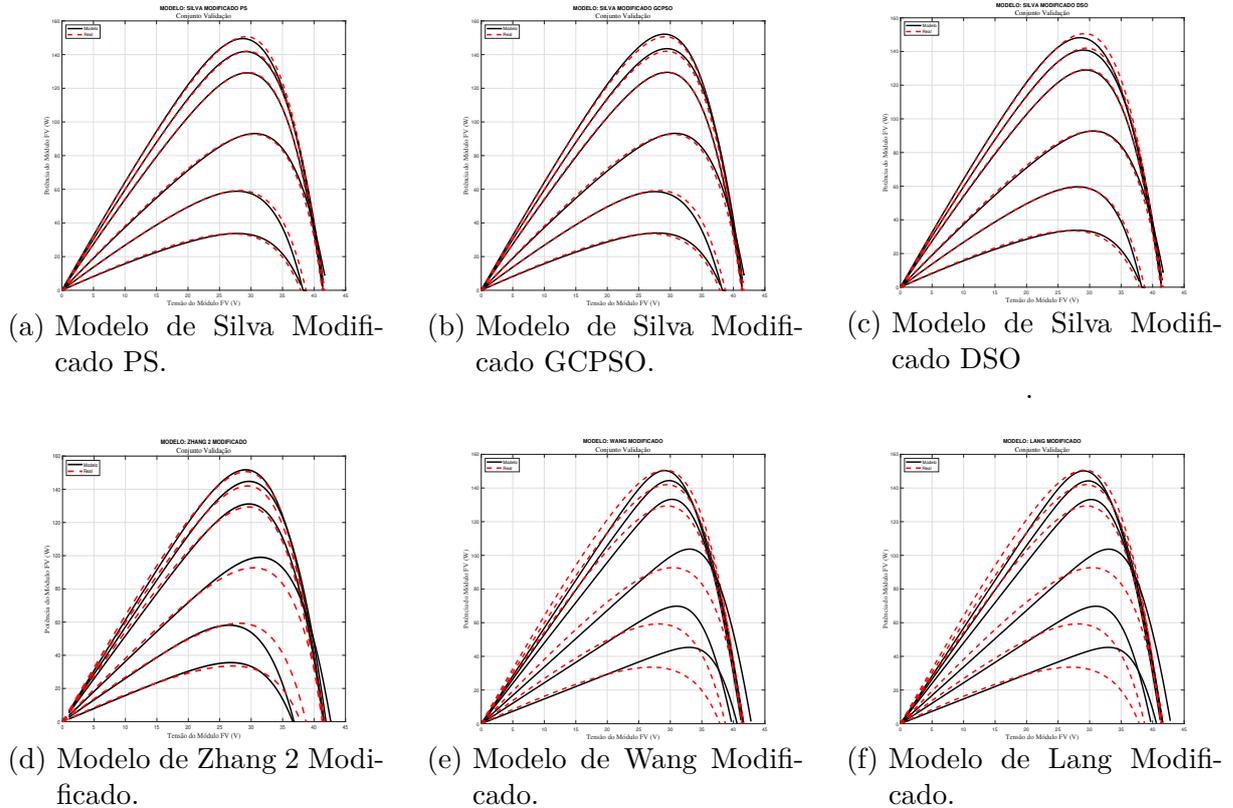
Esta primeira análise de validação teve como objetivo mostrar a capacidade dos modelos de representar as curvas P-V's dos módulos em condições ambientais diversas porém específicas.

#### 4.3.2 Análise Geral de Validação

Na segunda fase da validação, realiza-se uma análise mais generalista, na qual os mesmos modelos e tecnologias serão utilizados, entretanto submetidos a 100 curvas de diferentes níveis de irradiância e temperatura, conforme apresenta a Figura 9. Com isso, planeja-se identificar qual dos modelos possui maior capacidade de generalização ao se avaliar os valores de EMAPN obtidos. Nesta análise, para toda tabela de resultados apresentada, os três melhores resultado em EMAPN médio e desvio padrão foram destacados em negrito para melhor visualização.

Os resultados obtidos para tecnologia de aSi-Micro estão presentes na Tabela 23. Ao analisar as médias, o modelo de Lu é o que obtêm melhores resultados em comparação com os demais, seguido dos modelos de Wang e Lang em desempenho. Entre os três modelos que apresentam melhores resultados, os modelos de Wang e Lu são os que possuem menores valores de desvio padrão, ou seja, os seus resultados de mínimo e máximo não serem

Figura 16 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos modificados para CIGS.



Fonte: Próprio Autor (2023).

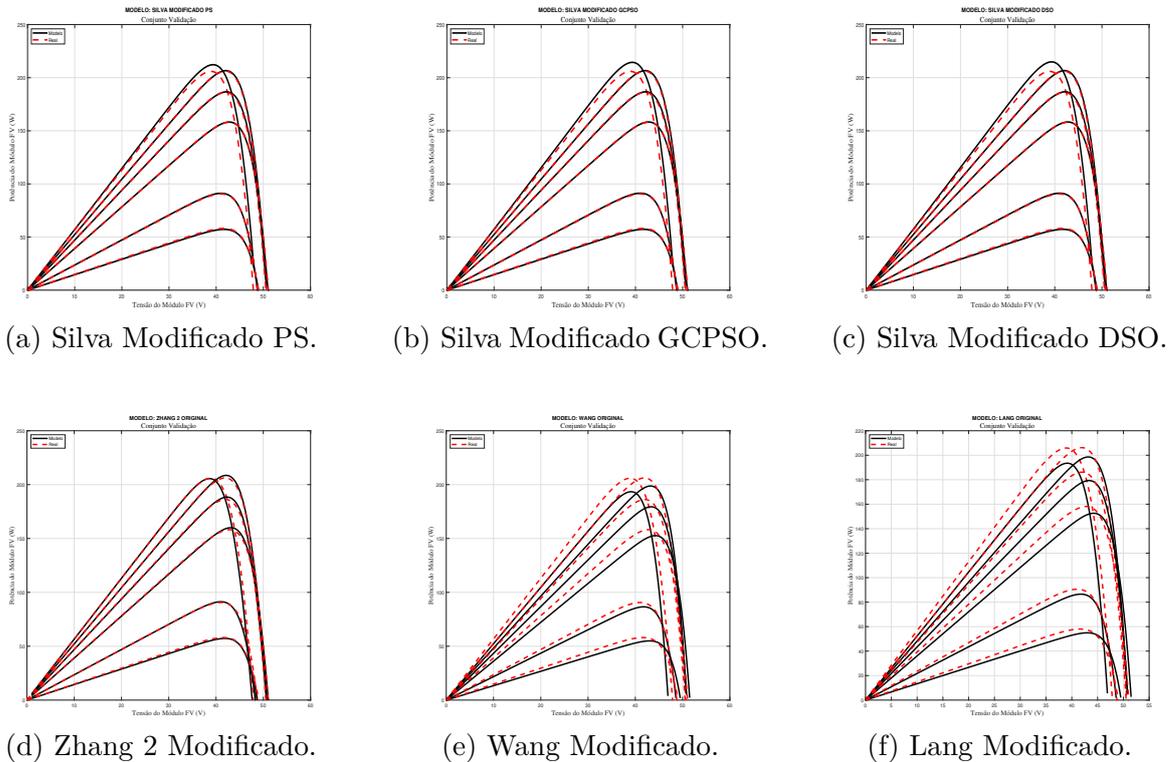
distantes, tornando eles assim modelos consistentes.

Para a tecnologia aSi-Tandem, os resultados estão representados pela Tabela 24. O modelo de Lu novamente apresentou melhores resultados e baixo valor de desvio padrão, se mostrando um modelo fiel e consistente com seus resultados. O modelo original de Zhang 2 foi o que apresentou a segunda menor média de erro junto com o menor valor de desvio padrão, se mostrando outro bom modelo para tal tecnologia. Por fim, na terceira colocação de desempenho, os modelos de Silva PS e GCPSO apresentaram valores razoáveis de média de erro entretanto foram os modelos de maior desvio padrão, sendo necessário analisar a faixa de condições ambientais em que ocorre os maiores valores de erro e avaliar se a aplicação será muito impactada.

Os resultados para tecnologia CIGS estão expressos na Tabela 25. Mais uma vez, o modelo de Lu foi o que apresentou menores valores de erro médio e de desvio padrão, se mostrando um modelo preciso e coeso. Seguido em desempenho pelo modelo de Zhang 1 e o modelo de Silva GCPSO.

Finalizando esta análise, os resultados obtidos para tecnologia HIT estão presentes na Tabela 26. A tecnologia HIT foi a que apresentou melhores resultados tanto em valores médios de erro como também, no geral, os modelos aqui apresentaram valores de desvio padrão bem abaixo do quando comparado com outras tecnologias. O modelo de Zhang

Figura 17 – Curvas P-V geradas do conjunto validação pelos modelos modificados para CIGS.



Fonte: Próprio Autor (2023).

1 e Zhang 2 modificado foram os que apresentaram menores valores de erro médio e ambos também com valores baixo de desvio padrão, tendo seus valores máximos de erro na mesma ordem de grandeza dos melhores resultados de outras tecnologias.

Por fim, utilizando os valores médios de EMAPN de cada modelo apresentados nas tabelas anteriores, apresentado também de forma concisa na Tabela 27, foi realizado o ranqueamento a fim de elucidar os modelos que apresentaram melhor performance, apresentado na Tabela 28. É válido ressaltar que para estas tabelas, os três melhores resultados para cada tecnologia estão em negrito para facilitar a visualização. Com isso, é possível ver que o modelo de Lu conseguiu se destacar como o modelo que melhor representa as tecnologias avaliadas. Além disso, é observado que para tecnologias de silício amorfo o modelo de Zhang 2 com parâmetros expandidos foi o que obteve pior performance.

Por fim, a tom de informar o leitor acerca do nível de esforço computacional de cada modelo, na tabela 29, é mostrada uma comparação de teor qualitativo da questão.

Tabela 21 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para tecnologia CIGS através de Modelos Modificados.

Modelo Silva Modificado PS								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	0,702808	60,26046	2,547587	6,684121	0,001245	0,64646	0,688369
960	33	0,683223	62,57589	2,547587	6,215152	0,001011	0,46997	0,541386
869	32	0,619966	64,1604	2,547587	5,615969	0,000925	0,37246	0,532738
609	20	0,662062	74,98868	2,547587	3,906817	0,000376	1,51998	1,979221
440	34	0,36197	70,58053	2,547587	2,833834	0,000869	1,521699	1,921836
266	23	0,517107	84,00418	2,547587	1,704696	0,000352	2,29940	2,616516
Modelo Zhang 2 Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	0,762758	2498,54	2,337347	6,148941	5,76E-04	1,078209	3,030527
960	33	0,748931	2516,187	2,353856	5,732136	4,87E-04	2,197667	3,500358
869	32	0,737277	2541,371	2,377415	5,189105	5,03E-04	1,701606	3,454506
609	20	0,678204	2633,348	2,463458	3,639305	2,66E-04	5,165249	5,943411
440	34	0,681142	2720,35	2,544847	2,627064	0,00132	5,912378	7,618005
266	23	0,617212	2860,763	2,676201	1,589281	9,19E-04	4,281512	5,246027
Modelo Wang Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	1,333254	8796,117	1,149433	5,683639	4,15E-08	3,706086	7,698025
960	33	1,332747	9437,5	1,149433	5,299295	2,74E-08	2,973079	7,664095
869	32	1,33256	10425,78	1,149433	4,797547	2,38E-08	3,414309	7,926743
609	20	1,329861	14876,85	1,149433	3,367027	4,16E-09	8,580466	10,54992
440	34	1,332848	20590,91	1,149433	2,42855	3,15E-08	9,914081	10,92055
266	23	1,330526	34060,15	1,149433	1,470123	6,51E-09	19,96337	19,70625
Modelo Lang Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1030	36	1,339519	8796,117	1,149433	5,683639	4,15E-08	3,75861	7,709626
960	33	1,339519	9437,5	1,149433	5,299295	2,74E-08	2,981941	7,665174
869	32	1,339519	10425,78	1,149433	4,797547	2,38E-08	3,368932	7,921229
609	20	1,339519	14876,85	1,149433	3,367027	4,12E-09	8,506959	10,54379
440	34	1,339519	20590,91	1,149433	2,42855	3,15E-08	9,88457	10,894
266	23	1,339519	34060,15	1,149433	1,470123	6,48E-09	18,86597	19,35303

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 22 – Parâmetros Extraídos e erros do conjunto de validação para tecnologia HIT através de Modelos Modificados.

Modelo Silva Modificado PS								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,367486	-485,077	1,287605	5,686632	3,99E-08	2,368398	3,381455
966	29	0,363293	1092,064	1,287605	5,245657	3,76E-09	0,407952	0,995957
869	28	0,357991	1432,479	1,287605	4,71845	3,27E-09	0,543033	0,981493
723	23	0,349149	2734,513	1,287605	3,924901	1,69E-09	0,215878	0,558184
436	32	0,327097	3742,859	1,287605	2,367143	4,85E-09	0,31299	0,495649
268	23	0,308683	17545,66	1,287605	1,454713	1,47E-09	0,9811	1,805037
Modelo Zhang 2 Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,519464	2827,036	1,097656	5,663275	2,09E-09	0,856207	1,743073
966	29	0,485617	2827,036	1,097656	5,220157	1,01E-10	0,305431	0,532823
869	28	0,480775	2827,036	1,097656	4,695979	8,75E-11	0,560365	0,857105
723	23	0,467478	2827,036	1,097656	3,907012	3,95E-11	0,36156	0,603223
436	32	0,465813	2827,036	1,097656	2,356095	1,87E-10	0,856241	2,308832
268	23	0,438549	2827,036	1,097656	1,448242	4,68E-11	1,663004	2,870188
Modelo Wang Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,317924	9551,527	1,079976	5,234783	1,85E-09	4,964361	7,744789
966	29	0,315032	10362,32	1,079976	4,825172	5,78E-11	4,098692	7,077526
869	28	0,31481	11518,99	1,079976	4,340656	4,81E-11	4,488572	7,495262
723	23	0,313577	13845,09	1,079976	3,611382	1,87E-11	4,872096	7,895812
436	32	0,315563	22958,72	1,079976	2,177822	1,00E-10	3,279381	6,53872
268	23	0,313474	37350,75	1,079976	1,338659	1,87E-11	5,645041	9,651533
Modelo Lang Modificado								
S	T	Rs	Rp	n	Ig	Isat	EMAPN	NRMSD
1048	49	0,320999	9551,527	1,079976	5,234783	1,82E-09	4,920045	7,695055
966	29	0,320999	10362,32	1,079976	4,825172	5,78E-11	4,077684	7,064612
869	28	0,320999	11518,99	1,079976	4,340656	4,80E-11	4,469126	7,48021
723	23	0,320999	13845,09	1,079976	3,611382	1,87E-11	4,724816	7,817319
436	32	0,320999	22958,72	1,079976	2,177822	1,00E-10	3,289269	6,540932
268	23	0,320999	37350,75	1,079976	1,338659	1,87E-11	5,651189	9,660817
268	23	0,320999	37350,75	1,079976	1,338659	1,87E-11	5,651189	9,660817

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 23 – Resultados da segunda fase da validação dos modelos (EMAPN) para a tecnologia de aSi-Micro.

aSi-Micro				
Modelo	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão
Silva (PS)	2,4964	5,9110	11,0995	1,9120
Silva (GCPSO)	2,4748	6,0878	11,2216	1,9337
Silva (DSO)	2,3943	5,7680	11,0193	1,9179
Lu	1,0092	<b>3,2377</b>	5,6017	<b>0,6250</b>
Lang Mod.	1,4446	<b>4,9293</b>	9,7349	2,0633
Wang Mod.	3,3428	<b>4,2317</b>	6,1669	<b>0,4411</b>
Zhang 2 Orig.	15,6621	19,9562	25,8816	2,8186
Zhang 2 Mod.	2,5020	6,2298	11,5248	<b>1,8652</b>

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 24 – Resultados da segunda fase da validação dos modelos (EMAPN) para a tecnologia de aSi-Tandem.

aSi-Tandem				
Modelo	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão
Silva (PS)	0,6709	<b>3,5311</b>	12,2298	2,5531
Silva (GCPSO)	0,6859	3,5840	12,3609	2,5749
Silva (DSO)	0,7907	3,8558	12,7736	2,6590
Lu	0,7085	<b>1,9784</b>	8,6687	<b>1,4486</b>
Lang Mod.	0,4299	3,9502	7,9974	<b>1,2222</b>
Wang Mod.	1,1834	4,0434	9,5196	2,0851
Zhang 2 Orig.	0,9830	<b>2,3357</b>	6,2105	<b>1,1217</b>
Zhang 2 Mod.	2,1553	4,2124	8,9180	1,6289

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 25 – Resultados da segunda fase da validação dos modelos (EMAPN) para tecnologia CIGS.

CIGS				
Modelo	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Silva (PS)	1,6090	3,8083	6,7827	<b>1,1066</b>
Silva (GCPSO)	1,4827	<b>3,4125</b>	6,3639	<b>0,7497</b>
Silva (DSO)	2,5875	5,0281	8,5554	1,6738
Lu	1,5208	<b>2,2106</b>	4,3677	<b>0,6451</b>
Lang Mod.	2,5147	5,0032	14,0234	2,8061
Wang Mod.	2,7885	4,7470	13,8140	2,4434
Zhang 1 Orig.	1,1445	<b>3,4823</b>	6,8532	1,2445
Zhang 2 Orig.	1,4298	3,6832	6,0603	1,1394
Zhang 2 Mod.	2,0362	7,9496	20,5619	2,4296

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 26 – Resultados da segunda fase da validação dos modelos (EMAPN) para tecnologia HIT.

HIT				
Modelo	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão
Silva (PS)	1,0834	3,4878	14,1746	2,1611
Silva (GCPSO)	1,4769	3,4838	31,1342	3,4688
Silva (DSO)	1,5119	4,8160	163,8066	16,1230
Lu	0,6097	<b>1,4750</b>	3,9162	<b>0,6439</b>
Lang Mod.	2,8613	4,5125	5,7653	0,7103
Wang Mod.	2,2559	3,6174	4,6124	<b>0,4486</b>
Zhang 1 Orig.	0,3873	<b>1,0393</b>	3,8157	0,7033
Zhang 2 Orig.	1,6995	2,8919	4,9809	0,6638
Zhang 2 Mod.	0,7692	<b>1,5390</b>	3,2171	<b>0,3951</b>

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 27 – Valores de EMAPN médio utilizados no ranqueamento do desempenho dos modelos por tecnologia.

Modelos	aSi-Micro	aSi-Tandem	CIGS	HIT
Silva (PS)	5,9110	<b>3,5311</b>	3,8083	3,4878
Silva (GCPSO)	6,0878	3,5840	<b>3,4125</b>	3,4838
Silva (DSO)	5,7680	3,8558	5,0281	4,8160
Lu	<b>3,2377</b>	<b>1,9784</b>	<b>2,2106</b>	<b>1,4750</b>
Lang Mod.	<b>4,9293</b>	3,9502	5,0032	4,5125
Wang Mod.	<b>4,2317</b>	4,0434	4,7470	3,6174
Zhang 1	x	x	<b>3,4823</b>	<b>1,0393</b>
Zhang 2 Orig.	19,9562	<b>2,3357</b>	3,6832	2,8919
Zhang 2 Mod.	6,2298	4,2124	7,9496	<b>1,5390</b>

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 28 – Ranque do desempenho dos modelos por tecnologia.

Modelos	aSi-Micro	aSi-Tandem	CIGS	HIT	Ranque Geral
Silva Mod. (PS)	5	<b>3</b>	5	6	4
Silva Mod. (GCPSO)	6	4	<b>2</b>	5	<b>2</b>
Silva Mod. (DSO)	4	5	8	9	7
Lu	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
Lang Mod.	<b>3</b>	6	7	8	6
Wang Mod.	<b>2</b>	7	6	7	5
Zhang 1 Orig.	-	-	<b>3</b>	<b>1</b>	-
Zhang 2 Orig.	8	<b>2</b>	4	4	<b>3</b>
Zhang 2 Mod.	7	8	9	<b>3</b>	8

Fonte: Próprio Autor (2023).

Tabela 29 – Comparação qualitativa do esforço computacional de cada modelo.

Modelo	Esforço computacional
Silva	Médio
Lu	Baixo
Lang	Baixo
Wang	Baixo
Zhang 1	Alto
Zhang 2	Alto

#### 4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, são analisados os resultados obtidos através da aplicação dos MGNL's para as quatro tecnologias estudadas neste trabalho. Primeiramente, são apresentadas as métricas de erro e comparação juntamente com as condições de simulação para os MGNL's avaliados, a fim de normalizar a comparação entre os modelos. Em seguida, para uma seleção específica de curvas I-V, são apresentados os resultados obtidos aplicando os modelos de acordo com seus trabalhos originais e na sequência os resultados obtidos através dos modelos que foram realizadas mudanças paramétricas ou extensões na sua busca paramétrica. Por fim, os MGNL's são avaliados através de um número extenso de curvas para avaliar suas capacidades de generalização.

Foi observado que as extrapolações de parâmetros do modelo SDM para as tecnologias de características elétricas dissimilares às do silício cristalino, como silício amorfo, melhoraram em muito os resultados para todos os modelos analisados. Também foi avaliado o impacto nos resultados através da escolha do algoritmo de otimização utilizada no modelo de Silva. Por fim, foi constatado que para CIGS e HIT, tecnologias de características elétricas próximas às do silício cristalino, a extensão da busca paramétrica pode prejudicar o modelo utilizado ao deixar o problema mais robusto e permitir que o algoritmo de otimização fique preso em mínimos locais, como ocorreu para os modelos de Lang e Wang. Para todas as tecnologias, o modelo de Lu apresentou bons resultados e consistência, sendo ele um modelo mais matemático do que físico de fato. Além do modelo de Lu, nenhum outro se destacou consistentemente entre todas as tecnologias. Notou-se que, para cada tecnologia específica, diferentes modelos apresentam os melhores resultados, sendo necessário escolher o MGNL específico a partir da tecnologia usada na aplicação.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizado uma revisão dos MGNLs baseados em SDM, incluindo uma análise comparativa para avaliar a capacidade desses modelos em representar tecnologias não usuais, como aSi, CIGS e HIT e discutidas metodologias para extensão e extrapolação paramétricas destes modelos com objetivo de aperfeiçoar seus resultados.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, foi aferido que das quatro tecnologias estudadas, CIGS e HIT apresentam características I-V semelhantes às dos módulos de silício cristalino, enquanto aSi-Micro e aSi-Tandem diferem significativamente neste aspecto. Com isso, modelos com configurações de busca paramétrica para módulos de silício cristalino conseguiram apresentar bons resultados para CIGS e HIT, contrastando com os resultados insatisfatórios obtidos para as curvas aSi, além de um modelo não conseguir de forma alguma representar as tecnologias. Entretanto, acerca dos resultados de CIGS e HIT, mesmo apresentando métricas baixas de erro, não estão na mesma ordem de grandeza dos resultados encontrados por (JUNIOR, 2023) para as tecnologias convencionais.

Ao realizar análises similares para os modelos com modificações na sua construção e com busca paramétrica estendida, observou-se uma melhoria significativa na representação das tecnologias aSi, sugerindo que a extrapolação dos parâmetros de busca de fato aproximou o modelo matemático da realidade. Contudo, mesmo com resultados melhores, ainda assim as ordens de grandeza das métricas de erro estão muito aquém das obtidas no trabalho de (JUNIOR, 2023) para as tecnologias clássicas, indicando que apenas a extensão paramétrica não seja suficiente para criar modelos matemáticos realmente precisos para tais tecnologias.

Analisando os resultados para CIGS e HIT, mesmo com métricas de erro mais baixas, eles não alcançam a mesma ordem de grandeza dos resultados encontrados por (JUNIOR, 2023) para tecnologias convencionais. Ao investigar modelos específicos, como o modelo de Silva para CIGS e HIT, observou-se pequenas melhorias na performance, enquanto que para outros modelos, as métricas de erro permaneceram inalteradas em relação aos modelos originais.

Dessa forma, é possível aferir que para os MGNLs baseados no SDM, mesmo adaptando sua construção e estendendo a busca de seus parâmetros físicos para que fiquem mais coesos com a realidade, não foi possível criar modelos matemático altamente precisos. Foi visto que, em (JUNIOR, 2023), os melhores modelos para cada tecnologia convencional obtiveram EMAPN's médios em valores entre 0,52% a 1%. Enquanto para as tecnologias estudadas neste trabalho, os melhores resultados obtidos para cada uma das tecnologias estudadas variaram entre 1,04% a 3,27%.

Conclui-se assim que, com as modificações para os MGNLs apresentados neste trabalho

possibilitaram uma representação mais fidedigna as curvas I-V's e P-V's de módulos de tecnologias como aSi, CIGS e HIT. Entretanto, é notável que existe um vasto campo para melhoria e aperfeiçoamento dos modelos matemáticos para essas tecnologias, até que as mesmas obtenham erros similares às das tecnologias convencionais.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

A seguir, destacam-se algumas sugestões de trabalhos futuros relacionados ao que foi desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso:

- Aplicar as tecnologias estudadas neste trabalho no Modelo Adaptável com Povoamento Superficial (MAPS), desenvolvido em (JUNIOR, 2023), já que este modelo se destacou para as tecnologias convencionais baseadas em c-Si.;
- Analisar quais MGNLs apresentaram melhores resultados para cada etapa da construção do modelo matemático e propor hibridizações de equações e etapas dos mesmos na tentativa de criar modelos novos com resultados superiores;
- Realizar novas investigações focando em MGNLs baseados no circuito elétrico de dois e três diodos, já que o aumento da complexidade destes modelos traz possibilidades de uma melhor representação das tecnologias não convencionais de módulos FV.

## 5.2 PUBLICAÇÕES NA ÁREA

Durante o desenvolvimento e estudo desse trabalho, houve a publicação dos seguintes trabalhos na área relacionada, sendo cinco publicações em anais de congresso e uma publicação em periódicos de revista. Sendo esses trabalhos:

- CAVALCANTE, V. M.; **FERNANDES, T. A.**; FREITAS, R. A.; AMÂNCIO, N. A. M. S.; BRADASCHIA, F.; CAVALCANTI, M. C.. *Impact of Post-NREL Database Technologies for Photovoltaic Modules in NREL-Based Mathematical Models*. 2023 8th IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC) / 17th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2023.
- CAVALCANTE, V. M.; **FERNANDES, T. A.**; FREITAS, R. A.; AMÂNCIO, N. A. M. S.; BRADASCHIA, F.; CAVALCANTI, M. C.. *Effect of Optimization Algorithm Choice on Photovoltaic Module Modeling Performance*. 2023 8th IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC) / 17th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2023.

- SILVA, F. R. A. ; CAVALCANTE, V. M. ; **FERNANDES, T. A.**; BRITO, M. E. C. ; BRADASCHIA, F.. *Estudo Dinâmico da Arquitetura de Otimizadores Solares de Potência Completa em Série Sujeitos a Limitações dos Conversores*. XXIV Congresso Brasileiro de Automática, 2022. Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Automática, 2022.
- **FERNANDES, T. A.**; Ferraz, A. M. S.; CAVALCANTE, V. M.; BARBOSA, E. D.; CAVALCANTI, M. C.; LINS, Z. D.. *Analysis of Energy Yield in Bifacial PV Plants as a Function of Installation Factors Through the View Factor Model*. 2023 8th IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC) / 17th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2023. (Apresentação de trabalho)
- CAVALCANTE, V. M.; **FERNANDES, T. A.**; FREITAS, R. A.; AMÂNCIO, N. A. M. S.; BRADASCHIA, F.; CAVALCANTI, M. C.. *Performance Evaluation of Optimization Techniques for Photovoltaic Module Parameter Extraction Using the Single Diode Model*. Workshop On Communication Networks and Power Systems, 2023;. (Apresentação de trabalho)
- M.C. JUNIOR, VALDEMAR M.; **FERNANDES, TIAGO ALVES**; BARBOSA, EDUARDO JOSÉ; NETO, RAFAEL CAVALCANTI; BRADASCHIA, FABRÍCIO; CABRAL CAVALCANTI, MARCELO. *STATIC AND DYNAMIC EVALUATION OF COMMERCIAL SOLAR EMULATOR SOURCES AND THEIR IMPACTS ON MPPT STUDIES*. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA (IMPRESSO), v.29, p.1-13,2024.

No momento da submissão deste trabalho, havia também dois trabalhos em processo de revisão, sendo o submetido a SOBRAEP um artigo convidado para participar de uma edição especial da revista a partir do artigo "*Effect of Optimization Algorithm Choice on Photovoltaic Module Modeling Performance*" ter sido considerado um dos melhores do congresso. Os dois trabalhos são:

- JPV - "Adaptive Population Surface Global Nonlinear Model Approach for Photovoltaic Modules"
- SOBRAEP - "Impact of Optimization Algorithm Choice on Nonlinear Global Model for Energy Generation Forecasting"

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. *Energia solar supera eólica e vira 2ª maior fonte do país; veja desafios para 2023*. 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-supera-eolica-e-vira-2a-maior-fonte-do-pais-veja-desafios-para-2023/>>.
- AL-HATTAB, M.; MOUDOU, L.; KHENFOUCH, M.; BAJJOU, O.; CHRAFIH, Y.; RAHMANI, K. Numerical simulation of a new heterostructure cigs/gase solar cell system using scaps-1d software. *Solar Energy*, v. 227, p. 13–22, 2021. ISSN 0038-092X.
- ALY, S. P.; AHZI, S.; BARTH, N. An adaptive modelling technique for parameters extraction of photovoltaic devices under varying sunlight and temperature conditions. *Applied Energy*, v. 236, p. 728–742, 2019. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918318543>>.
- BASTOS, F. *Retrospectiva ESG 2023: o ano da virada para a energia solar no Brasil*. 2023. Disponível em: <<https://exame.com/esg/retrospectiva-esg-2023-o-ano-da-virada-para-a-energia-solar-no-brasil/>>.
- BOUABDELLI, M. W.; ROGTI, F.; MAACHE, M.; RABEHI, A. Performance enhancement of cigs thin-film solar cell. *Optik*, Elsevier, v. 216, p. 164948, 2020.
- BOUBAKEUR, M.; AISSAT, A.; Ben Arbia, M.; MAAREF, H.; VILCOT, J. Enhancement of the efficiency of ultra-thin cigs/si structure for solar cell applications. *Superlattices and Microstructures*, v. 138, p. 106377, 2020. ISSN 0749-6036. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S074960361931540X>>.
- BOUBAKEUR, M.; AISSAT, A.; Ben Arbia, M.; MAAREF, H.; VILCOT, J. Enhancement of the efficiency of ultra-thin cigs/si structure for solar cell applications. *Superlattices and Microstructures*, v. 138, p. 106377, 2020. ISSN 0749-6036. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S074960361931540X>>.
- CHEN, T.; AN, Y.; HENG, C. K. A review of building-integrated photovoltaics in singapore: Status, barriers, and prospects. *Sustainability*, v. 14, n. 16, 2022. ISSN 2071-1050.
- EPE. *MS Windows NT Kernel Description*. 2023. Disponível em: <<http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/ben/>>.
- FAHIM, S. R.; HASANIEN, H. M.; TURKY, R. A.; ALEEM, S. H. E. A.; CÁLASAN, M. A comprehensive review of photovoltaic modules models and algorithms used in parameter extraction. *Energies*, v. 15, n. 23, 2022. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8941>>.
- FAHR, S.; ROCKSTUHL, C.; LEDERER, F. Improving the efficiency of thin film tandem solar cells by plasmonic intermediate reflectors. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, v. 8, n. 4, p. 291–296, 2010. ISSN 1569-4410. Taconá Photonics 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569441010000234>>.

- FAHR, S.; ROCKSTUHL, C.; LEDERER, F. Improving the efficiency of thin film tandem solar cells by plasmonic intermediate reflectors. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, v. 8, n. 4, p. 291–296, 2010. ISSN 1569-4410. Taconá Photonics 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569441010000234>>.
- GHOLAMI, A.; AMERI, M.; ZANDI, M.; GHOACHANI, R. G.; PIERFEDERICI, S.; KAZEM, H. A. Step-by-step guide to model photovoltaic panels: An up-to-date comparative review study. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 12, n. 4, p. 915–928, 2022.
- HANEEFA, S.; KARMALKAR, S. An analytical method to extract the physical parameters of a solar cell from four points on the illuminated  $j-v$  curve. *Electron Device Letters, IEEE*, v. 30, p. 349 – 352, 05 2009.
- INTELLIGENCE, M. Tamanho do mercado solar fotovoltaico de filme fino e análise de participação – tendências e previsões de crescimento (2023 – 2028). 2021. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/global-thin-film-solar-collector-market-industry>>.
- JUNIOR, A. J. D. N. *Contribuição à Modelagem de Módulos Fotovoltaicos e Proposta de uma Técnica Híbrida de Seguimento do Ponto de Máxima Potência com Estimador de Irradiância*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- JUNIOR, V. M. C. *Análise comparativa de modelos globais não-lineares para módulos fotovoltaicos*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.
- KEPPNER, H.; MEIER, J.; TORRES, P.; FISCHER, D.; SHAH, A. Microcrystalline silicon and micromorph tandem solar cells. *Applied physics A*, Springer, v. 69, p. 169–177, 1999.
- KHURSHEED, M.; Nadeem Khan, M. F.; Ali, G.; Khan, A. K. A review of estimating solar photovoltaic cell parameters. In: *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- KUHN, T. E.; ERBAN, C.; HEINRICH, M.; EISENLOHR, J.; ENSSLEN, F.; NEUHAUS, D. H. Review of technological design options for building integrated photovoltaics (bipv). *Energy and Buildings*, v. 231, p. 110381, 2021. ISSN 0378-7788.
- LANG, Z.; ZHANG, Y. Parameter identification and performance estimation for pv modules based on reduced forms model. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 12, p. 053703, 09 2020.
- LIU, W.; LI, H.; QIAO, B.; ZHAO, S.; XU, Z.; SONG, D. Highly efficient cigs solar cells based on a new cigs bandgap gradient design characterized by numerical simulation. *Solar Energy*, v. 233, p. 337–344, 2022. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X22000652>>.
- LU, H.; ZHANG, Y.; HAO, P.; MA, J.; ZHONG, H.; GU, T.; YANG, M.; ZHANG, L. Output performance prediction of pv modules based on power-law model from manufacturer datasheet. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 14, 04 2022.

- Marcelo Villalva. *Conheça as células fotovoltaicas de heterojunção*. 2019. [Online; accessed 22-January-2024]. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/conheca-as-celulas-fotovoltaicas-de-heterojuncao/>>.
- Marcelo Villalva. *Filmes finos CIGS: uma alternativa ao silício cristalino*. 2020. [Online; accessed 22-January-2024]. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>>.
- MARION, W.; ANDERBERG, A.; DELINE, C.; GLICK, S.; MULLER, M.; PERRIN, G.; RODRIGUEZ, J.; RUMMEL, S.; TERWILLIGER, K.; SILVERMAN, T. J. User's manual for data for validating models for pv module performance. 4 2014. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1130632>>.
- MATHEW, D.; RANI, C.; MUTHU, R.; WANG, Y.; BINNS, R.; BUSAWON, K. Wind-driven optimization technique for estimation of solar photovoltaic parameters. *IEEE Journal of Photovoltaics*, PP, p. 1–9, 12 2017.
- MAVROMATAKIS, F.; VIGNOLA, F.; MARION, B. Low irradiance losses of photovoltaic modules. *Solar Energy*, v. 157, p. 496–506, 2017. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17307430>>.
- MORALES-ACEVEDO, A. Modeling solar cells: A method for improving their efficiency. *Materials Science and Engineering: B*, v. 177, n. 16, p. 1430–1435, 2012. ISSN 0921-5107. Advances in Semiconducting Materials. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510712000566>>.
- MORALES-ACEVEDO, A.; HERNÁNDEZ-COMO, N.; CASADOS-CRUZ, G. Modeling solar cells: A method for improving their efficiency. *Materials Science and Engineering: B*, v. 177, n. 16, p. 1430–1435, 2012. ISSN 0921-5107. Advances in Semiconducting Materials. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510712000566>>.
- OHMUKAI, M.; TSUYOSHI, A. Comparison between amorphous and tandem silicon solar cells in practical use. *Journal of Power and Energy Engineering*, Scientific Research Publishing, v. 5, n. 4, p. 9–14, 2017.
- OLIVEIRA, J. *Carro movido a energia solar entra para o Livro dos Recordes*. 2023. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/carros/carro-movido-a-energia-solar-entra-para-o-livro-dos-records-234770/>>.
- PIMENTEL, D. D. O. *Estimação de Parâmetros de Módulos Fotovoltaicos Utilizando Métodos de Otimização Baseado em Metaheurística*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- REN21. *RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT*. [S.l.]: REN21 RENEWABLES NOW, 2022.
- SALHI, B. The photovoltaic cell based on cigs: Principles and technologies. *Materials*, v. 15, n. 5, 2022. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/15/5/1908>>.
- SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BARENDAR, P. Recent advancement in bipv product technologies: A review. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 140, p. 188–195, 2017.

SILVA, E. *Proposta de um modelo global não-linear para caracterização do comportamento elétrico de células fotovoltaicas*. Tese (Tese) — Universidade Federal de Pernambuco, abril 2019.

SINGH, P.; RAVINDRA, N. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 101, p. 36–45, 2012. ISSN 0927-0248. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812000931>>.

TRETER, M.; MICHELS, L. Métodos de aquisição experimental de curvas i-v de arranjos fotovoltaicos: Uma revisão. In: *11th Seminar on Power Electronics and Control - SEPOC 2018 - 91601*. Santa Maria, RS, Brasil: [s.n.], 2018.

TSAI, C.-Y.; TSAI, C.-Y. Tandem amorphous/microcrystalline silicon thin-film solar modules: Developments of novel technologies. *Solar Energy*, v. 170, p. 419–429, 2018. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18304936>>.

VERDUCI, R.; ROMANO, V.; BRUNETTI, G.; NIA, N. Y.; CARLO, A. D.; D'ANGELO, G.; CIMINELLI, C. Solar energy in space applications: Review and technology perspectives. *Advanced Energy Materials*, v. 12, n. 29, p. 2200125, 2022.

WANG, M.; XIAOYUAN, X.; ZHENG, Y.; HAN, W. An online optimization method for extracting parameters of multi-parameter pv module model based on adaptive levenberg-marquardt algorithm. *Energy Conversion and Management*, v. 245, p. 114611, 2021. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421007871>>.

Wikipedia contributors. *Amorphous silicon* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2023. [Online; accessed 22-January-2024]. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Amorphous\\_silicon&oldid=1186700754](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Amorphous_silicon&oldid=1186700754)>.

WOLF, S. D.; DESCOEUDRES, A.; HOLMAN, Z. C.; BALLIF, C. High-efficiency silicon heterojunction solar cells: A review. *green*, De Gruyter, v. 2, n. 1, p. 7–24, 2012.

WRONSKI, C. R.; PEARCE, J.; DENG, J.; VLAHOS, V.; COLLINS, R. W. Intrinsic and light induced gap states in a-Si:H materials and solar cells-effects of microstructure. *Thin Solid Films*, Elsevier, v. 451-452, p. 470–475, mar. 2004. Disponível em: <<https://hal.science/hal-02120528>>.

YAMAUCHI, Y.; TAKATSUKA, H.; KAWAMURA, K.; YAMASHITA, N.; FUKAGAWA, M.; TAKEUCHI, Y. Development of a-si/microcrystalline-si tandem-type photovoltaic solar cell. *Mitsubishi Juko Giho*, v. 42, n. 3, p. 126–129, 2005.

YOSHIKAWA, K.; KAWASAKI, H.; YOSHIDA, W.; IRIE, T.; KONISHI, K.; NAKANO, K.; UTO, T.; ADACHI, D.; KANEMATSU, M.; UZU, H. et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nature energy*, Nature Publishing Group, v. 2, n. 5, p. 1–8, 2017.

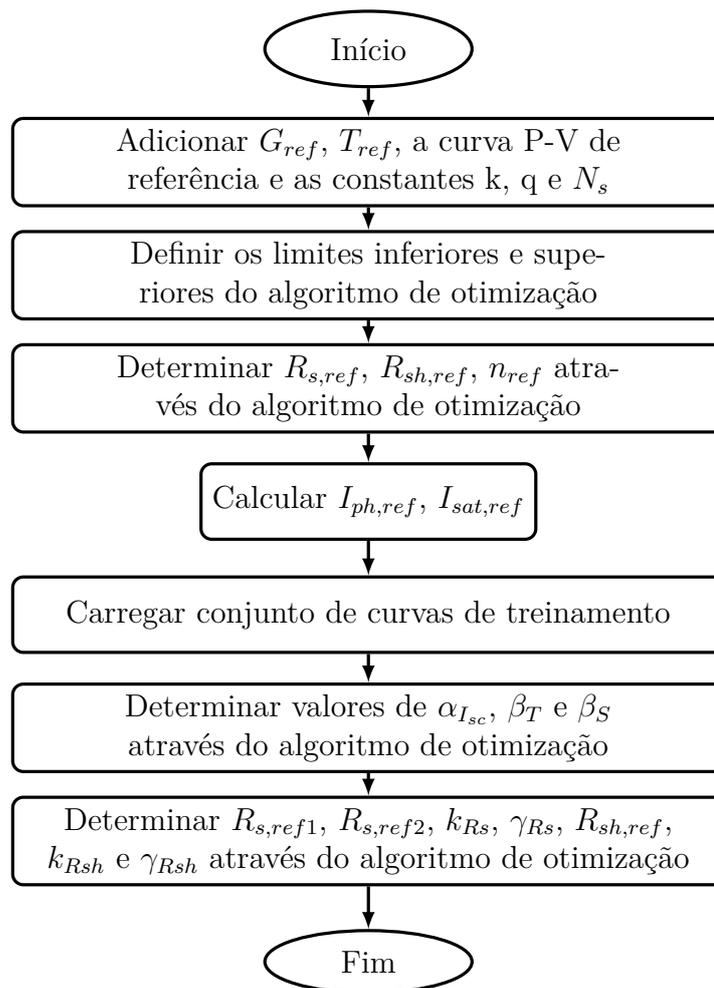
ZHANG, Y.; HAO, P.; LU, H.; MA, J.; YANG, M. Modelling and estimating performance for pv module under varying operating conditions independent of reference condition. *Applied Energy*, v. 310, p. 118527, 2022. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922000162>>.

ZHANG, Y.; HAO, P.; LU, H.; GU, T.; YANG, M. A novel method for performance estimation of photovoltaic module without setting reference condition. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 134, p. 107439, 2022. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521006785>>.

## APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS DOS MGNLS UTILIZADOS NO TRABALHO

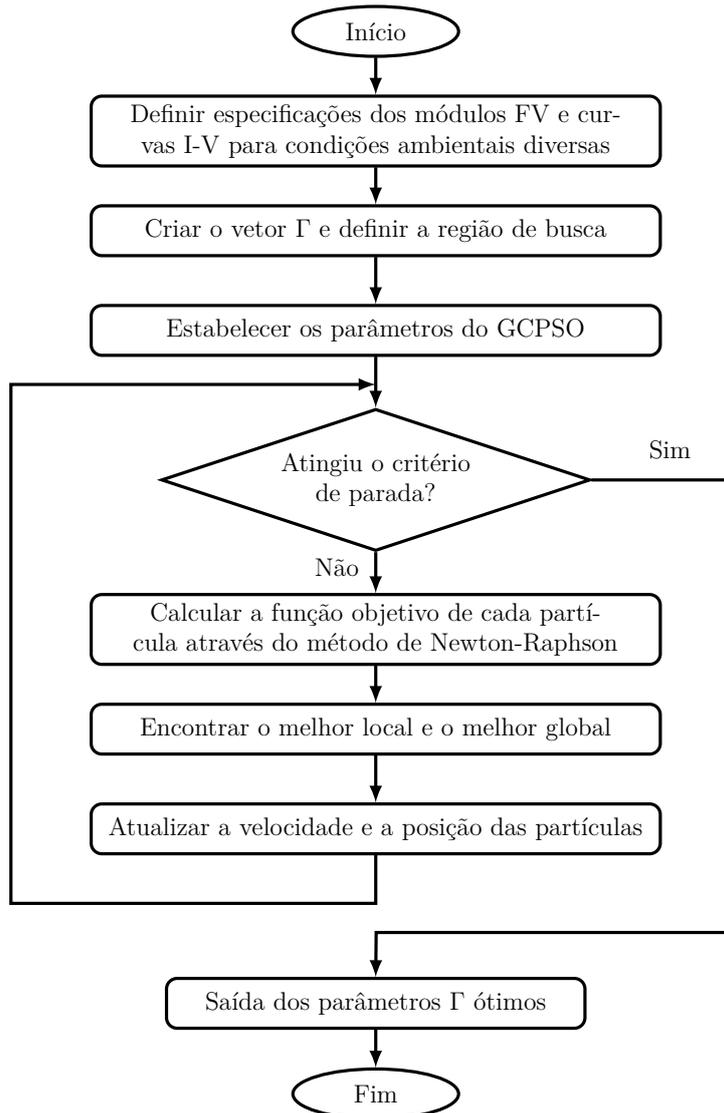
Os fluxogramas fornecidos neste apêndice são disponibilizados com o objetivo de auxiliar o leitor a entender as tomadas de decisão e etapas de cada MGNL utilizado neste trabalho.

Figura 18 – Fluxograma do modelo de Silva.



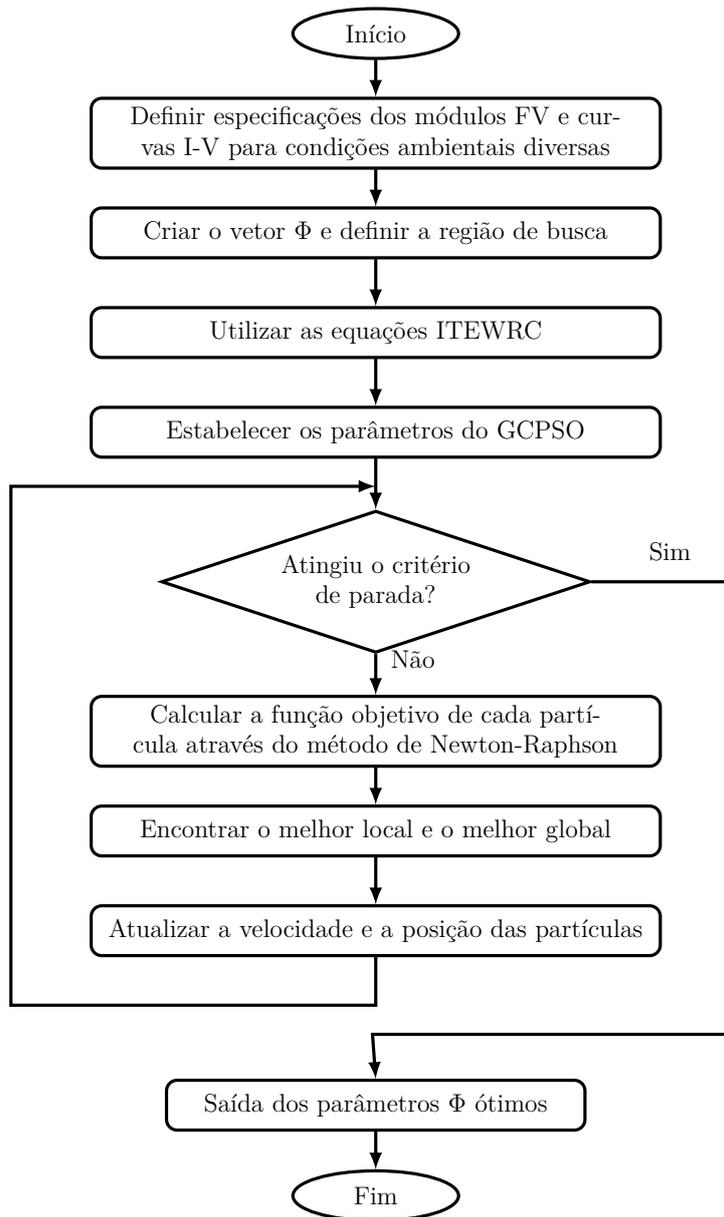
Fonte: Adaptado de (JUNIOR, 2023).

Figura 19 – Fluxograma do modelo de Zhang 1.



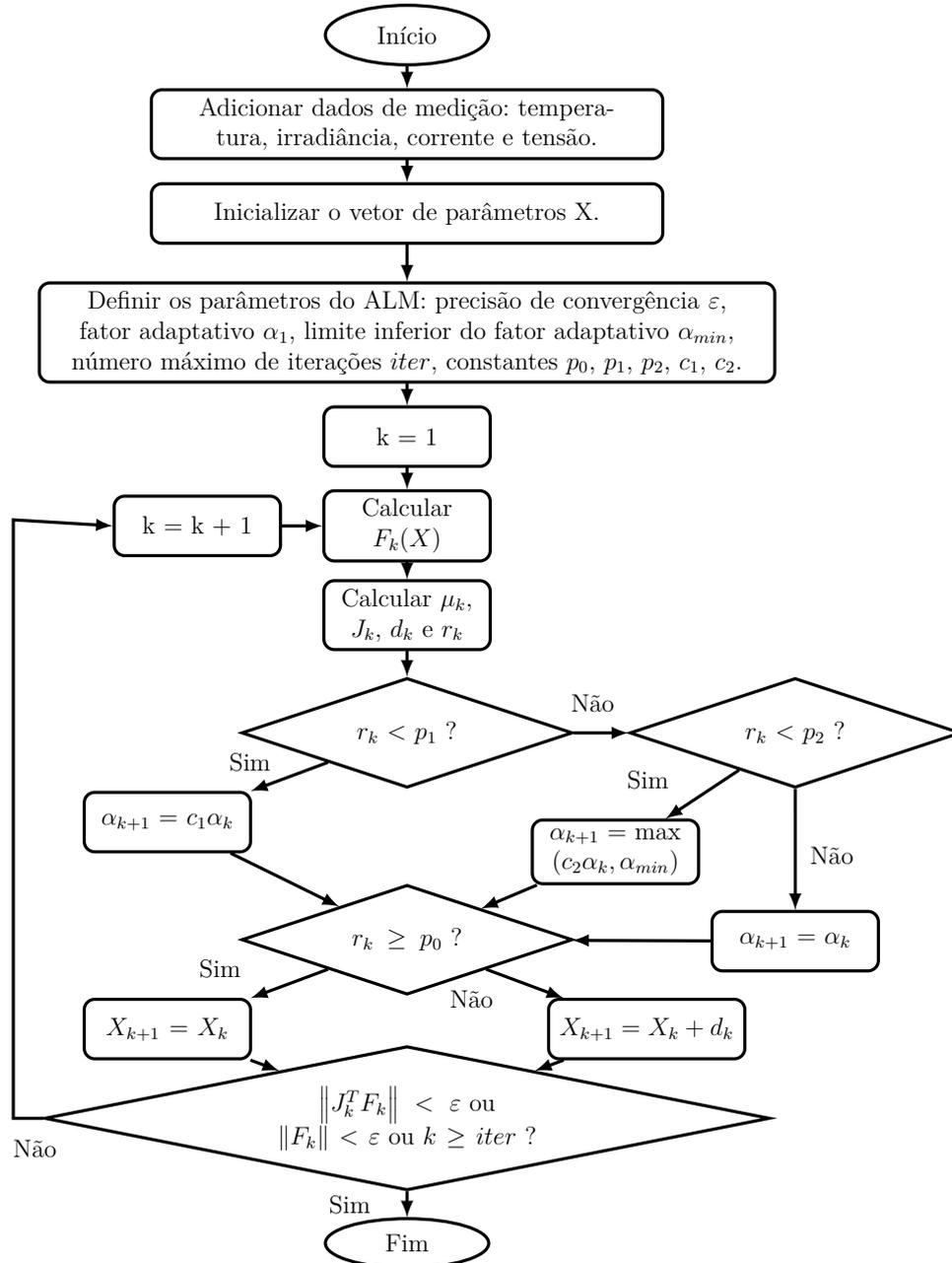
Fonte: JUNIOR (2023).

Figura 20 – Fluxograma do modelo de Zhang 2.



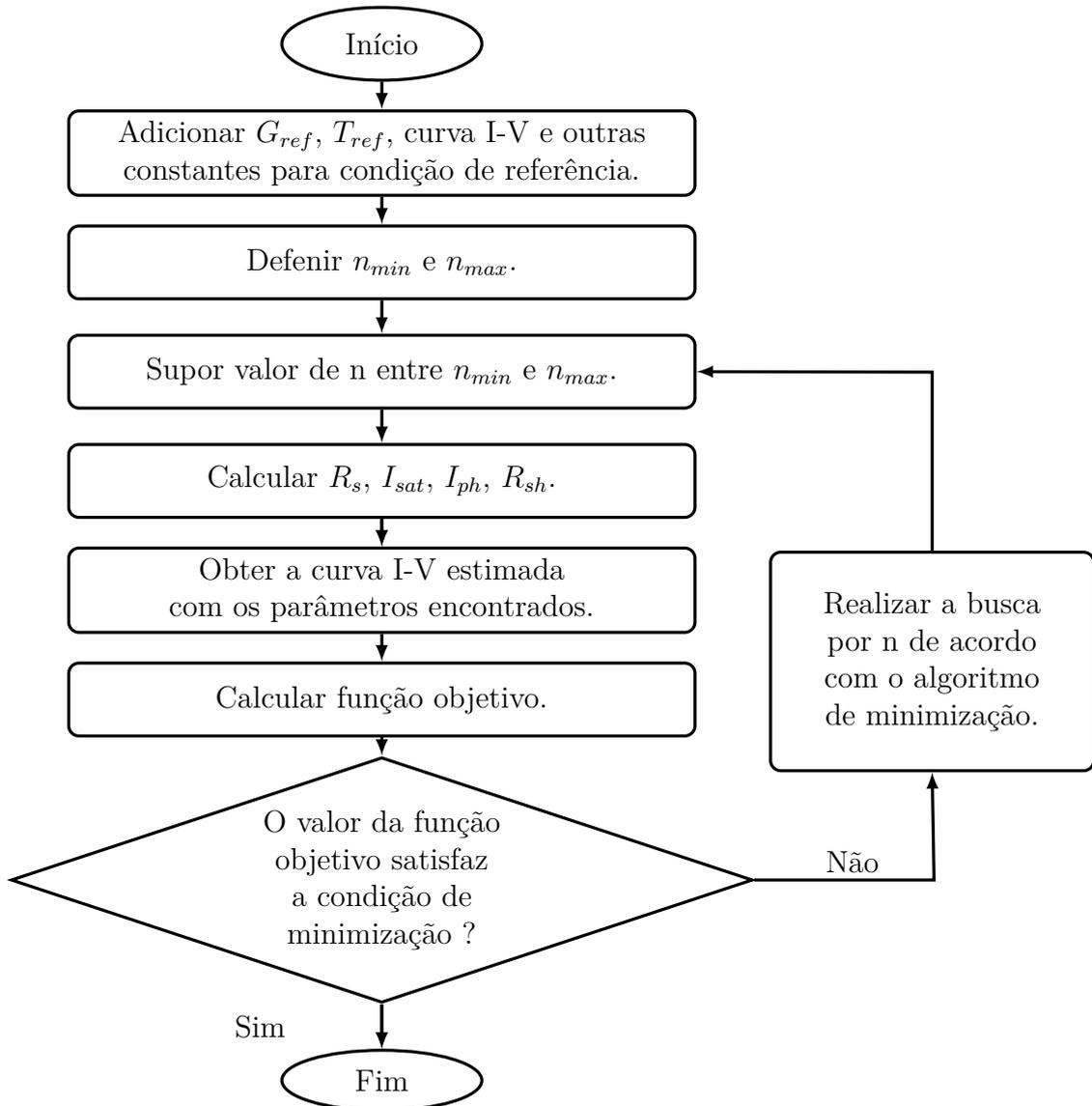
Fonte: JUNIOR (2023).

Figura 21 – Fluxograma do modelo de Wang.



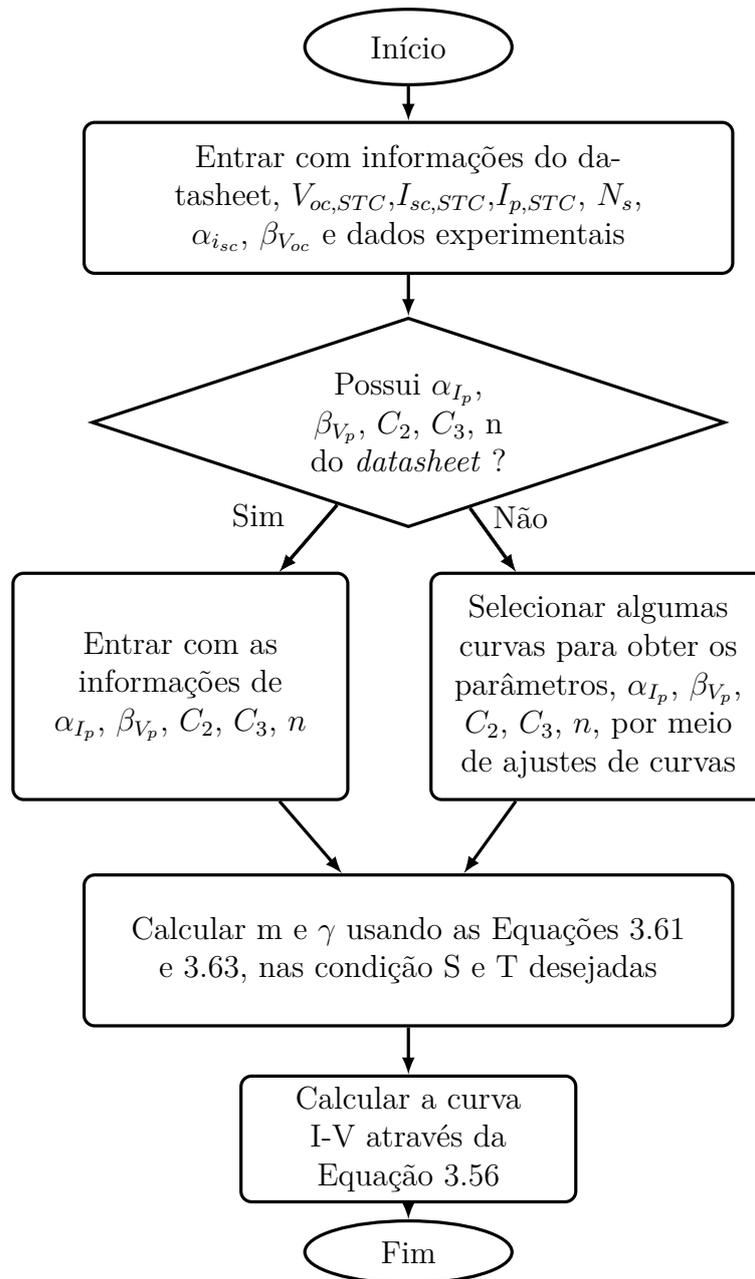
Fonte: Adaptado de JUNIOR (2023).

Figura 22 – Fluxograma do modelo de Lang.



Fonte: Adaptado de JUNIOR (2023).

Figura 23 – Fluxograma para obtenção do modelo de Lu.



Fonte: JUNIOR (2023).