

Universidade Federal De Sergipe

CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE EM
DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE IMAGEM
DE ELETROLUMINESCÊNCIA RESIDUAL

José Raymundo De Alcântara Neto

José Raymundo de Alcântara Neto

Me.

UFS

2025

2025



CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE EM DISPOSITIVOS
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE IMAGEM DE ELETROLUMINESCÊNCIA
RESIDUAL

José Raymundo De Alcântara Neto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PROEE, da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel

São Cristóvão-SE, Brasil

Agosto de 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA-PROEE

TERMO DE APROVAÇÃO

“Caracterização da resistência série em dispositivos fotovoltaicos através de imagem de eletroluminescência residual”

Discente:

José Raymundo de Alcântara Neto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada pela banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira (PROEE/UFS)
Presidente

Prof. Dr. Eduardo Oliveira Freire (PROEE/UFS)
Examinador Interno

Prof. Dr. José Aguiar dos Santos Junior (DMEC/UFS)
Examinador Externo

José Raymundo de Alcântara Neto
Discente

Cidade Universitária “*Prof. José Aloísio de Campos*”, 27 de agosto de 2025.

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

A347c Alcântara Neto, José Raymundo de.
Caracterização da resistência série em dispositivos
fotovoltaicos através de imagem de eletroluminescência residual /
José Raymundo de Alcântara Neto; orientador Douglas Bressan
Riffel. – São Cristóvão, SE, 2025.
103 f.: il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal de Sergipe, 2025.

1. Engenharia elétrica. 2. Semicondutores. 3. Sistemas de energia
fotovoltaica. 4. Resistência de materiais. 5. Células fotoelétricas. I.
Riffel, Douglas Bressan, orient. II. Título.

CDU 621.316.8

Resumo da Dissertação apresentada ao PROEE/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre (Me.)

CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE EM DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE IMAGEM DE ELETROLUMINESCÊNCIA RESIDUAL

José Raymundo de Alcântara Neto

Agosto de 2025

Orientador: Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel

Programa: Engenharia Elétrica

Esta dissertação propõe e valida uma metodologia para caracterizar a resistência série (R_s) de dispositivos fotovoltaicos (DFVs) a partir de imagens de eletroluminescência (EL) residual, obtidas com uma câmera DSLR modificada. O sistema experimental utilizou uma Canon EOS Rebel SL3 com filtros IR-cut e de correção de cores removidos, permitindo captar radiação no espectro visível e infravermelho próximo. As imagens foram adquiridas em câmara escura, com foco otimizado pela métrica Tenengrad e parâmetros de ISO e tempo de exposição ajustados para maximizar a relação sinal-ruído. As imagens em 10% de I_{SC} e I_{SC} passaram por pré-processamento e foram empregadas para estimar a resistência série global do módulo (RS_{mod}). Como referência, aplicaram-se duas metodologias convencionais: uma baseada em parâmetros de catálogo do fabricante e outra na inclinação da curva I-V em V_{oc} . O valor de RS_{mod} obtido por EL (5,204 Ω) diferiu em menos de 3% do valor via *datasheet* (5,076 Ω), enquanto o método da inclinação da curva I-V resultou em 7,740 Ω . A partir desses valores, geraram-se mapas espaciais de R_s que apresentaram alta similaridade estrutural (SSIM $\approx$ 0,9998) e reconstrução global com erro inferior a 11%. A análise estatística identificou defeitos correspondentes a 5,6% da área útil. Conclui-se que a técnica proposta é eficaz e acessível, permitindo quantificar e mapear a resistência série com precisão e potencial para diagnóstico e inspeção de DFVs.

Palavras-chave: eletroluminescência residual; dispositivos fotovoltaicos; resistência série; mapeamento da resistência série; aquisição de imagens de baixo custo.

Abstract of Dissertation presented to PROEE/UFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master

SERIES RESISTANCE CHARACTERIZATION IN PHOTOVOLTAIC DEVICES THROUGH RESIDUAL ELECTROLUMINESCENCE IMAGING

José Raymundo de Alcântara Neto

August/2025

Advisor: Professor Douglas Bressan Riffel, Ph.D

Department: Electrical Engineering

This dissertation proposes and validates a methodology to characterize the series resistance (R_s) of photovoltaic devices (PVDs) from residual electroluminescence (EL) images obtained with a modified DSLR camera. The experimental setup employed a Canon EOS Rebel SL3 with the IR-cut and color-correction filters removed, allowing the capture of radiation in the visible and near-infrared spectra. Images were acquired in a dark chamber, with focus optimized by the Tenengrad metric and ISO/exposure parameters adjusted to maximize the signal-to-noise ratio. The images acquired at 10% I_{SC} and I_{SC} were pre-processed and used to estimate the global series resistance of the module (RS_{mod}). As references, two conventional methods were applied: one based on manufacturer datasheet parameters and another using the slope of the I–V curve at V_{oc} . The RS_{mod} value obtained from EL (5.204 Ω) differed by less than 3% from the datasheet value (5.076 Ω), while the I–V slope method yielded 7.740 Ω . Based on these values, spatial R_s maps were generated, showing high structural similarity (SSIM $\approx$ 0.9998) and global reconstruction error below 11%. Statistical analysis identified defects corresponding to 5.6% of the active area. The proposed technique proves to be efficient and accessible, enabling accurate quantification and mapping of series resistance with potential applications in photovoltaic device diagnostics and inspection.

Keywords: residual electroluminescence; photovoltaic devices; series resistance; series-resistance mapping; low-cost image acquisition.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xv
LISTA DE SIMBOLOS.....	xvii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
Capítulo 2.....	4
Objetivos	4
2.1 Objetivo Geral	4
2.2 Objetivos Específicos.....	4
Capítulo 3.....	6
Fundamentação Teórica	6
3.1 Física dos Semicondutores	6
3.1.1 Dopagem “n”	7
3.1.2 Dopagem “p”	7
3.1.3 Junção p-n.....	7
3.1.4 Absorção de Luz	9
3.2 Células Fotovoltaicas.....	9
3.2.1 Recombinação.....	10
3.2.2 Resistências Série e Paralelo.....	11
3.2.3 Modelo de Um Diodo.....	11
3.2.4 Curva Característica I-V	12
3.3 Eletroluminescência	13
3.3.1 Detecção de Defeitos.....	14
3.3.2 Defeitos	15
Capítulo 4.....	16
Revisão Bibliográfica	16
Capítulo 5.....	21

Material e Métodos	21
5.1 Sistema de Aquisição de Imagens de EL	21
5.2 Modificação do Sistema Óptico para Captação de EL Residual	22
5.2 Câmara Escura	24
5.3 Fonte CC e DFV.....	25
5.3.1 Delineamento Experimental.....	27
5.4 Registro da Imagem	27
5.5 Ensaio de EL	28
5.6 Determinação do Foco.....	29
5.7 - Relação Tempo de Exposição X ISO	30
5.8 Pré-Processamento	30
5.8.1 Correção de Efeitos de Tempo Único (STE).....	31
5.8.2 Correção de Fundo.....	32
5.8.3 Correção de Campo Plano.....	33
5.8.4 Correção de Artefatos	34
5.9 Segmentação.....	36
5.10 Estimativa da Resistência Série RS do Módulo Por Eletroluminescência	37
5.10.1 Descrição Geral de Potthoff <i>et al.</i> [10]	37
Relação Tensão Local X Luminescência Local.....	37
Tensão de Operação no Interconector a Partir da Tensão Local.....	38
Pressupostos do Modelo	38
Tensão de Operação da Célula na Região de Maior Luminescência e Tensão Total no Módulo	39
Impacto da Resistencia Externa na Distribuição de Tensão do Módulo	39
Fator de Calibração e Resistência Série do Módulo.....	40
5.10.2 Adaptação do Modelo	40
5.11 Estimativa da Distribuição Espacial da Resistência Série Utilizando Eletroluminescência Residual.....	41
5.11.1 Descrição Geral de Kropp <i>et al.</i> [26]	41
Simplificação do Modelo de Um Diodo.....	42
Resistencia Série Local de Referência	42
Resistencia Série Local	43
Desvio Estatístico	44
5.11.2 Adaptação do Modelo	44

5.12 Comparativo de Métodos para Resistências Séries do Módulo Fotovoltaico	45
5.12.1 Estimativa de RS_{mod} a Partir de Dados de Datasheet.....	46
5.12.2 – Estimativa de RS_{mod} Por Meio da Inclinação da Curva I–V na Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}).....	46
Capítulo 6.....	48
Resultados e Discussões	48
6.1 Determinação do Foco das Imagens de Eletroluminescência.....	49
6.2 Relação ISO × Tempo de Exposição × SNR50:	52
6.2.1 Ajuste Polinomial	53
6.2.2 Síntese dos Resultados	54
6.3 Resultados do Pré-Processamento das Imagens de EL.....	54
6.3.1 Imagem Bruta (Figura 5.9).....	54
6.3.2 Correção de Efeitos de Tempo Único – STE (Figura 5.10)	55
6.3.3 Correção de Fundo (Figura 5.11).....	55
6.3.4 Correção de Campo Plano – Flat-Field (Figura 5.12).....	55
6.3.5 Correção de Artefatos Residuais – Filtro Mediano (Figura 5.13)	55
6.3.6 Remoção de Ruído por Médias Não Locais – NLMD (Figura 5.14).....	56
6.4 Resultados da Segmentação das Células Fotovoltaicas.....	56
6.5 Resultados das Imagens de Eletroluminescência Utilizadas no Modelo	57
6.5.1 Imagem de EL a 0,1 I_{sc}	57
6.5.2 Imagem de EL a I_{sc}	58
6.6 Estimativa da Resistência Série do Módulo (RS_{mod}) Por Eletroluminescência	59
6.7 Estimativa da Resistência Série do Módulo Fotovoltaico Através de Métodos Convencionais	60
6.7.1 Estimativa de RS_{mod} a Partir de Dados de Datasheet.....	60
6.7.2 Estimativa de RS_{mod} por Meio da Inclinação da Curva I–V na Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	61
6.8 Comparação Entre Métodos de Obtenção do RS_{mod}	63
6.9 Resistência Série Resolvida Espacialmente Através da EL Residual	64
6.9.1 Mapas de Resistência Série Absoluta	65
6.9.2 Mapas de Resistência Série Relativa	68
6.9.3 Estimativa da Resistência Série por Célula e Total a partir da Segmentação Espacial das Resistências Locais	70

6.9.4 Detecção de Defeitos Através de Limiar de Resistências	74
Capítulo 7.....	78
Conclusão	78
7.1 Trabalhos Futuros	78
Capítulo 8.....	80
Referências Bibliográficas	80
Capítulo 9.....	83
Apêndice A – Produção Científica.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Formação da Junção p-n. Fonte: Adaptada de [11].....	8
Figura 3.2: Estrutura e Funcionamento da Célula Solar. Fonte: Adaptada de [12].....	10
Figura 3.3: Circuito Equivalente do Modelo de 1 Diodo. Fonte: [13].....	12
Figura 3.4: Curva Característica I-V de Dispositivos Fotovoltaicos. Fonte: Adaptada de [14].....	13
Figura 3.5: Esquemático da EL. Fonte: Produzido pelos autores.....	14
Figura 3.6: Espectros de Emissão (c-Si) e Absorção (CCD) Relativos. Fonte: Adaptada de [15].....	15
Figura 5.1: Câmera Canon EOS Rebel SL3, também conhecida como Canon EOS Rebel 250D. Fonte: [27].....	22
Figura 5.2: Desmontagem Canon EOS Rebel SL3. Figura 5.2 (a) Placa mãe após remoção da carcaça. Figura 5.2 (b) Circuitos do Sensor após remoção da placa mãe. Figura 5.2 (c) Filtros justapostos ao sensor em moldura. Fonte: Produzida pelo autor.....	23
Figura 5.3: Gráfico de Transmissão vs Comprimento de Onda do filtro de espectro total Astronomik MC-Clear Glass. Fonte: [28].....	23
Figura 5.4: Câmara Escura aberta em vista frontal (a) e fechada em vista diagonal superior (b). Suporte para câmeras da Câmara Escura (c). Fonte: Produzida pelo autor.....	24
Figura 5.5: Adaptador para Canon SL3 com suporte de fixação da câmera. Fonte: Produzida pelo autor.....	25
Figura 5.6: Fonte CC Agilent E3631A. Fonte: [29].....	26
Figura 5.7: Módulo Kmaes KM(5)P e etiqueta de dados. Fonte: Produzida pelo autor.....	26

Figura 5.8: Canon SL3 sobre suporte de câmeras (a). Câmera e DFV centralizados e em posição relativa normal (b-c). Fonte: Produzida pelo autor.....	27
Figura 5.9: Imagem de EL antes das etapas de pré-processamento. Fonte: Produzida pelo autor.....	31
Figura 5.10: Imagem de EL resultante da correção de STE. Fonte: Produzida pelo autor.....	32
Figura 5.11: Imagem de EL após correções de STE e fundo. Fonte: Produzida pelo autor.....	33
Figura 5.12: Imagem de EL após correções de STE, fundo e campo plano. Fonte: Produzida pelo autor.....	34
Figura 5.13: Imagem de EL após correções de STE; fundo; campo plano; e filtro mediano. Fonte: Produzida pelo autor.....	35
Figura 5.14: Imagem de EL após correções de STE; fundo; campo plano; filtro mediano; e NLMD. Fonte: Produzida pelo autor.....	35
Figura 5.15: Imagem 8bits de Eletroluminescência a 1 Isc, pré-processada e segmentada. Fonte: Produzida pelo autor.....	36
Figura 6.1: Comparativo da mesma região de pixels em imagens de Eletroluminescência com diferente foco manual. Figura 6.1 (c) apresenta percepção visual de melhor nível de foco relativo entre as imagens. Fonte: Produzida pelo autor.....	49
Figura 6.2: Comparativo da mesma região de pixels em imagens de DFV em espectro visível com mesmo setup e foco manual diferente. Fonte: Produzida pelo autor.....	50
Figura 6.3: Tenengrad de imagens de Eletroluminescência com mesmo setup e foco manual diferente. Fonte: Produzida pelo autor.....	50
Figura 6.4: Tenengrad de imagens de DFV em espectro visível com mesmo setup e foco manual diferente. Fonte: Produzida pelo autor.....	51
Figura 6.5: Superfície de Ajuste Polinomial ISO X Tempo de Exposição X SNR50. Fonte: Produzida pelo autor.....	53
Figura 6.6: Imagem 8bits de Eletroluminescência a 0,1 Isc, pré-processada e segmentada. Fonte: Produzida pelo autor.....	58
Figura 6.7: Imagem 8bits de Eletroluminescência a 1 Isc, pré-processada e segmentada. Fonte: Produzida pelo autor.....	59

Figura 6.8: Curvas I-V e P-V ajustadas através de dados experimentais (datasheet) do módulo Komaes KM(P)5. Fonte: Produzida pelo autor.....	61
Figura 6.9: Curva I-V ajustada através de interpolação cúbica suavizada a partir de dados experimentais de módulo Komaes KM(P)5. Fonte: Produzida pelo autor.....	62
Figura 6.10: Mapa de Resistência Série Absoluta com $RS_{mod} = 5,076 \Omega$ Obtido Através de Dados de Datasheet. Fonte: Produzida pelo autor.....	65
Figura 6.11: Mapa de Resistência Série Absoluta com $RS_{mod} = 5,204 \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.....	65
Figura 6.12: Mapa de Resistência Série Absoluta com $RS_{mod} = 7,740 \Omega$ Obtido Através da Inclinação da Curva I-V no Ponto da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}). Fonte: Produzida pelo autor.....	66
Figura 6.13: Distribuição dos Mapas de Resistência Série Locais. Fonte: Produzida pelo autor.....	67
Figura 6.14: Mapa de Resistência Série Relativa Percentual com $RS_{mod} = 5,076 \Omega$ Obtido Através de Dados de Datasheet. Fonte: Produzida pelo autor.....	68
Figura 6.15: Mapa de Resistência Série Relativa Percentual com $RS_{mod} = 5,204 \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.....	69
Figura 6.16: Mapa de Resistência Série Relativa Percentual com $RS_{mod} = 7,740 \Omega$ Obtido Através da Inclinação da Curva I-V no Ponto da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}). Fonte: Produzida pelo autor.....	69
Figura 6.17: Células Segmentadas por Índices. Fonte: Produzida pelo autor.....	71
Figura 6.18: Resistência Série Equivalente Por Célula com $RS_{mod} = 5,076 \Omega$ Obtido Através de Dados de Datasheet. Fonte: Produzida pelo autor.....	72
Figura 6.19: Resistência Série Equivalente Por Célula com $RS_{mod} = 5,204 \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.....	72
Figura 6.20: Resistência Série Equivalente Por Célula com $RS_{mod} = 7,740 \Omega$ Obtido Através da Inclinação da Curva I-V no Ponto da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}). Fonte: Produzida pelo autor.....	72
Figura 6.21: Segmentação de Resistência Série Relativa Percentual por Faixas com $RS_{mod} = 5,204 \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.....	73

Figura 6.22: Mapa de De Segmentação de Defeitos Por Limiar de Resistência Série Local com $RS_{mod} = 5,076 \, \Omega$ Obtido Através de Dados de Datasheet. Fonte: Produzida pelo autor.....75

Figura 6.23: Mapa de De Segmentação de Defeitos Por Limiar de Resistência Série Local com $RS_{mod} = 5,204 \, \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.....75

Figura 6.24: Mapa de De Segmentação de Defeitos Por Limiar de Resistência Série Local com $RS_{mod} = 7,740 \, \Omega$ Obtido Através da Inclinação da Curva I-V no Ponto da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}). Fonte: Produzida pelo autor.....76

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1: Relação Parâmetros-Intensidade Média-SNR50. Fonte: Produzida pelo autor.....	52
Tabela 6.2: Coeficientes de ajuste polinomial. Fonte: Produzida pelo autor.....	53
Tabela 6.3: Parâmetros resultantes pelo método de Villalva <i>et al.</i> em [33]. Fonte: Produzida pelo autor.....	61
Tabela 6.4: Grau de suavização do método UnivariateSpline do módulo Python <code>scipy.interpolate</code> e RS_{cel} resultante. Fonte: Produzida pelo autor.....	63
Tabela 6.5: Comparação entre Mapas de Resistência Série Absoluta. Fonte: Produzida pelo autor.....	66
Tabela 6.6: Comparação entre Mapas de Resistência Série Relativa Percentual. Fonte: Produzida pelo autor.....	70
Tabela 6.7: RS_{mod} Reconstituído a Partir de Mapas de R_5 Locais. Fonte: Produzida pelo autor.....	73
Tabela 6.8: Métricas de erro entre os valores estimados e os reconstituídos de resistência série do módulo (RS_{mod}). Fonte: Produzida pelo autor.....	74
Tabela 6.9: Limiar de Segmentação de Defeitos por RS_{mod}	75
Tabela 6.10: Quantitativo de Defeitos: Mapa de Segmentação de Defeitos Por Limiar de Resistência Série Local. Fonte: Produzida pelo autor.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS

CC	Corrente Contínua
CCD	Dispositivos de Carga Acoplada
CMOS	Semicondutores de Metal-Óxido Complementar
DFV	Dispositivo Fotovoltaico
EL	Eletroluminescência
EQE_{pv}	Eficiência Quântica Espectral Externa
EQE_{LED}	Eficiência Quântica Espectral de LED
I_1	Imagem um
I_2	Imagem dois
I_{BG}	Imagem de Fundo
I_{dif}	Imagem da Diferença
I_{median}	Filtro Mediano de Vizinhaça 3
I_{min}	Imagem dos Mínimos Locais
I_{BG}	Imagem Corrigida de Fundo
I_{FF}	Imagem Corrigida Campo Plano
I_{STE}	Imagem Corrigida de Efeito de Tempo Único
$I_{STE-BG-FF}$	Imagem Corrigida de STE, Fundo e Campo Plano
ISO	Sensibilidade do Sensor da Câmera
LBIC	Corrente Induzida por Feixe de Luz Espectroscópico
LED	Diodo Emissor de Luz
MAE	Erro Absoluto Médio
MAPE	Erro Percentual Absoluto Médio
MSE	Erro Quadrático Médio

M _{STE}	Máscara de Efeito de Tempo Único
NLF	Função Nível de Ruído
NLMD	Remoção de Ruídos por Médias Não Locais
PID	Degradação Induzida pelo Potencial
RMS	Erro Quadrático Médio
SNR ₅₀	Relação Sinal-Ruído
SSIM	Índice de Similaridade Estrutural
STE	Efeitos de Tempo Único
UR	Umidade Relativa

LISTA DE SIMBOLOS

α	Coeficiente de Absorção
$\Delta V_i(x,y)$	Variação de Tensão Através da Resistência Série Local
$\Delta V_{i, \text{ref}}(x,y)$	Variação de Tensão Através da Resistência Série Local de Referência
ΔW	Variação de Energia
λ	Comprimento de Onda
μ	Mobilidade dos Carregadores
ρ_{cu}	Resistividade do Cobre
ρ_{sn}	Resistividade do Estanho
τ	Tempo de Vida dos Portadores Minoritários
$\Phi^i(x_{\text{max}}^i)$	Luminescência Na Região De Maior Luminescência da Célula “i”
$\Phi_{\text{ref}}(x)$	Emissão Luminescente Local de Referência
$\Phi(x)$	Emissão Luminescente Local
a	Coeficiente de Inclinação
A_c	Área de Contato por Interconector
A_{cu}	Área Transversal da Fita de Cobre
A_{sn}	Área Transversal da Fita de Estanho
b	Intercepto
C	Fator de Calibração
$C(x)$	Fator de Calibração Local
$c\text{-Si}$	Silício Cristalino
C_0	Velocidade da Luz no Vácuo
d_{rs}	Desvio Estatístico da Resistência Série

D	Constante de Difusão
E	Irradiância Incidente
E(x)	Irradiância
f	Frequência
F(x)	Campo Elétrico
FF	Fator de Forma
G _x	Gradiente Horizontal
G _y	Gradiente Vertical
h	Constante de Planck
I	Corrente que Flui Através do Dispositivo Fotovoltaico
I _D	Corrente no Diodo
I _{EL}	Corrente de EL
I _L	Corrente Fotogerada
I _{MP}	Corrente de Máxima Potência
I _{SC}	Corrente de Curto-Circuito
I ₀	Corrente de Saturação
i(x)	Corrente Local
J _{i,c} Pixel “i”	Densidade de Corrente que Flui Através do Circuito da Região do
J _D	Densidade de Corrente de Difusão
J _F	Densidade de Corrente de Campo
J ₀	Densidade de Corrente de Saturação
k	Resistência de Contato Específica
K	Constante de Boltzman
L	Comprimento de Difusão do Portador Minoritário
l	Comprimento Médio do Interconector
m	Coefficiente de Inclinação
N	Número de Células no Módulo
N _{cel}	Número de Células Fotovoltaicas em Série
N _f	Número de Interconectores por Célula

n_{id}	Fator de Idealidade do Diodo
$n(x)$	Concentração de Carregadores
n^+	Dopagem “n” Forte
P_{MP}/MPP	Ponto de Máxima Potência
$P_{MPdatasheet}$	Ponto de Máxima Potência Indicado pelo Fabricante
q	Carga Elementar
r	Coefficiente de Correlação Linear de Pearson
$r_{1,j,i}$	Número Aleatório 1 no Intervalo $[0,1]$
$r_{2,j,i}$	Número Aleatório 2 no Intervalo $[0,1]$
R_c	Resistência de Contato
R_{cal}	Resistência de Calculada
R_{cel}	Resistência de Série Estimada de uma Célula Comercial
$r_{i,ref}$	Resistência Série Local de Referência
$r_{i,s}$	Resistência Série Local da Região do Pixel “i”
$R_{int}(x)$	Resistência Série Interna Local
$R_{ext}(x)$	Resistência Série Externa Local
$R_{ext}^i(x)$	Resistência Série Externa Local da Célula “i”
R_f	Resistência de Fita
$r_{k,s}$	Resistência Série Local Média da Célula Livre de Defeitos
R_p	Resistência Paralelo
R_s	Resistência Série
RS_{mod}	Resistência Série do Módulo
RS_{cel}	Resistência Série da Célula
R_{sheet}	Resistência de Folha
$r_{s,sd}$	Resistência Série Média da Célula Livre de Defeitos
S	Velocidade de Recombinação da Superfície Traseira
T	Temperatura em Kelvin
T_c	Limiar de Correção
t_{exp}	Tempo de Exposição do Obturador

V	Tensão de Operação
$V(x)$	Tensão de Junção Local
V_i	Tensão Aplicada a Junção da Região do Pixel “i”
$V_{i,c}$	Tensão Aplicada ao Polos do Circuito da Região do Pixel “i”
V_D	Tensão de Difusão
V_{MP}	Tensão de Máxima Potência
V_{OC}	Tensão de Circuito Aberto
V_{op}^i	Tensão de Operação na Célula “i”
V_T	Tensão Térmica
x_p	Profundidade de Penetração
$X_{j,k,i}$	Candidato Atual População
$X'_{j,k,i}$	Candidato da População Resultante da Iteração
$X_{j,best,i}$	Melhor Candidato da População
$X_{j,worst,i}$	Pior Candidato da População

Capítulo 1

Introdução

O mundo enfrenta um cenário marcado pelo crescimento da população, pela elevação do consumo energético e pela limitação das fontes fósseis, além dos riscos envolvidos na produção de energia nuclear. Diante desses desafios, as energias renováveis emergem como soluções promissoras, com a energia fotovoltaica ocupando posição de destaque ao permitir a conversão direta da luz solar em eletricidade.

O elemento básico de um sistema fotovoltaico é a célula solar, sendo o silício cristalino (c-Si) o material mais utilizado para sua fabricação e representando uma das principais aplicações optoeletrônicas das junções p-n [1]. Essas células, embora amplamente empregadas, apresentam baixa densidade energética e são suscetíveis a falhas que podem reduzir a corrente de curto-circuito (I_{SC}) de uma célula e, conseqüentemente, comprometer o desempenho de todo o módulo fotovoltaico [2].

Quando diretamente polarizadas, as células de c-Si comportam-se como diodos emissores de luz (LEDs), emitindo radiação entre 900 e 1300 nm, fenômeno conhecido como eletroluminescência (EL) [3]. A literatura mostra que a intensidade da emissão eletroluminescente está diretamente relacionada à distribuição de portadores minoritários na célula [4].

Würfel et al. [5] explicam que a corrente fotogerada (I_L) depende do comprimento de difusão dos portadores minoritários (L) e da profundidade de penetração dos fótons (x_p). De forma inversa, na polarização direta, fótons gerados em profundidades maiores que L são reabsorvidos, não contribuindo para a emissão luminescente. Assim, existe uma correspondência entre a emissão eletroluminescente e o comportamento elétrico da célula.

Além disso, defeitos capazes de causar efeitos térmicos negativos e reduzir a vida útil dos módulos também podem ser identificados por EL [6]. Entre esses defeitos, destacam-se as microfissuras e a Degradação Induzida por Potencial (PID) [7]. Microfissuras podem surgir por estresse mecânico, inclusive durante o transporte, e serem agravadas pelo envelhecimento [8]. A PID, por sua vez, pode causar perdas superiores a 30% na potência de módulos de silício [9].

A técnica de EL é amplamente utilizada por fabricantes para obter parâmetros como o tempo de vida dos portadores minoritários (τ), o comprimento de difusão (L) e a resistência série (R_S), por meio de correlação determinística de imagens de EL [3].

Potthoff et al. [10] destacam que a análise eletroluminescente permite quantificar o efeito de defeitos nos dispositivos fotovoltaicos, reforçando sua importância para diagnóstico e controle de qualidade.

Embora a EL seja consolidada na indústria, especialmente para inspeção de falhas e estimativa de parâmetros como R_S , sua aplicação convencional depende de sistemas profissionais de alto custo, baseados em câmeras científicas sensíveis ao infravermelho próximo, instrumentação dedicada e ambientes controlados. Esses equipamentos podem custar dezenas de milhares de euros [2], dificultando sua adoção por empresas de menor porte, integradores, laboratórios regionais, equipes de inspeção em campo e até mesmo pequenas linhas de produção. Portanto, apesar de ser uma técnica robusta, a EL tradicional não constitui, por padrão, uma solução de baixo custo.

A resistência série (R_S), em particular, é um parâmetro fundamental para o desempenho dos módulos fotovoltaicos. Valores elevados de R_S reduzem a potência máxima, diminuem a eficiência, intensificam perdas ôhmicas e podem indicar problemas de soldagem, microfissuras, falhas de metalização ou degradação acelerada.

Na indústria, conhecer a distribuição espacial de R_S é estratégico para detectar defeitos antes da laminação, reduzir retrabalho, ajustar processos e garantir uniformidade entre células. Para empresas integradoras e instaladores, medir R_S auxilia na verificação da conformidade de módulos recebidos e na detecção de falhas que afetariam o desempenho em campo. Para inspeções em usinas solares, estimativas de R_S permitem identificar problemas de degradação e antecipar ações corretivas. Dessa forma, o tema apresenta alto nível de maturidade tecnológica, com clara demanda de aplicação prática fora do ambiente laboratorial.

Por outro lado, métodos tradicionais para caracterizar R_S exigem curvas I–V obtidas com traçadores específicos, simuladores solares e instrumentação de contato, elevando o custo e dificultando a implementação em inspeções rotineiras. Assim, torna-se relevante desenvolver abordagens não invasivas, de baixo custo e com capacidade de mapear R_S espacialmente, algo que a EL pode oferecer, desde que se supere a barreira do custo dos sistemas profissionais.

Diante dessas limitações, este trabalho propõe a caracterização da resistência série em dispositivos fotovoltaicos utilizando EL residual capturada com uma câmera DSLR modificada, oferecendo uma alternativa acessível, de instrumentação simplificada, não invasiva e aplicável em diferentes contextos de diagnóstico e controle de qualidade. A proposta combina sensibilidade espectral residual com processamento analítico para estimar a R_S global e espacial, contribuindo para ampliar o acesso a ferramentas de análise avançada e reduzir custos operacionais.

Além desta Introdução, o trabalho está organizado nas seguintes seções: Objetivos, contemplando objetivos gerais e específicos; Fundamentação Teórica com os fundamentos essenciais; Revisão Bibliográfica, abordando o estado da arte; Material e Métodos, detalhando materiais, métodos e infraestrutura; Resultados e Discussões;

Conclusão, com síntese e perspectivas futuras; e as seções de Referências Bibliográficas e Apêndice.

Capítulo 2

Objetivos

Nesta seção, serão apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é desenvolver e validar uma metodologia de caracterização da resistência série em dispositivos fotovoltaicos utilizando imagens de eletroluminescência residual obtidas com sistema de aquisição de baixo custo.

2.2 Objetivos Específicos

De forma a alcançar o objetivo geral, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Revisar a literatura referente às técnicas de eletroluminescência e aos métodos de caracterização da resistência série em dispositivos fotovoltaicos, com ênfase em abordagens convencionais e alternativas de baixo custo.
2. Implementar um sistema de aquisição de baixo custo para ensaios de eletroluminescência, empregando uma câmera DSLR modificada e uma câmara escura dedicada.
3. Realizar ensaios de EL em diferentes níveis de corrente de curto-circuito (I_{SC}), a fim de analisar o comportamento luminescente sob distintas condições de polarização.
4. Aplicar etapas de pré-processamento e processamento das imagens adquiridas, visando a extração de informações úteis à quantificação da resistência série.
5. Estimar a resistência série global do módulo fotovoltaico a partir das imagens de EL, utilizando um modelo analítico.

6. Estimar a resistência série global por métodos convencionais, incluindo (i) parâmetros fornecidos pelo fabricante e (ii) a inclinação da curva característica I–V na região próxima à tensão de circuito aberto.
7. Obter mapas espaciais de resistência série local a partir das estimativas globais e de modelo de mapeamento baseado em eletroluminescência.
8. Correlacionar os mapas de resistência série obtidos a partir da resistência série global estimada por EL com aqueles em que a resistência série global foi estimada através de especificações do fabricante e a partir da curva característica I–V, avaliando sua concordância espacial e estatística.
9. Identificar e segmentar regiões com possíveis defeitos nos mapas de resistência série local, por meio de limiar estatístico aplicado às distribuições obtidas.

Com o intuito de conceber o formato em que se tem tratado o tema, postos os objetivos, uma fundamentação teórica será então apresentada a seguir.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

3.1 Física dos Semicondutores

O modelo atômico de Bohr afirma que a transferência de um elétron de uma camada eletrônica para outra acompanha a absorção ou a emissão de radiação eletromagnética. De forma que a variação de energia (ΔW) é definida pela frequência dessa radiação (Equação 3.1),

$$\Delta W = hf \quad (3.1),$$

em que h é a constante de Planck ($\approx 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$) e f é a frequência da radiação eletromagnética absorvida ou emitida.

Tal frequência, f , também determina o comprimento de onda (λ) da radiação (Equação 3. 2),

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (3. 2),$$

em que C_0 a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

Já falando-se em camadas de energia ou bandas de energia, define-se que elas representam todos os estados de energia permitidos para um elétron. Assim, a camada de valência é a que representa o nível energético mais alto em um átomo e é imprescindível no relacionamento elétrico de um corpo sólido. Mais externa à camada de valência está a camada ou banda proibida (*bandgap*), na qual sua largura define a energia de ionização necessária para o elétron se mover até a banda de condução, tornando-se um elétron livre.

No silício cristalino (c-Si), material semiconductor indireto mais comum na fabricação de células solares, a energia de ionização, ou seja, a energia necessária para excitar um elétron de sua camada de valência para a camada de condução é de aproximadamente 1,12 eV.

As ligações covalentes de um átomo de silício, elemento do grupo IV da tabela periódica, representam uma estrutura regular e periódica. Essa estrutura varia através de dois fenômenos, a recombinação e a geração dos pares elétrons-lacunas. De forma generalizada, esses fenômenos são explicados nos semicondutores pela incidência de fótons (partícula de luz de comprimento de onda específico), absorção da energia dos mesmos e geração de elétrons livres; e, respectivamente, retorno dos elétrons à ligação covalente e a emissão de radiação eletromagnética (emissão de fótons).

Aqui, a ideia de uma carga positiva (lacuna) se dá pelo espaço vazio que surge com a liberação do elétron na ligação covalente antes existente. O que acontece é que essa lacuna na estrutura é ocupada pelos elétrons dos átomos mais próximos, evidenciando um movimento de carga positiva à medida que a lacuna vai se movimentando na estrutura.

3.1.1 Dopagem “n”

A dopagem do tipo “n” é caracterizada quando um átomo do grupo V da tabela periódica, ou seja, com cinco elétrons em sua camada de valência, é adicionado na estrutura do semicondutor. Isso cria um nível de energia abaixo da banda de condução, reduzindo consideravelmente a energia de ionização.

Assim, a estrutura passa então a ter um elétron livre a temperatura ambiente. Os elétrons são definidos nessas condições como portadores ou carregadores majoritários. O átomo estrangeiro da dopagem é denominado átomo doador de elétron.

3.1.2 Dopagem “p”

No caso da dopagem do tipo “p”, um átomo do grupo III da tabela periódica, ou seja, com três elétrons na camada de valência é adicionado ao semicondutor. Nesse caso o elétron mais próximo da estrutura tenta equilibrar esse átomo estrangeiro ocupando a sua ligação incompleta. Dessa forma, uma lacuna é gerada na estrutura. O átomo estrangeiro é denominado átomo aceitador de elétron. E os elétrons livres nessa região passam a ser chamados de carregadores minoritários.

3.1.3 Junção p-n

A combinação das duas dopagens previamente descritas resulta na formação da junção p-n (Figura 3.1). Inicialmente cada região de dopagem se encontra eletricamente neutra. O elétron livre da região de dopagem “n” neutralizando o átomo doador (carga positiva fixa) e a lacuna da região de dopagem “p” neutralizando o átomo aceitador (carga negativa fixa).

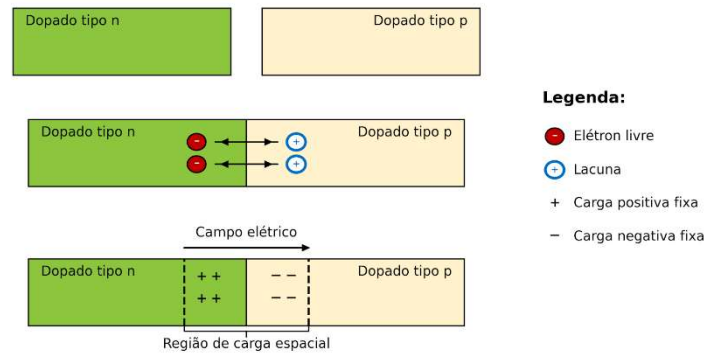


Figura 3.1: Formação da Junção p-n. Fonte: Adaptada de [11].

No entanto, a estrutura térmica fornece energia na direção da equalização da concentração de carregadores, e o excesso de elétrons livres do lado “n” da junção difunde para o lado “p” devido ao gradiente de concentração. Da mesma forma o excesso de lacunas do lado “p” difunde para o lado “n” (Figura 3.1). A taxa de movimento de cargas desse fenômeno é denominada corrente de difusão e a densidade da mesma é J_D (Equação 3.3),

$$J_D = -q D \frac{dn(x)}{dx} \quad (3.3),$$

em que q é a carga elementar ($\approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$); D é a constante de difusão; e $n(x)$ a concentração de carregadores.

Com esse evento citado, a neutralidade estabelecida nas regiões deixa de existir, ou seja, as cargas fixas deixam de ser compensadas tanto no lado “p” como no lado “n” da junção. Dessa forma, o excesso dessas cargas fixas não compensadas cria um campo elétrico na junção das regiões. Tal campo, por sua vez, tenta reestabelecer o equilíbrio de cargas inicial à medida que conduz os elétrons da região “p” para a região “n” e as lacunas da região “n” para a região “p”. A densidade dessa taxa de movimento de cargas é chamada de densidade de corrente de campo (J_F) ou deriva (Equação 3.4).

$$J_F = q n(x) \mu F(x) \quad (3.4),$$

em que μ é a mobilidade de carregadores e $F(x)$ o campo elétrico.

O campo elétrico da junção atua sobre os carregadores até que então é estabelecido um equilíbrio entre as correntes de difusão e de deriva. Passa a existir uma região de carga espacial ou de depleção na região da junção (Figura 3.1), que causa uma diferença de potencial entre as fronteiras dela. Essa diferença de potencial é chamada tensão de difusão V_D .

Na Figura 3.1, observa-se a formação da junção, com a corrente de difusão atuando inicialmente sobre os portadores e, posteriormente, evidenciando-se a região de depleção formada.

Quando a junção p-n é polarizada diretamente, ou seja, quando o terminal positivo da fonte de tensão CC é conectado ao lado “p” da junção e o terminal negativo da fonte é conectado ao lado “n” da junção, os elétrons são conduzidos pela fonte de tensão para o lado “n” da junção, onde esses neutralizam as cargas fixas positivas desse lado da junção. O contrário acontece com as lacunas e as cargas fixas negativas da região “p”. Naturalmente a região de carga espacial é reduzida até que totalmente desfeita quando a tensão aplicada atinge um nível igual ou superior a V_D .

O equilíbrio na junção (Equação 3.5) é um sistema de equações diferenciais que resulta na equação de Shockley para o diodo Ideal (Equação 3.6).

$$q n(x) \mu F(x) = -q D \frac{dn(x)}{dx} \quad (3.5).$$

$$I_D = I_0 (e^{V/V_T} - 1) \quad (3.6),$$

em que I_D é a corrente no diodo; I_0 é a corrente de saturação; V é a tensão de operação ou tensão nos terminais da célula; e V_T a tensão térmica (Equação 3.7),

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3.7),$$

sendo k a constante de Boltzman ($\approx 8,62 \times 10^{-5}$ eV/K) e T a temperatura em Kelvin.

3.1.4 Absorção de Luz

Dados os aspectos físicos e características elétricas da junção p-n, outra característica importante é a absorção de luz no semicondutor. De uma forma geral, para a absorção da luz no semicondutor, os fótons incidentes precisam de uma energia maior que a de ionização. Assim, a irradiância incidente na célula solar afunda no semicondutor devido a esse fator de absorção e seu curso é descrito por uma função exponencial decadente (Equação 3.8),

$$E(x) = E e^{-\alpha x} \quad (3.8),$$

em que x é a profundidade em relação a espessura; E é a irradiância incidente quando $x = 0$; e α o coeficiente de absorção.

Por sua vez, α está relacionado com a profundidade de penetração (x_p), que é uma grandeza que descreve que a intensidade da luz decaiu aproximadamente 37% (Equação 3.9) e varia com o comprimento de onda e o material em questão.

$$x_p = \frac{1}{\alpha} \quad (3.9).$$

3.2 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são constituídas por uma junção p-n com densidades de dopagem assimétricas. Essa junção consiste em uma base p e um emissor n^+ de dopagem

forte. Além disso, acima do emissor, a célula conta com um revestimento antirreflexivo, com dedos de contatos (metalização) e barras coletoras de corrente (metalização). Abaixo da base está o contato traseiro, como visto na Figura 3.2.

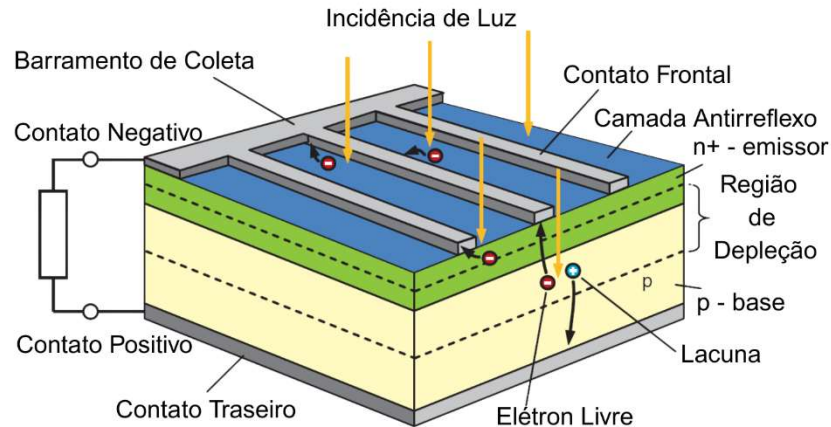


Figura 3.2: Estrutura e Funcionamento da Célula Solar. Adaptada de [12].

Na Figura 3.2 é apresentada, além da estrutura descrita anteriormente, a representação de seu funcionamento. Quando os fótons são absorvidos, geram-se pares elétron–lacuna que podem ser conduzidos aos contatos das células pelo campo elétrico da junção. Essa condução ocorre com os elétrons sendo direcionados da base para o emissor e as lacunas no sentido contrário, conforme indicado na Figura 3.2. Caso os portadores não sejam reabsorvidos no percurso, o fluxo de carga resultante é denominado fotocorrente ou corrente fotogerada (I_L).

3.2.1 Recombinação

A reabsorção de carregadores excedentes pelas ligações covalentes da estrutura da célula solar é denominada recombinação. Os carregadores excedentes, gerados pela absorção de fótons, dependem da profundidade de absorção dos fótons para que não sejam recombinados. Isso porque esses carregadores têm um determinado tempo no qual percorrem uma distância no semicondutor até recombinar (tempo de vida, τ). Essa distância percorrida até a recombinação é denominada comprimento de difusão dos portadores minoritários (L) (Equação 3.10),

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (3.10),$$

em que D é a constante de difusão.

A região da célula de menor probabilidade de recombinação é a região de carga espacial, visto que, nessa região, o campo da junção atua fortemente na condução dos carregadores.

Além disso, algumas situações facilitam a recombinação. Por exemplo, átomos estrangeiros criam armadilhas ou centros de recombinação conhecidas com camadas de passo potencial. Essas camadas de passo potencial situam-se abaixo da camada de condução. Elas reduzem a energia de ionização da ligação existente e facilitam o retorno dos carregadores à camada de valência. Adicionalmente imperfeições na estrutura também aumentam a taxa de recombinação.

Essa recombinação de imperfeições da estrutura e de dopagem citada é denominada recombinação não radiativa. A recombinação não radiativa é o mecanismo de recombinação dominante nos semicondutores com energia de ionização indireta como o silício cristalino e é característico pela emissão de fótons e fônons. Estes últimos, os fônons, que são considerados caracteres de partícula de alto momento e baixa energia das oscilações da estrutura do cristal e são fundamentais na geração de pares elétron-lacuna em semicondutores indiretos.

Um outro método de recombinação é o radiativo. A recombinação radiativa não envolve imperfeições e é dominante nos semicondutores com energia de ionização direta como os diodos emissores de luz (LEDs). Esse fenômeno é o responsável pela emissão de fótons no nível de energia de ionização do semicondutor em questão.

3.2.2 Resistências Série e Paralelo

Ao modelar células fotovoltaicas, é necessário considerar os fatores associados às perdas parasitas, entre os quais se destacam as resistências série (R_S) e paralelo (R_P). A resistência série é composta pelas contribuições das interconexões entre células, dos metais de contato superior e inferior, da interface entre os metais e o silício, além da resistência intrínseca ao volume da célula através do diodo. Essa resistência provoca queda de tensão ao longo do percurso da corrente, afetando diretamente a tensão de operação na região de junção.

Por outro lado, a redução da resistência paralelo decorre da existência de caminhos alternativos para a corrente fotogerada (I_L), resultando em sua deriva para fora da junção. Esse efeito diminui a corrente efetivamente disponível e, conseqüentemente, reduz a tensão de operação da célula fotovoltaica.

3.2.3 Modelo de Um Diodo

O modelo de um diodo é amplamente utilizado para a modelagem de células fotovoltaicas. Ele parte do princípio da equação do diodo ideal de Shockley (3.6), com a adição de uma fonte de corrente paralela ao diodo e considerando-se as resistências série e paralelo (3.11),

$$I = I_L - I_0 e^{\frac{q(V+IR_S)}{n_{id}kT}} - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (3.11),$$

em que n_{id} é o fator de idealidade do diodo e descreve o quão próximo o diodo segue a equação do diodo ideal devido a recombinações. Na Figura 3.3 é apresentado o circuito equivalente de uma célula solar real, conforme o modelo de um diodo. Os parâmetros do modelo (Equação 3.11) são mostrados de forma esquemática.

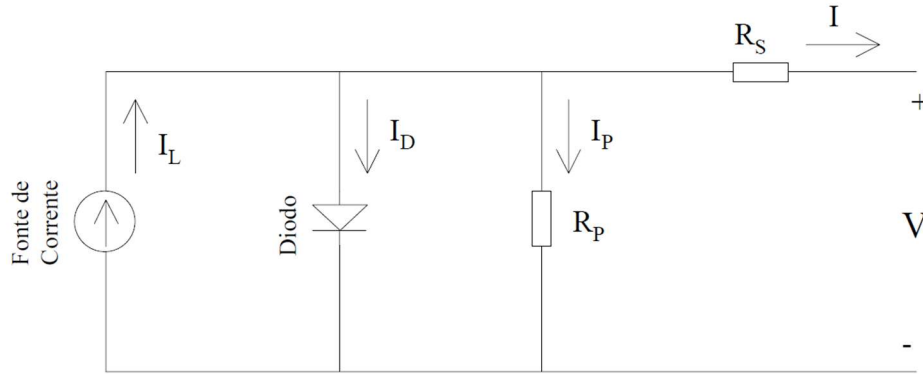


Figura 3.3: Circuito Equivalente do Modelo de um Diodo. Fonte: [13].

3.2.4 Curva Característica I-V

A curva I-V é a curva característica de corrente-tensão (I-V) dos dispositivos fotovoltaicos (DFVs). Trata-se da superposição gráfica da curva de corrente e tensão da célula solar no escuro com a adição da corrente fotogerada (I_L). Ela é derivada da equação 3.11.

Na Figura 3.4 é ilustrado o formato da curva, em que alguns pontos destacados são considerados parâmetros importantes para o funcionamento da célula solar. Dentre eles estão a corrente de curto-circuito (I_{SC}), que é a corrente máxima quando a tensão através da célula é zero; a tensão de circuito aberto (V_{OC}) que é a tensão máxima quando a corrente através da célula é zero; o ponto de máxima potência, denotado como P_{MP} , mas adotado neste trabalho como MPP (do inglês, *maximum power point*) (Equação 3.12),

$$MPP = V_{OC} I_{SC} FF \quad (3.12),$$

em que FF é o fator de forma, definido como a razão entre o ponto de potência máxima (MPP) e o produto de V_{OC} e I_{SC} ou como a área do retângulo em que se ajusta a curva I-V. FF incorpora as perdas resistivas do modelo. O MPP , por sua vez, é o ponto em que a célula opera com maior potência de saída e consequentemente em corrente de máxima potência (I_{MP}) e tensão de máxima potência (V_{MP}).

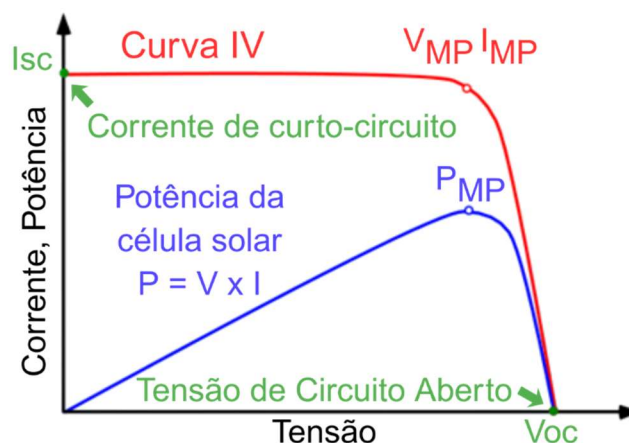


Figura 3.4: Curva Característica I-V de Dispositivos Fotovoltaicos. Fonte: Adaptada de [14].

3.3 Eletroluminescência

Ao se polarizar diretamente um dispositivo fotovoltaico (DFV), a luminescência resultante da excitação elétrica é denominada Eletroluminescência (EL). Em polarização direta o DFV funciona como um painel de LED e para tal ele deve ser alimentado na região de condução do diodo a nível de corrente de curto-circuito (I_{SC}). Como citado anteriormente, as células fotovoltaicas de silício conseguem emitir luz em um comprimento de onda entre 900 e 1300 nm do espectro eletromagnético.

Na Figura 3.5 são esquematizados os eventos do efeito eletroluminescente. Dela infere-se que devido a polarização direta uma corrente percorre a junção p-n e que instantes após a excitação, os portadores de carga retornam as suas ligações de origem, ou seja, recombinaem. Como produto dessa recombinação, partículas de luz são emitidas pelo dispositivo fotovoltaico diretamente polarizado.

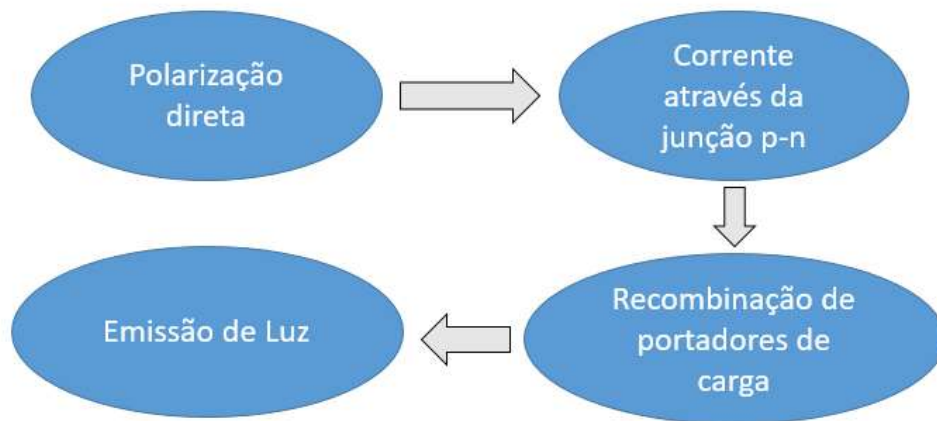


Figura 3.5: Esquemático da EL. Fonte: Produzido pelos autores, 2024.

3.3.1 Detecção de Defeitos

O ensaio de eletroluminescência (EL) possibilita a detecção e caracterização de defeitos em dispositivos fotovoltaicos (DFVs). Câmeras especiais, sensíveis ao espectro de emissão dos DFVs, são utilizadas para aquisição do sinal luminescente. No entanto, câmeras comerciais baseadas em sensores CCD também se mostram eficazes na captura da EL. Essas câmeras, no entanto, apresentam um espectro de sensibilidade limitado para a faixa de emissão luminescente do c-Si (Figura 3.6).

Na Figura 3.6 é evidenciada, em vermelho, a sensibilidade espectral residual característica dos sensores CCD para o tipo de emissão em questão. Apesar da limitada sensibilidade à faixa espectral em questão, o registro do fenômeno por câmeras CDD é eficaz para a caracterização de defeitos, mesmo com a redução da nitidez e contraste nas imagens [5].

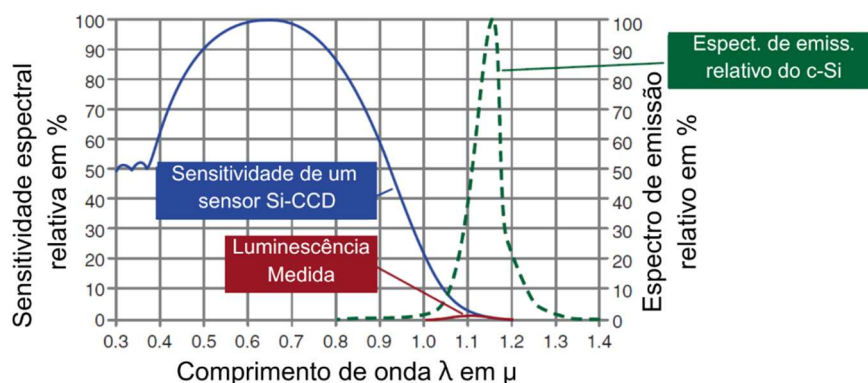


Figura 3.6: Espectros de Emissão (c-Si) e Absorção (CCD) Relativos. Fonte: Adaptada de [15].

3.3.2 Defeitos

Defeitos mecânicos detectados por EL como microfissuras, seja em estado de degradação inicial, ou já com efeito no desempenho do dispositivo fotovoltaico, assim como defeitos de impressão são característicos por afetar a resistência série do modelo de um diodo.

Já a degradação induzida por potencial é um defeito resultante das elevadas tensões às quais são submetidos os circuitos fotovoltaicos e ao não aterramento de um dos pólos dos circuitos. Quando somados, esses eventos geram uma diferença de potencial negativa entre as células e o vidro ou entre as células e a carcaça dos dispositivos, devido ao fato de que as carcaças dos módulos são sempre aterradas (existe uma simetria a essa tensão de aterramento negativa).

A PID caracteriza-se por afetar a resistência paralelo do módulo, visto que essa diferença de potencial negativa pode levar à correntes de fuga indesejadas no dispositivo. Esse efeito pode ser reversível, mas também pode causar corrosões no material. Assim como a PID, defeitos de fabricação podem afetar a resistência paralelo e provocar a redução da emissão luminescente nos dispositivos.

Exposta a fundamentação, a próxima seção apresenta a revisão bibliográfica

Capítulo 4

Revisão Bibliográfica

A análise de imagens de Eletroluminescência tem sido utilizada como um método para caracterização qualitativa de defeitos em módulos fotovoltaicos. Diversos trabalhos evidenciam a importância desse estudo. Kajari-Schröder *et al.* em [16], por exemplo, submeteram módulos fotovoltaicos idênticos a testes de cargas mecânicas uniformes para simulação de efeitos mecânicos. Os autores verificaram através de imagens de EL que 41% das células de módulos submetidos aos testes apresentaram microfissuras e que 50% das microfissuras encontradas tinham orientação paralela. Concluiu-se que as microfissuras paralelas entre barramentos de conexão são as que mais afetam o potencial energético de células solares.

Em [17] enfatiza-se a importância do entendimento das perdas de potência devido a microfissuras. Nesse trabalho, módulos solares de silício policristalino, idênticos, foram submetidos a testes de carga mecânica com montagem variada para introdução de diferentes números de microfissuras nas células solares. Esses módulos foram também, em outro momento, submetidos a um teste de congelamento de umidade para intensificação das microfissuras (aceleração do envelhecimento). Imagens de EL foram registradas ao fim de cada teste. Após o teste de carga mecânica, foi estimada uma perda máxima de potência de 2,5%. Já ao término do teste de congelamento de umidade, verificou-se que as microfissuras sofreram agravamento e, em consequência deste, detectou-se um valor de perda máxima de potência inferiormente próximo a 10%.

Saindo do âmbito das microfissuras para o de degradação induzida pelo potencial, Bedrich *et al.* em [9] afirmam que a PID pode causar perdas de potência maiores que 30% em módulos fotovoltaicos de silício. Eles explicam que nos módulos convencionais do tipo p, a PID causa desvio através da junção n+/p das células solares e que isso reduz o fator de forma (FF). Figueiredo em [18], fala que sintomas de PID podem ser diagnosticados através de imagens de EL. Ele destaca o fenômeno caracterizado por manchas escuras em células solares que ainda emitem radiação durante ensaios de EL.

Pingel *et al.*, por sua vez, em [19] caracterizam essa falha a nível de sistema, painel e célula fotovoltaica. Em sua configuração experimental, os autores submetem laminados de célula solar única e painéis padrão de 60 células a teste sob condições controladas e favoráveis a PID. Utiliza-se aqui uma câmera de EL de alta resolução para caracterização das células e painéis antes e depois do teste. Demonstram-se causas, efeitos e soluções a níveis de célula, painéis e sistemas e então, conclui-se que a origem do PID está a nível de célula, mas que essa falha pode ser evitada ou minimizada em todos os níveis supracitados.

Já Schütze *et al.* em [20], distinguem células afetadas por PID das células afetadas por tensões (esforços) através de eletroluminescência. Além disso, a EL é utilizada aqui para a resolução espacial da degradação de amostras. Os autores, que fazem o acompanhamento da degradação por EL, constataam não existir correlação entre PID e a resistência de folha (R_{sheet}) (que é uma medida da condutividade média sobre a espessura de uma camada fina do material semicondutor [21]). Por outro lado, evidenciam, em associação da técnica de imagem com a curva característica I-V, que a progressão da PID leva a uma redução da resistência paralelo (R_p) e da corrente de curto-circuito (I_{SC}). Mais que isso, é evidenciado que existe uma correlação linear forte entre a condutividade do desvio ($1/(R_p + R_s)$) e a redução observada em I_{SC} .

Assim como em [20], Goranti *et al.* em [22] utilizaram EL para o monitoramento da PID. Aqui foi realizada a pesquisa de imagem antes e depois de ensaios PID (85°C de calor seco; +600 V; -600 V; e +600 V). Na metodologia fez-se o uso de cinco módulos de silício monocristalino, sendo que dois foram submetidos previamente a teste de calor úmido acelerado (85°C / 85% UR; 1000 horas); e dois outros a teste de ciclo térmico (-40°C a 85°C; 200 ciclos). Evidenciou-se que durante a polarização negativa com maior presença de umidade (amostras submetidas previamente a testes de calor úmido acelerado) os mecanismos de irreversibilidade do estado de degradação se mostram mais ativos. Os autores afirmam ainda que a técnica de EL de alta resolução é útil na detecção de contatos danificados na metalização das células; desvios elétricos; dedos de contatos quebrados; células quebradas e microfissuras.

Apesar das análises qualitativas de defeitos em termos de eficiência serem relevantes, Fuyuki *et al.* afirmam em [4] que o comprimento de difusão do portador minoritário (L) é o parâmetro mais importante da eficiência de um módulo fotovoltaico a ser monitorado. Em seu trabalho, os autores propuseram um levantamento fotográfico do L em células solares de silício policristalino.

Fuyuki *et al.* utilizam, ainda em [4], o método de corrente induzida por feixe de luz espectroscópico ($LBIC$) para elucidar o L . Eles adicionam que o valor absoluto do L obtido por $LBIC$ pode ser mapeado para todo o dispositivo fotovoltaico (DFV) pela

variação espacial da intensidade de emissão. Concluiu-se aqui que existe uma relação direta entre a intensidade de emissão eletroluminescente e a quantidade de portadores minoritários numa célula solar. Os autores ainda afirmam que a pesquisa por imagem é uma ferramenta efetiva para análise semiquantitativa do L .

De [23] tem-se que a distribuição de carregadores minoritários e a reabsorção de fótons influenciam a eficiência quântica espectral externa (EQE_{pv}). Rau *et al.* definem em [24] que a EQE_{pv} é uma quantidade espectral definida pela relação de portadores de carga coletados com o número de fótons incidente na superfície da célula (DFV não polarizado operando de acordo com o efeito fotovoltaico). Os autores ainda estabelecem em [24] o teorema de reciprocidade espectral entre EQE_{pv} e emissão luminescente local $\phi(x)$, que é uma quantidade que define a emissão eletroluminescente na região representada pelo pixel da posição (x).

Kirchartz *et al.*, em [23], resolvem a eletroluminescência em células fotovoltaicas no domínio espectral, partindo da análise de EL em baixa energia (onde as propriedades ópticas dos dispositivos são visíveis e o coeficiente de absorção de fótons (α) é baixo) e realizando algumas aproximações para essa condição. Os autores afirmam que se faz importante a caracterização das não homogeneidades espaciais para dispositivos de área grande, e resolvem espacialmente a eletroluminescência.

Na resolução espacial da eletroluminescência feita em [23], assume-se que a intensidade de corrente induzida por feixe de luz espectroscópico ($LBIC$) é proporcional a eficiência quântica espectral externa (EQE_{pv}) e acrescenta-se que a vantagem da varredura por $LBIC$ é mostrar regiões macroscópicas com diferentes velocidades de recombinação da superfície traseira (S). É visto que, em comparação com a $LBIC$, a EL apresenta uma sobreposição de sinal dependente da distância ao contato devido a variação de tensão local ($V(x)$), sendo a tensão na região representada pelo pixel da posição (x). Afirma-se aqui, no entanto, que a relação de reciprocidade não é um caminho imediato e que outros equacionamentos precisariam ser feitos para quantificar os parâmetros da célula solar em uma forma espacialmente resolvida.

Com base na formulação que relaciona a eficiência quântica espectral externa (EQE_{pv}) e a emissão luminescente local $\phi(x)$, apresentada em [24], Potthoff et al. [10] estendem essa relação para o domínio espacial e realizam a detecção da distribuição de tensão em módulos fotovoltaicos por meio de imagens de EL. Os autores demonstram que a emissão luminescente (ϕ) em um ponto x depende diretamente da tensão (V) aplicada nesse mesmo ponto. A partir dessa dependência, estabelecem uma segunda relação que permite determinar a tensão de operação no interconector da célula solar. Por

fim, utilizando aproximações válidas para condições inferiores a 10% da I_{SC} e acima desse limite, os autores estimam a resistência série do dispositivo fotovoltaico.

Assim como em [10], outros autores têm buscado quantificar os parâmetros dos dispositivos fotovoltaicos através de EL, como [5] na determinação de comprimento de difusão (L) e [25] na obtenção da resistência série (R_S).

O método quantitativo de [5] inclusive questiona a confiabilidade do método utilizado por [4] (supracitado nesta seção) ao verificar que a emissão luminescente local $\phi(x)$ varia linearmente somente para pequenos comprimentos de difusão de portadores minoritários (L). Os autores afirmam também que a variação lateral da tensão local $V(x)$ através da célula, causada por variações locais da R_S e “dedos de contato” quebrados na célula, é responsável pela variação local da emissão luminescente (ϕ).

Já numa abordagem mais empírica, Bedrich *et al.* em [9] apresenta um método de análise quantitativa de eletroluminescência para estimar perdas por degradação induzida pelo potencial (PID) em células e módulos fotovoltaicos. Os autores discorrem que um mapa de tensão embasa a modelagem do desempenho fotovoltaico. Realizam-se correções de distorções nas imagens para que a intensidade da imagem tenha um sinal proporcional a EL emitida. Mais que isso, propõem-se relações para o mapeamento da perda de potência, inclusive com a irradiância (G). Os autores obtêm um erro quadrático médio (RMS) abaixo de 3% para a previsão de perda de energia feita através de imagens de EL em comparação com a perda medida através de curvas características I-V.

E Kropp *et al.* utilizam-se em [26] de pressupostos apresentados em [10] para realizar um mapeamento de resistência série (R_S) e paralelo (R_P) em imagens de eletroluminescência com o objetivo de prever a perda de potência de células de um módulo fotovoltaico a partir das imagens de EL e parâmetros fornecidos pelo fabricante na folha de dados. Com o mapeamento da resistência os autores conseguem obter também as distribuições de tensão e corrente para verificar a perda de energia em relação aos dados especificados pelo fabricante dos DFVs.

Apresentado o estado da arte e como propõe-se aqui a obtenção de imagens de EL através de um sistema alternativo de baixo custo, considerações adicionais tornam-se necessárias.

Trabalhos condicionados ao uso de aparato alternativo às câmeras especificadas para o espectro eletroluminescente de células fotovoltaicas foram citados neste trabalho. Entretanto, em nenhum deles fez-se o uso de uma câmera baseada em Semicondutores de Metal-Óxido Complementar (CMOS) (sensores mais baratos).

Petraglia & Nardone, apesar, propuseram [1] duas alternativas experimentais para ensaios de EL em células fotovoltaicas. Em uma delas, fez-se o uso da sensibilidade infravermelha residual de uma câmera CCD, ajustando manualmente vários parâmetros como a abertura; o tempo de exposição; e a sensibilidade ISO. Em outra, utilizou-se uma *webcam*, da qual o filtro infravermelho foi retirado.

No primeiro método, o tempo de exposição prolongado exige a utilização de tripé e disparo remoto. Além disso, valores elevados de ISO introduzem ruído e favorecem o aparecimento de pixels quentes, tornando necessária a aplicação de *softwares* específicos para removê-los. Como os ensaios são realizados em ambiente controlado e com baixa luminosidade, câmeras com foco manual mostram-se mais adequadas à configuração experimental.

No segundo método, o tempo de exposição pode ser reduzido, permitindo também o uso de valores menores de ISO; contudo, essa abordagem implica uma diminuição da resolução e qualidade fotográfica resultante.

Assim, concluídas tais considerações, e visando caracterizar a resistência série de dispositivos fotovoltaicos a partir da eletroluminescência residual, o capítulo a seguir discorrerá acerca do material e métodos.

Capítulo 5

Material e Métodos

Apresentada a revisão bibliográfica, será tratada a metodologia do trabalho. Dessa forma, serão descritas as suas etapas, material e métodos.

5.1 Sistema de Aquisição de Imagens de EL

Para o registro das imagens de EL, foi empregada uma câmera DSLR Canon EOS Rebel SL3/250D (Figura 5.1), equipada com sensor CMOS e originalmente destinada à captura de imagens no espectro visível. A escolha desse equipamento se fundamenta em sua ampla disponibilidade comercial, custo significativamente inferior ao de câmeras científicas sensíveis ao infravermelho próximo e possibilidade de modificação interna para ampliar sua resposta espectral. Como câmera profissional de entrada de uma marca consolidada, o modelo utilizado oferece qualidade de imagem razoável no espectro visível, aspecto importante para a determinação do foco e para o processamento subsequente das imagens.



Figura 5.1: Câmera Canon EOS Rebel SL3, também conhecida como Canon EOS Rebel 250D. Fonte: [27].

A lente EF-S 18–55 mm f/4–5.6 IS STM (Figura 5.1), presente em kits básicos de câmeras de entrada, foi igualmente adotada. Esse componente fornece versatilidade focal, estabilização óptica e qualidade suficiente para o enquadramento e a captura de imagens de módulos fotovoltaicos em ambiente controlado, atendendo às necessidades do arranjo experimental.

5.2 Modificação do Sistema Óptico para Captação de EL Residual

Para permitir a captação de radiação no infravermelho próximo, região na qual ocorre a emissão de eletroluminescência dos dispositivos fotovoltaicos, a estrutura original da câmera foi modificada. Na Figura 5.2 são apresentadas etapas representativas do processo de desmontagem que possibilitou o acesso ao conjunto do sensor. Uma vez removida a carcaça traseira e a placa-mãe (Figuras 5.2 (a) e (b)), foi possível visualizar os filtros internos de corte infravermelho (IR-cut) e de correção de cores, posicionados imediatamente à frente do sensor (Figura 5.2 (c)).

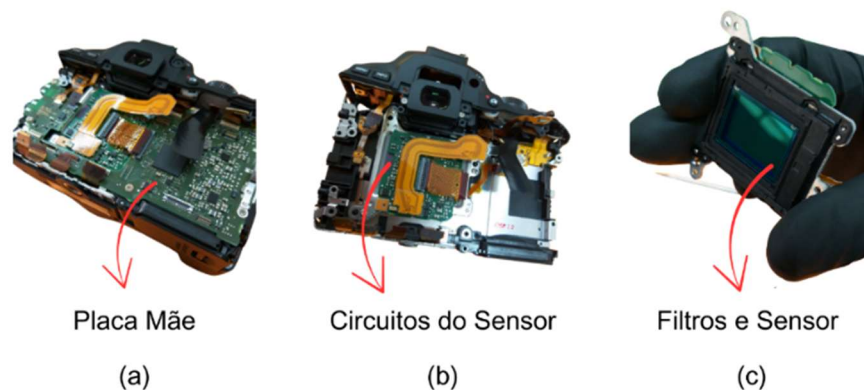


Figura 5.2: Desmontagem Canon EOS Rebel SL3. Figura 5.2 (a) Placa mãe após remoção da carcaça. Figura 5.2 (b) Circuitos do Sensor após remoção da placa mãe. Figura 5.2 (c) Filtros justapostos ao sensor em moldura. Fonte: Produzida pelo autor.

Esses filtros foram removidos e substituídos por um elemento óptico de vidro neutro Astronomik MC-Clear Glass, compatível com o modelo da câmera e projetado para maximizar a transmissão espectral. Conforme apresentado na Figura 5.3, o fabricante especifica transmissão média superior a 70% na faixa espectral de interesse, o que viabiliza a captura da eletroluminescência residual emitida pelo módulo fotovoltaico.

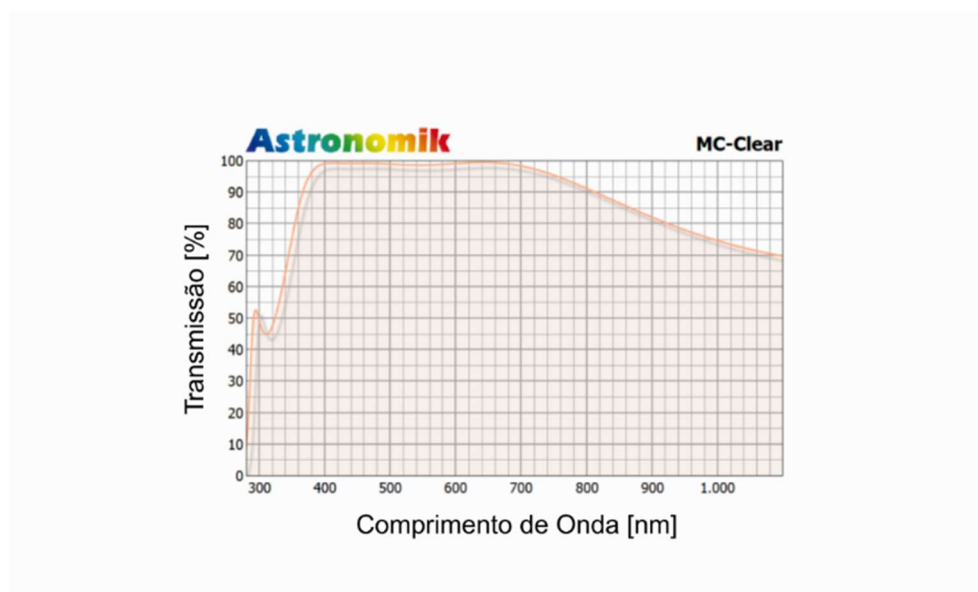


Figura 5.3: Gráfico de Transmissão vs Comprimento de Onda do filtro de espectro total Astronomik MC-Clear Glass. Fonte: [28].

A modificação realizada amplia a sensibilidade espectral da câmera para além do intervalo visível, permitindo registrar a emissão característica de EL sem a necessidade de câmeras NIR profissionais, reduzindo substancialmente o custo do sistema de aquisição.

5.2 Câmara Escura

Para evitar interferência luminosa durante os registros de eletroluminescência, empregou-se uma câmara escura construída com estrutura paralelepipedica em madeira, com faces superior e inferior de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ (Figura 5.4). A face frontal contém um painel deslizante vertical que permite a abertura e o fechamento da câmara sem alteração do posicionamento do equipamento.

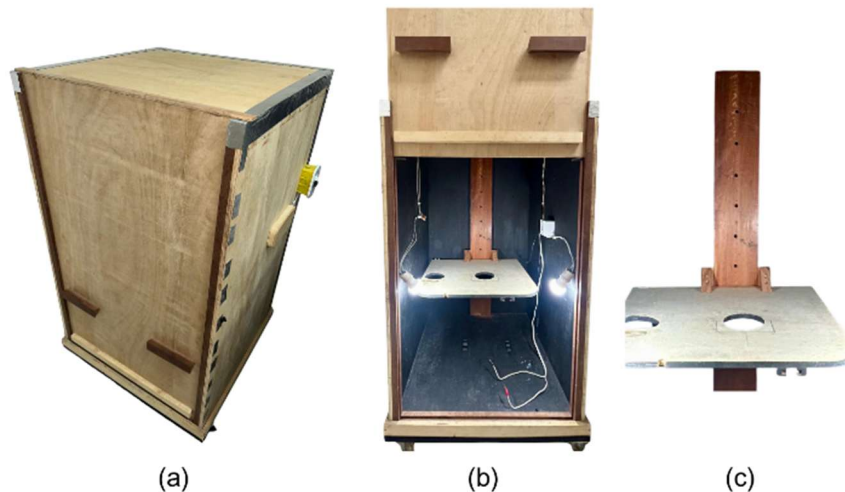


Figura 5.4: Câmara Escura aberta em vista frontal (a) e fechada em vista diagonal superior (b). Suporte para câmeras da Câmara Escura (c). Fonte: Produzida pelo autor.

A câmara possui um canal lateral destinado à passagem dos cabos de alimentação dos dispositivos fotovoltaicos (DFVs). Esse canal foi projetado com barreiras internas de extinção de luz, garantindo a integridade do ambiente escuro mesmo com cabos conectados ao sistema.

No interior, foi instalado um suporte para câmeras com mobilidade transversal e furo centralizado, permitindo ajustar o sensor de imagem a diferentes distâncias normais em relação à base, de modo a adequar o enquadramento e a profundidade de foco necessários aos ensaios (Figura 5.4(c)). As faces internas foram pintadas em preto fosco

para redução de reflexões, e suportes para lâmpadas foram integrados às faces laterais, possibilitando o registro de imagens no espectro visível sem a necessidade de abrir a câmara.

Além do suporte interno, foi utilizado um adaptador específico para o modelo Canon SL3, desenvolvido por modelagem 3D e impresso em material polimérico. Esse adaptador foi acoplado a um suporte de madeira para garantir o posicionamento estável da câmera durante as aquisições (Figura 5.5).

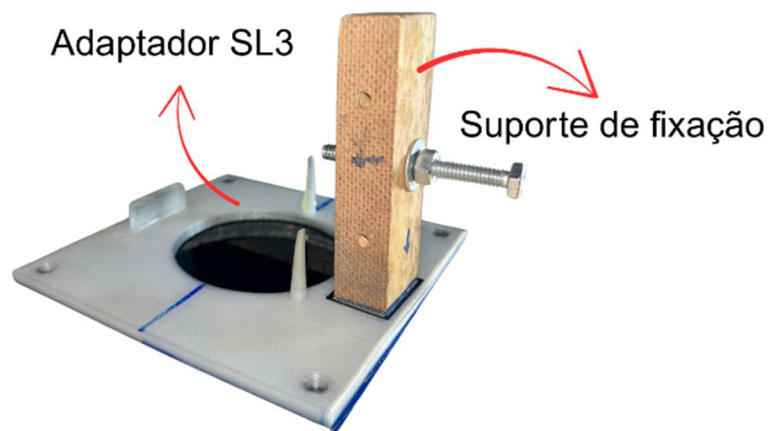


Figura 5.5: Adaptador para Canon SL3 com suporte de fixação da câmera. Fonte: Produzida pelo autor.

5.3 Fonte CC e DFV

Para a polarização direta do dispositivo fotovoltaico (DFV) durante os ensaios de eletroluminescência, utilizou-se uma fonte CC de bancada programável Agilent E3631A (Figura 5.6). O equipamento opera em modo de corrente constante, com faixa de até 25 V e 1 A e resolução de três casas decimais, características essenciais para garantir estabilidade elétrica e controle preciso da corrente injetada no módulo durante a emissão luminescente. Tais parâmetros atendem adequadamente às exigências do ensaio, que requer aplicação controlada de baixas correntes com mínima oscilação.



Figura 5.6: Fonte CC Agilent E3631A. Fonte:[29].

O módulo empregado nos experimentos foi o Komaes KM(P)5, um módulo fotovoltaico policristalino de 5 W composto por 36 células de silício policristalino, com dimensões de $220 \times 250 \times 18$ mm (Figura 5.7). Conforme suas especificações elétricas (Figura 5.7), o DFV apresenta corrente de curto-circuito de 0,31 A (I_{SC}) e tensão de circuito aberto de 21,52 V (V_{OC}). Esses valores definidos pelo fabricante representam os limites superiores de operação do dispositivo e permitem que o módulo seja convenientemente alimentado pela fonte utilizada, além de oferecer condições seguras e adequadas para a obtenção de eletroluminescência residual em baixa potência.



Figura 5.7: Módulo Kmaes KM(5)P e etiqueta de dados. Fonte: Produzida pelo autor.

5.3.1 Delineamento Experimental

O presente estudo utilizou um único módulo fotovoltaico Komaes KM(P)5 como amostra experimental, em um formato de projeto-piloto destinado à validação do arcabouço metodológico proposto. A escolha por uma amostra única deve-se à complexidade do desenvolvimento das múltiplas etapas de modificação óptica, calibração de câmera, ajustes de foco e processamento computacional.

O módulo analisado não recebeu defeitos induzidos artificialmente, sendo estudado em seu estado real de uso, já apresentando pequenas não uniformidades e regiões de possível degradação natural. Essa condição foi considerada adequada por refletir situações reais de inspeção e por permitir avaliar a sensibilidade e robustez da metodologia proposta para detecção e quantificação de variações de resistência série em módulos reais.

5.4 Registro da Imagem

Para o registro das imagens, a câmera modificada foi posicionada no suporte interno da câmara escura, mantendo orientação normal em relação à base (Figura 5.8(a-b)). O dispositivo fotovoltaico (DFV) foi colocado sobre a base da câmara de forma centralizada em relação ao eixo óptico da objetiva e conectado aos cabos de alimentação correspondentes (Figuras 5.8(b-c)).

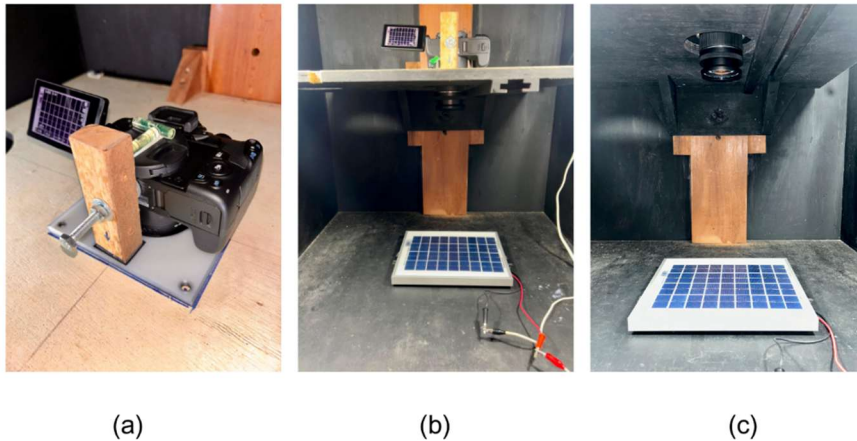


Figura 5.8: Canon SL3 sobre suporte de câmeras (a). Câmera e DFV centralizados e em posição relativa normal (b-c). Fonte: Produzida pelo autor.

A comunicação entre a câmera e o computador foi estabelecida via conexão sem fio, utilizando-se o *software* gratuito Canon EOS Utility®, que permitiu o controle remoto dos parâmetros de captura e o disparo das imagens.

O enquadramento do módulo foi realizado com distância focal de 35 mm a aproximadamente 33 cm da objetiva, configuração que reduz distorções geométricas e garante cobertura integral da área do DFV. O ajuste de foco foi realizado manualmente na própria lente, com apoio da visualização em tempo real disponibilizada pelo *software* de controle remoto.

Os parâmetros de exposição, tempo de obturador e ISO, foram definidos via software conforme a finalidade da captura (espectro visível, calibração ou eletroluminescência). Após o posicionamento da câmera e do DFV, a câmara escura foi fechada. As lâmpadas internas foram acionadas exclusivamente para a obtenção de imagens no espectro visível e permaneceram desligadas nos registros de calibração e de eletroluminescência.

5.5 Ensaio de EL

Após a configuração do arranjo óptico e elétrico, o dispositivo fotovoltaico foi polarizado diretamente por meio da fonte CC programável, ajustada para fornecer correntes iguais a $0.1 I_{SC}$ ou I_{SC} , conforme o nível de excitação definido para cada ensaio.

A emissão eletroluminescente apresenta crescimento transitório até atingir regime estável, o que ocorre aproximadamente após 60 segundos de polarização contínua [5]. Assim, as imagens foram registradas somente após esse período de estabilização,

utilizando o tempo de exposição previamente selecionado para cada condição experimental.

5.6 Determinação do Foco

Durante a captura das imagens, foi constatada a necessidade de diferenciar o ajuste de foco entre o espectro visível e a eletroluminescência (EL), uma vez que ambos apresentam níveis de nitidez distintos devido às características ópticas e espectrais do sistema. Para lidar com essa diferença, estabeleceu-se um procedimento para relacionar o foco obtido no espectro visível ao foco correspondente em EL.

Inicialmente, imagens do dispositivo fotovoltaico (DFV) foram registradas no espectro visível em diferentes ajustes manuais de foco. Em seguida, para cada um desses mesmos ajustes, foram adquiridas as imagens de EL. Todas as imagens foram convertidas para escala de cinza para padronizar a análise.

A determinação do melhor foco relativo foi realizada utilizando a métrica Tenengrad, definida por:

$$Tenengrad(I) = median(G_x^2 + G_y^2) \quad (5.1),$$

em que,

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * I; \quad (5.2),$$

e

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * I; \quad (5.3),$$

em que I é a Imagem; G_x^2 é a segunda potência do Gradiente horizontal x ; G_y^2 é a segunda potência do Gradiente vertical y .

O método Tenengrad, que aplica convoluções baseadas no filtro de Sobel, fornece uma medida da nitidez da imagem, sendo o maior valor de Tenengrad associado ao melhor foco relativo [30].

A partir da imagem de EL com maior valor de Tenengrad, determinou-se o valor correspondente no espectro visível para o mesmo ajuste manual de foco. Esse valor passou a ser adotado como Tenengrad de referência. Assim, torna-se possível obter o foco adequado para novas imagens de EL comparando-se, de forma empírica, o Tenengrad da imagem no espectro visível com esse valor de referência. A proximidade entre ambos indica maior probabilidade de obtenção de imagens de EL com melhor nitidez. Essa estratégia depende do mesmo arranjo de câmera e DFV, e reduz o tempo necessário para ajuste de foco e diminui a subjetividade do processo.

5.7 - Relação Tempo de Exposição X ISO

A norma IEC TS 60904-13 [31] apresenta critérios de qualidade para imagens de eletroluminescência e define a relação sinal-ruído SNR_{50} como parâmetro fundamental para a distinção de características eletroluminescentes. A SNR_{50} é calculada segundo:

$$SNR_{50} = \frac{\sum_k (0,5 * (EL_1(k) + EL_2(k)) - EL_{BG}(k))}{\sum_k (|EL_1(k) - EL_2(k)| * \sqrt{0,5 * (\frac{2}{\pi})^{-0,5}})} \quad (5.4),$$

em que k representa a coordenada do pixel da imagem, EL_1 e EL_2 são duas imagens sucessivas registradas sob a mesma configuração de captura e EL_{BG} corresponde à imagem de fundo adquirida com o módulo não polarizado. Para imagens obtidas em laboratório, a IEC recomenda valores de SNR_{50} superiores a 45 para garantir qualidade adequada.

A determinação da SNR_{50} depende tanto da capacidade de emissão luminescente do DFV quanto da eficiência do sensor da câmera e do controle de ruído, sendo influenciada pelos parâmetros ISO e tempo de exposição. Assim, para caracterizar o efeito desses parâmetros sobre a SNR_{50} no arranjo experimental utilizado, foram avaliadas combinações de três níveis de ISO (200, 400 e 800) e quatro tempos de exposição (60 s, 120 s, 240 s e 480 s).

Em cada combinação, foram adquiridas duas imagens consecutivas EL_1 e EL_2 , além da respectiva imagem de fundo EL_{BG} . A intensidade média e a saturação percentual dos pixels foram empregadas como métricas auxiliares, de modo a evitar distorções provocadas por regiões de saturação excessiva.

Para modelar a dependência da SNR_{50} em função do ISO e do tempo de exposição, foi ajustada uma superfície polinomial do tipo:

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (5.5),$$

em que x representa o ISO, y o tempo de exposição e z a SNR_{50} correspondente. O ajuste foi avaliado por métricas de erro (MAE) e pelo coeficiente de determinação (R^2), de forma a verificar a adequação do modelo para a seleção de parâmetros.

A saturação percentual dos pixels foi adotada como métrica adicional obrigatória, uma vez que elevados valores de SNR_{50} podem estar associados a saturação dos pixels, o que comprometeria a representação real do sinal eletroluminescente. Dessa forma, a escolha dos parâmetros foi realizada considerando simultaneamente SNR_{50} , intensidade média e saturação, conforme os critérios definidos na norma e as limitações do arranjo experimental.

5.8 Pré-Processamento

Após a definição dos parâmetros ópticos e eletrônicos de captura, as imagens de EL foram submetidas a um conjunto de etapas de pré-processamento destinadas à redução

de ruídos, correção de distorções e compensação de não-uniformidades. O objetivo desse procedimento é garantir que a imagem final represente, de forma quantitativa, a distribuição espacial da emissão eletroluminescente do DFV. Na Figura 5.9 é apresentada a imagem bruta antes do pré-processamento.

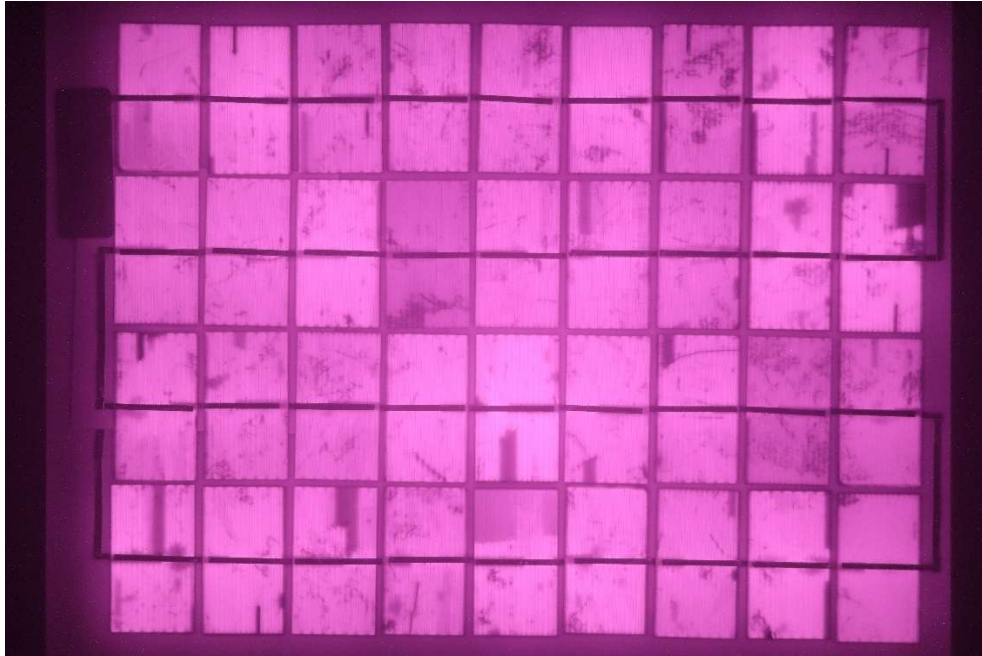


Figura 5.9: Imagem de EL antes das etapas de pré-processamento. Fonte: Produzida pelo autor.

As etapas de pré-processamento aplicadas seguem recomendações descritas por Bedrich et al. [30] e incluem:

- Correção de efeitos de tempo único (STE);
- Correção de fundo;
- Correção de campo plano (*flat-field*);
- Correção de artefatos residuais.

Cada uma delas é descrita a seguir.

5.8.1 Correção de Efeitos de Tempo Único (STE)

Efeitos de tempo único são artefatos provocados pela ionização do sensor por partículas de alta energia, produzindo pixels isolados com intensidade anômala. A correção foi realizada utilizando duas imagens consecutivas, I_1 e I_2 , capturadas sob o mesmo tempo de exposição. A partir delas, foram calculados:

- a imagem da diferença, I_{dif} , das duas imagens;
- a imagem dos mínimos locais, I_{min} (Equação 5.6):

$$I_{min} = \min (I_1, I_2) \quad (5.6);$$

- a máscara STE M_{STE} , definida por um limiar de quatro vezes o valor local da função nível de ruído (NLF):

$$M_{STE} = I_{dif} > 4 * NLF(I_{min}) \quad (5.7);$$

Agrupamentos conectados na máscara foram identificados como STEs, e os pixels afetados foram substituídos pelos valores correspondentes não-afetados entre I_1 e I_2 . Na Figura 5.10 é ilustrada a imagem resultante dessa etapa.

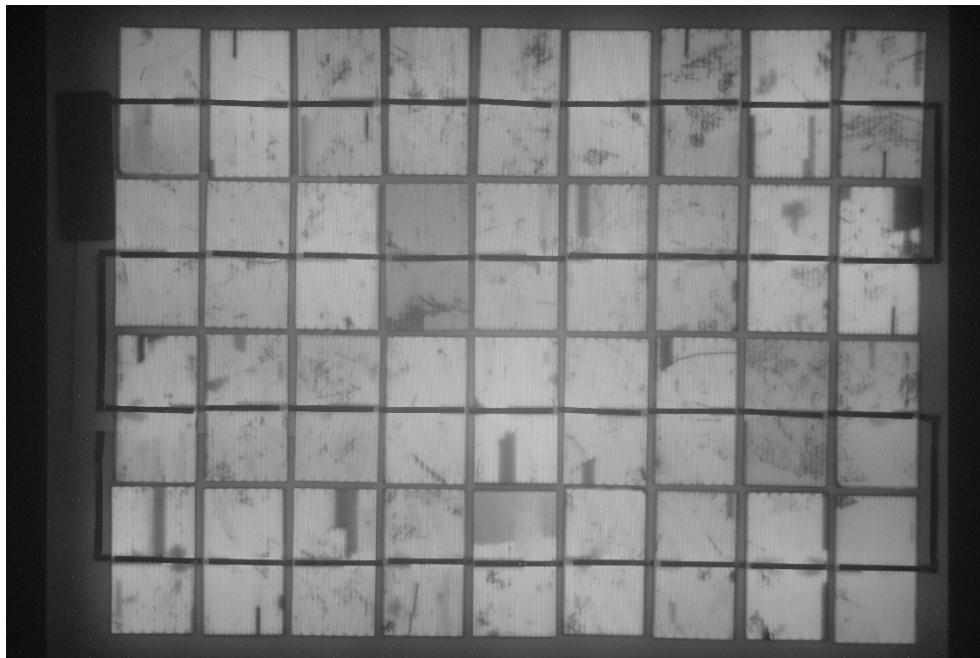


Figura 5.10: Imagem de EL resultante da correção de STE. Fonte: Produzida pelo autor.

5.8.2 Correção de Fundo

A correção de fundo remove contribuições da corrente de saturação reversa (*dark current*) e do ruído térmico do sensor. Como o ensaio foi conduzido em câmara escura, o efeito de luz ambiente é desprezível.

Em vez da subtração direta de uma imagem de fundo — que adicionaria ruído e poderia introduzir novos STEs — adotou-se o método baseado na modelagem da *dark current* como função do tempo de exposição. Para isso:

- Foram registradas nove séries de imagens de fundo para tempos de exposição igualmente espaçados, duas imagens por série;
- Obtenção de mapas de inclinação e intercepto através de regressão linear das imagens suavizadas e seus devidos tempos de exposição;
- Cada par foi previamente corrigido de STE e suavizado pela média;

- Ajustou-se a intensidade de cada pixel por regressão linear, produzindo os mapas de inclinação e intercepto;
- Aplicou-se o limiar para hot pixels conforme [30];
- Obteve-se a imagem de fundo através de:

$$I_{BG}(t_{exp}) = a \cdot t_{exp} + b \quad (5.8),$$

em que t_{exp} é o tempo de exposição; a é a inclinação; b é o intercepto.

Na Figura 5.11 é apresentada a imagem de EL após as correções de STE e de fundo.

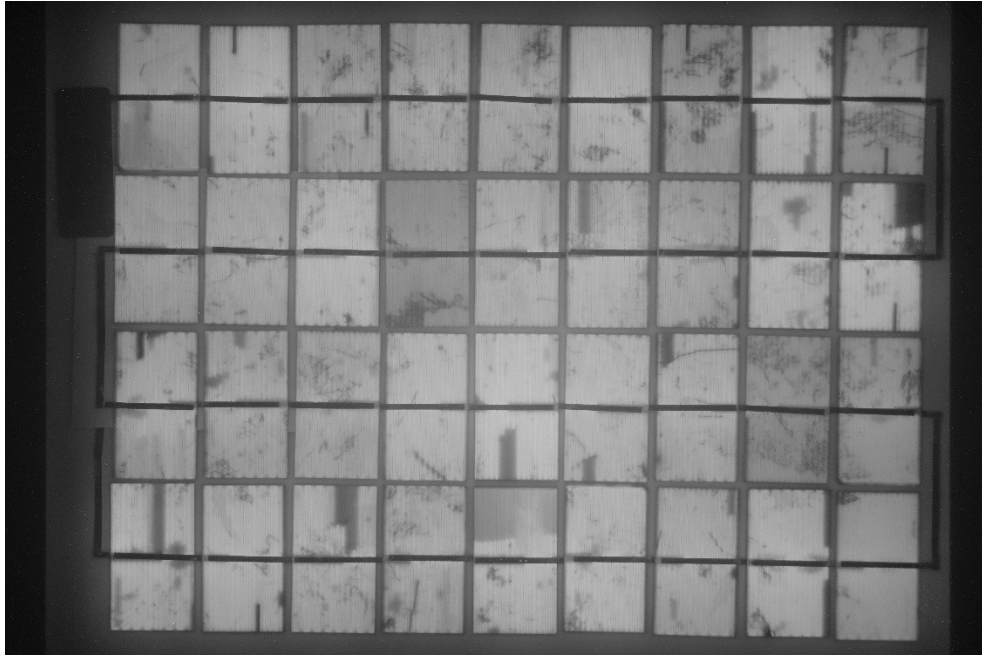


Figura 5.11: Imagem de EL após correções de STE e fundo. Fonte: Produzida pelo autor.

5.8.3 Correção de Campo Plano

O campo plano compensa não-uniformidades de iluminação e variações da eficiência quântica dos pixels. Utilizou-se o método A descrito em [30], consistente em:

- Registrar 10 imagens de uma tela de smartphone emitindo luz vermelha em posições e orientações distintas;
- Somar e normalizar as imagens obtidas;
- Corrigir o plano de fundo com base em 1% da distribuição cumulativa;
- Suavizar a imagem resultante com filtro mediano 3×3 , compondo o campo plano I_{FF} .

A imagem corrigida é dada por:

$$I_{STE-BG-FF} = \frac{I_{STE-BG}}{I_{FF}} \quad (5.9).$$

A imagem resultante $I_{STE-BG-FF}$ é ilustrada na Figura 5.12.

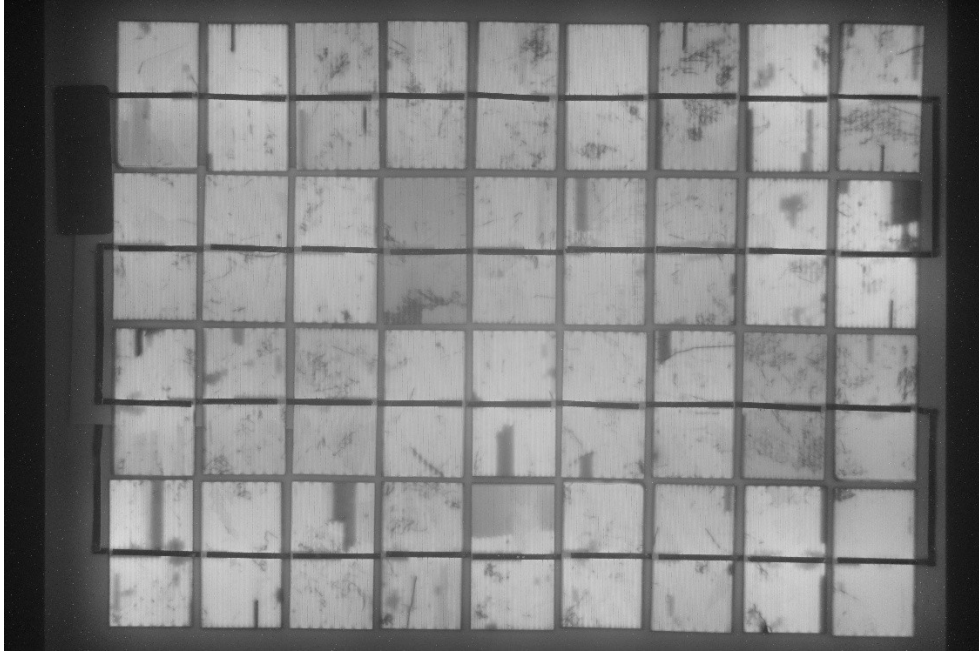


Figura 5.12: Imagem de EL após correções de STE, fundo e campo plano. Fonte: Produzida pelo autor.

5.8.4 Correção de Artefatos

Após as etapas anteriores, artefatos residuais ainda podiam permanecer na imagem devido à degradação contínua do sensor. A primeira correção empregou filtro mediano de vizinhança 3 com limiar $T_C = 0,1$, substituindo valores discrepantes por seus equivalentes filtrados (Equação 5.10). Na Figura 5.13 é apresentado o resultado.

$$I \left[T_C < \frac{I - I_{median}}{I_{median}} \right] = I_{median} \quad (5.10).$$

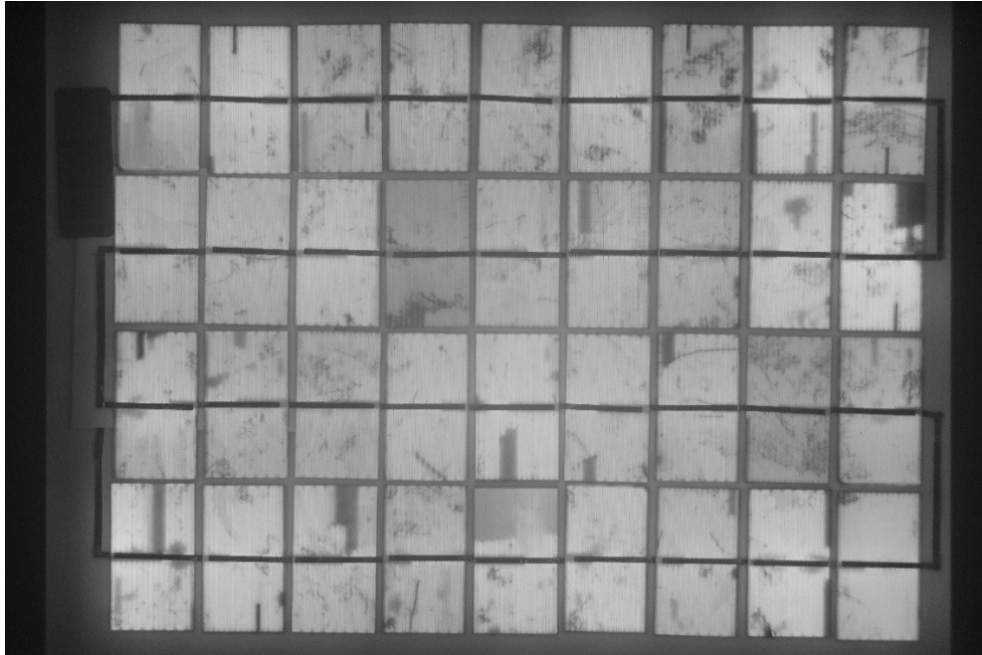


Figura 5.13: Imagem de EL após correções de STE; fundo; campo plano; e filtro mediano. Fonte: Produzida pelo autor.

Em seguida, foi aplicado o método *Non-Local Means Denoising* (NLMD), utilizando a função *fastNlMeansDenoising* disponível na biblioteca *OpenCV-Python* (*cv2*), obtendo-se a imagem final ilustrada na Figura 5.14.

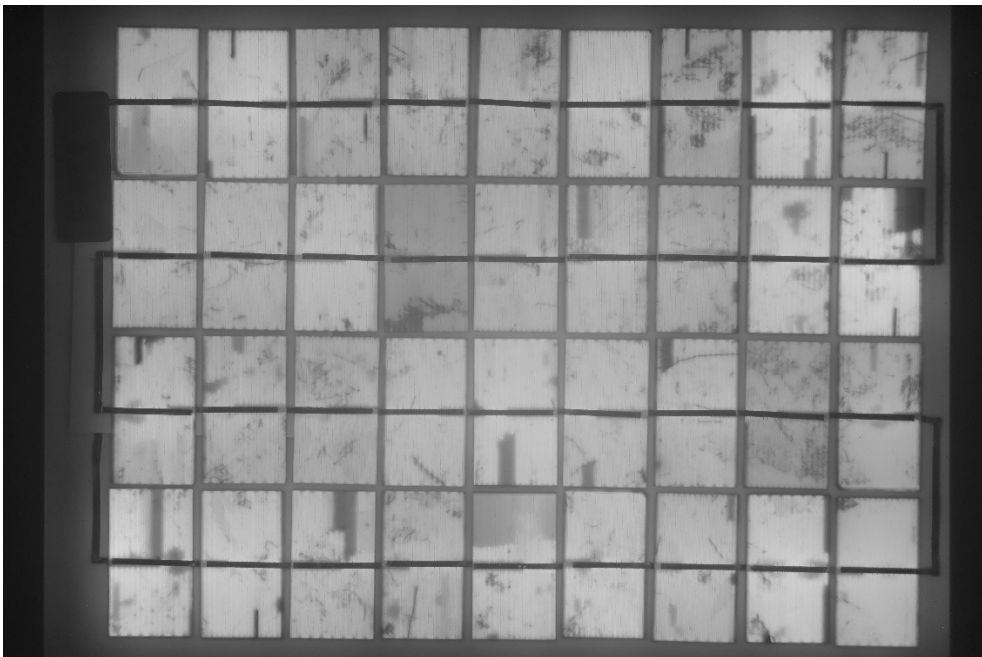


Figura 5.14: Imagem de EL após correções de STE; fundo; campo plano; filtro mediano; e NLMD. Fonte: Produzida pelo autor.

Essas técnicas removem ruídos preservando as características estruturais da imagem eletroluminescente. Processos adicionais, como restauração ou correção de perspectiva, não foram aplicados por não integrarem o escopo deste trabalho.

5.9 Segmentação

Com as imagens pré-processadas, foi necessário identificar as regiões correspondentes às células fotovoltaicas para permitir a estimativa de resistência série local. A segmentação foi realizada a partir das imagens registradas no espectro visível, utilizando o *software labelme (Python)*, no qual cada célula foi anotada individualmente, resultando na criação de máscaras binárias para segmentação por regiões.

Inicialmente, investigou-se a possibilidade de empregar segmentação semântica por meio do treinamento de uma rede neural *U-Net* usando as anotações geradas no *labelme*. Entretanto, os resultados apresentados pela rede mostraram deformações nas bordas das células e inconsistências geométricas, o que inviabilizou sua utilização.

Considerando que a segmentação não constitui o objetivo central do trabalho e que a acurácia geométrica das regiões segmentadas é essencial para o cálculo de resistência série, adotou-se a abordagem manual até a etapa de criação das máscaras. As máscaras derivadas das imagens visíveis foram então aplicadas às imagens de EL previamente pré-processadas, adquiridas na mesma configuração experimental. Na Figura 5.15 é ilustrado o resultado da segmentação.

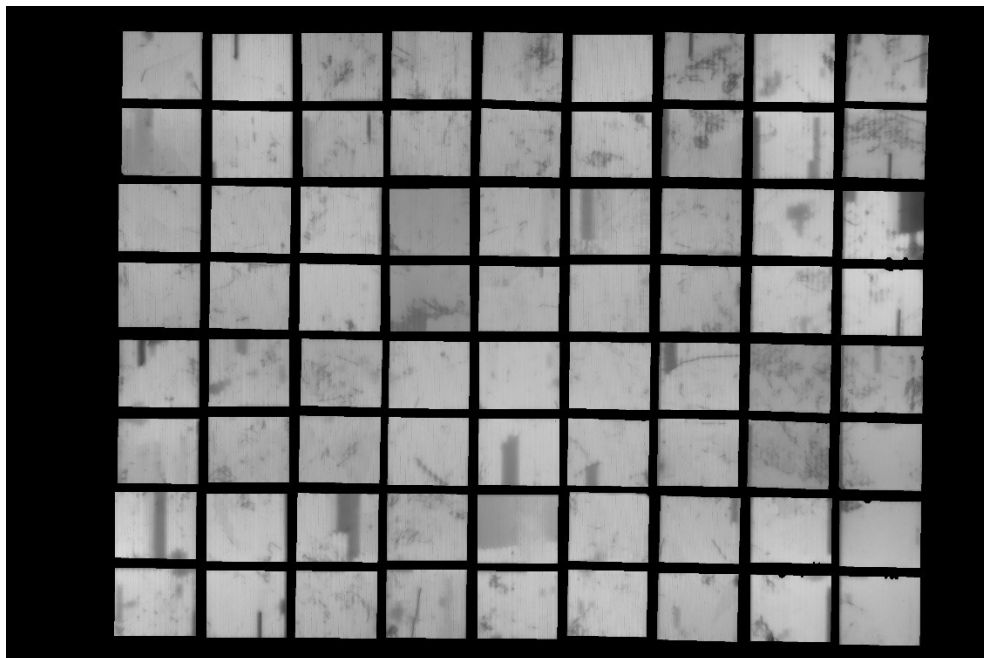


Figura 5.15: Imagem 8 bits de Eletroluminescência a I_{SC} , pré-processada e segmentada.
Fonte: Produzida pelo autor.

A partir das imagens segmentadas, procede-se à aplicação dos métodos para estimação da resistência série do módulo e das células individuais.

5.10 Estimativa da Resistência Série R_s do Módulo Por Eletroluminescência

A resistência série de um dispositivo fotovoltaico é um parâmetro do modelo de um diodo associado principalmente a perdas de potência elétrica devido a danos mecânicos. Uma das estratégias utilizadas para o mapeamento desse parâmetro é a utilização da imagem de eletroluminescência (EL).

Neste trabalho, com objetivo de obter a resistência série total do módulo (R_{Smod}) em dispositivos fotovoltaicos (DFV) através de imagens de eletroluminescência residual, propõe-se uma metodologia baseada em Potthoff *et al.* (2010).

5.10.1 Descrição Geral de Potthoff *et al.* [10]

Potthoff *et al.* [10] é uma referência com mais de 100 citações no campo da análise quantitativa de imagens de EL em dispositivos fotovoltaicos. No trabalho em questão, obteve-se a tensão de operação individual de cada célula em um módulo fotovoltaico através de uma imagem de EL. Além disso, no decorrer dessa abordagem, foi determinada através de EL a resistência série de um módulo fotovoltaico.

Os autores utilizaram dois módulos fotovoltaicos de silício cristalino preparados especialmente para o trabalho em questão. Esses módulos foram polarizados diretamente, e então a luminescência resultante foi registrada.

Os módulos utilizados pelos autores apresentavam interconectores entre células que extravasavam o encapsulamento, permitindo a medição direta da tensão de operação das células nos pontos de contato durante os experimentos. Essa característica permitiu a validação das estimativas de parâmetros elétricos por imagem de Eletroluminescência.

Os autores também utilizaram algumas etapas de pré-processamento de imagem, assim como um *setup* especial para realização experimental que não cabem no escopo dessa referência, tendo em vista o foco referencial apenas para a modelagem adotada.

Dado o contexto, a modelagem proposta em [10] será detalhada nos pontos apresentados a seguir, tendo como primeiro passo a explicação da relação entre e tensão e a luminescência locais (no *pixel*).

Relação Tensão Local X Luminescência Local

Em uma imagem de EL cada pixel representa uma região de tamanho específico da célula solar. A intensidade do pixel nessa imagem, por sua vez, representa a luminescência local dessa região. É sabido também que existe uma relação entre a luminescência local e uma tensão local aplicada à junção p-n, naquela região (Equação 5.11),

$$\phi(x) = C(x) \exp\left(\frac{V(x)}{V_T}\right), \text{ para } V(x) \gg V_T \quad (5.11),$$

em que, $\phi(x)$ é a luminescência local; $C(x)$, é um fator de calibração, que representa as propriedades ópticas e materiais do dispositivo fotovoltaico e da câmera fotográfica; $V(x)$, é a tensão local; e V_T , a tensão térmica.

O fator de calibração ($C(x)$) citado, atribui um peso a equação 5.11, e pode variar lateralmente na matriz de pixels. Um segundo ponto da modelagem a se destacar é a tensão de operação no interconector.

Tensão de Operação no Interconector a Partir da Tensão Local

A tensão que resulta sobre os interconectores das células é chamada de tensão de operação (Equação 5.12). Ela é definida como a soma de três termos:

1. Da queda de tensão através da resistência série externa (R_{ext}), onde R_{ext} representa a resistência nos interconectores das células (barra coletora, metalização que conecta as trilhas de contato e coleta a energia gerada pelas células); no contato entre interconectores e célula; e no volume da célula, através do diodo;
2. Da resistência série interna R_{int} , onde R_{int} representa a resistência nas trilhas de contato (metalização derivada da barra coletora); e no contato entre trilhas de contato e célula;
3. Tensão remanescente (tensão local, $V(x)$);

$$V_{op} = V(x) + R_{int}(x)i(x) + R_{ext}I \quad (5.12),$$

em que V_{op} é a tensão de operação da célula; $i(x)$, a corrente na região representada pelo pixel (corrente local); e I , é a corrente que flui através do módulo ao ser polarizado diretamente.

Dada a relação entre a tensão local e intensidade luminescente, assim como a tensão de operação, alguns pressupostos precisam ser estabelecidos.

Pressupostos do Modelo

Em [10], a região de maior luminescência local (pixel de maior intensidade) é considerada uma região (x) bem conectada às trilhas de contato da metalização. Devido a essa modelagem, a resistência interna R_{int} pode ser negligenciada nessa região.

Ainda nessa região, o fator de calibração ($C(x)$) é assumido constante para todas as células. Ou seja, na região de maior luminescência local as propriedades ópticas e materiais do dispositivo fotovoltaico e da câmera fotográfica são consideradas iguais entre as células e, então, $C(x) = C$.

Com isso, a tensão de operação na região de maior luminescência, um fator determinante para o sucesso da modelagem, pode ser determinada.

Tensão de Operação da Célula na Região de Maior Luminescência e Tensão Total no Módulo

Na condição de maior luminescência local, como pressuposto, R_{int} pode ser negligenciado, e $C(x)$ considerado constante na Equação 5.12. Com isso, ao substituir-se $V(x)$ na Equação 5.12 pela Equação 5.11 resolvida para $V(x)$, a tensão de operação da célula na região de maior luminescência é definida (Equação 5.13),

$$V_{op}^i = V_T \ln \left(\frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{C} \right) + R_{ext}^i I \quad (5.13),$$

em que V_{op}^i é a tensão de operação na célula i ; $\Phi^i(x_{max}^i)$, a luminescência na região de maior luminescência; C , o fator de calibração constante; e R_{ext}^i , é a resistência externa na célula i .

Essa tensão de operação por célula é útil para a definição da tensão total no módulo, ou tensão de polarização aplicada que, por sua vez, é descrita em [10] como a soma das tensões de operação de cada célula do módulo diretamente polarizado (Equação 5.14). Logo, é também o somatório das tensões locais na região de maior luminescência de todas as células e o somatório das quedas de tensão através das resistências series externas de todas as células R_{ext}^i .

$$V_{mod} = \sum_{i=1}^{N_{cel}} V_{op}^i = \sum_{i=1}^{N_{cel}} V_T \ln \left(\frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{C} \right) + \left(\sum_{i=1}^{N_{cel}} R_{ext}^i \right) I \quad (5.14).$$

Já a resistência série do módulo (RS_{mod}), é definida como o somatório das resistências series externas de todas as células (5.15),

$$RS_{mod} = \sum_{i=1}^{N_{cel}} R_{ext}^i \quad (5.15).$$

Estabelecidas as relações para obtenção das tensões, o impacto da resistência série externa R_{ext}^i deve ser definido para simplificações do modelo.

Impacto da Resistencia Externa na Distribuição de Tensão do Módulo

O impacto da resistência externa na distribuição de tensão do módulo é equiparado aqui à soma de todas as componentes que contribuem para resistência série externa em um dispositivo fotovoltaico (DFV). Dentre essas componentes está a resistência de contato (R_c), que é a resistência na interface célula-interconector (Equação 5.16),

$$R_c = \frac{k}{A_c} \quad (5.16),$$

em que k é a resistência de contato específica, uma constante descrita no trabalho com o valor de $40 \mu\Omega\text{cm}^2$; A_c é a área de contato por interconector medida.

Outra componente que contribui para a resistência série externa é a resistência de fita (R_f), ou dos interconectores, definida por um somatório das resistências dos materiais que os constituem (5.17),

$$R_f = \frac{l \rho_{cu} \rho_{sn}}{\rho_{cu} A_{sn} + \rho_{sn} A_{cu}} \quad (5.17),$$

em que l é o comprimento médio do interconector; ρ_{cu} , a resistividade do cobre (1,72 $\mu\Omega\text{cm}$); ρ_{sn} , a resistividade do estanho (11,5 $\mu\Omega\text{cm}$); A_{cu} , a área transversal da fita de cobre; A_{sn} , a área transversal do revestimento de estanho.

A última componente é a resistência série estimada de uma célula solar comercial (R_{cel}), definida em [10] com a magnitude de 2900 $\mu\Omega/\text{cel}$. Assim, com todas as componentes descritas, a resistência série calculada (R_{cal}) pode ser obtida (5.18),

$$R_{cal} = (2R_C + R_f) \frac{N_{cel}}{N_f} + R_{cel} N_{cel} \quad (5.18),$$

em que N_{cel} , é o número de células fotovoltaicas em série; e N_f é o número de interconectores por célula.

A resistência calculada possibilita a determinação do Fator de Calibração (C), presente na Equação 5.14 e subsequentes.

Fator de Calibração e Resistência Série do Módulo

Com a resistência calculada (R_{cal}) e equiparando-se à resistência série externa (R_{ext}^i), é possível verificar que o impacto da queda de tensão através da R_{ext}^i na tensão de operação da célula (Equação 5.13) é muito pequeno numa polarização de até 10% da corrente de curto-circuito I_{sc} . Com isso, é possível assumir para essa condição que essa queda de tensão é nula.

Ao expressar a Equação 5.13 nessa condição de polarização em função do fator de calibração, o mesmo pode ser obtido. (Equação 5.19),

$$C = \frac{N_{cel} \sqrt{\prod_{i=1}^{N_{cel}} \frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{\exp\left(\frac{V_{mod}}{V_T}\right)}}}{\sqrt{\frac{1}{10} I_{sc}}}, \text{ para } I < \frac{1}{10} I_{sc} \quad (5.19).$$

Com o fator de calibração C , e substituindo a equação 5.15 na equação 5.14, é possível expressar a segunda equação em função da resistência série do módulo (RS_{mod}) (5.20),

$$RS_{mod} = \frac{V_{mod} - \sum_{i=1}^{N_{cel}} V_T \ln\left(\frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{C}\right)}{I} \quad (5.20).$$

A resistência série do módulo (RS_{mod}) e o fator de calibração (C) serão utilizados em etapas subsequentes neste trabalho. A seguir, as adaptações feitas ao modelo serão descritas.

5.10.2 Adaptação do Modelo

Para a aplicação do modelo proposto por Potthoff et al. [10] ao módulo utilizado neste trabalho, adotou-se uma adaptação coerente com as características geométricas e elétricas do dispositivo analisado. As imagens de eletroluminescência empregadas nesta

etapa correspondem às obtidas após os procedimentos de configuração experimental, registro, pré-processamento e segmentação descritos nas subseções anteriores.

A caracterização geométrica necessária ao modelo foi realizada a partir de duas grandezas:

- A área de contato por interconector (A_c).
- O comprimento médio dos interconectores (l).

Ambos foram determinados por medição manual, em vista superior, utilizando paquímetro, garantindo correspondência entre as dimensões instrumentais e o arranjo físico real do módulo.

As áreas transversais da fita de cobre (A_{cu}) e do revestimento de estanho (A_{sn}), bem como os valores da resistividade elétrica dos materiais (ρ_{cu} e ρ_{sn}) e da resistência de contato específica (k), foram adotados conforme os parâmetros apresentados por Potthoff et al. [10], assegurando consistência com o modelo de referência.

A subseção seguinte descreve o procedimento utilizado para a obtenção da distribuição espacial de resistência série em nível de pixel, a partir das imagens de EL previamente segmentadas.

5.11 Estimativa da Distribuição Espacial da Resistência Série Utilizando Eletroluminescência Residual

A distribuição espacial da resistência série em dispositivos fotovoltaicos pode ser obtida por meio da análise da emissão eletroluminescente sob polarização direta. Cada pixel da imagem de EL representa uma região local da célula fotovoltaica, permitindo associar a intensidade registrada às propriedades elétricas dessa região. Assim, a imagem pode ser interpretada como uma discretização espacial do dispositivo, na qual variações morfológicas ou defeitos influenciam diretamente a emissão radiativa e, conseqüentemente, a resistência série local.

Com base nesse princípio, este trabalho emprega uma adaptação do método descrito em [26] para estimar a resistência série em nível de pixel. O procedimento utiliza duas imagens de EL residual, previamente pré-processadas e segmentadas, para compor um mapa espacial de R_s para cada célula do módulo. As etapas específicas de modelagem e cálculo da resistência série local são apresentadas nas subseções seguintes.

5.11.1 Descrição Geral de Kropp *et al.* [26]

Kropp *et al.* [26] é uma referência com mais de 25 citações que discorre acerca da predição da perda de potência através de imagem de eletroluminescência de dispositivos

fotovoltaicos danificados. Um dos objetivos específicos dos autores é o mapeamento da resistência série local a partir da metodologia de Potthoff *et al.* em [10] adaptada, descrita na seção 5.10.

O presente trabalho, por sua vez, adapta [26] ao mapear a resistência série local através de imagens de eletroluminescência (EL) residual, obtidas através de câmera comercial. A seguir, a modelagem de Kropp *et al.* em [26] será apresentada, iniciando-se pela simplificação do modelo de um diodo.

Simplificação do Modelo de Um Diodo

O modelo de um diodo, amplamente utilizado para representação do dispositivo fotovoltaico, é simplificado quando consideramos uma resistência paralelo idealizada (infinita) e uma corrente fotogerada nula (sem radiação incidente, no escuro). Com a simplificação adotada, o modelo passa a ser descrito por

$$V_i = V_{i,c} - J_{i,c} r_{i,s} \quad (5.21),$$

em que, em polarização direta, V_i é a tensão aplicada a junção; $V_{i,c}$ é a tensão aplicada aos polos do circuito, $J_{i,c}$ é a densidade de corrente que flui através do circuito; e $r_{i,s}$ é a resistência série local (analogamente, $R_{int}(x)$ em [10]); o índice i representa o índice do *pixel*, e será utilizado no decorrer do presente trabalho.

Simplificado o modelo, a resistência série local de referência ($r_{i,ref}$), será descrita a seguir.

Resistencia Série Local de Referência

Diferentemente da abordagem de Potthoff *et al.* em [10], em [26] a resistência série local ($r_{i,s}$), não é negligenciável, mesmo no ponto de maior intensidade luminescente. Neste ponto, a resistência série local ($r_{i,s}$) é considerada a resistência série local de referência ($r_{i,ref}$), pois, quando definida, todas as outras resistências série locais da célula podem ser calculadas em relação a esta.

Para obter a resistência série local de referência ($r_{i,ref}$), é necessária a definição de outra grandeza: a resistência série média de uma célula livre de defeitos ($r_{s,sd}$), a qual resulta da seguinte relação,

$$r_{s,sd} = \frac{RS_{mod}}{A_c N} \quad (5.22),$$

em que, RS_{mod} é a resistência série do módulo, A_c é a área da célula e N é o número de células no módulo. Kropp *et al.* em [26] obtiveram RS_{mod} a partir dos dados fornecidos pelo fabricante na folha de dados do dispositivo fotovoltaico (DFV). No presente trabalho, outras abordagens foram adotadas e serão discutidas em seções subsequentes.

Dada a resistência série média de uma célula livre de defeitos ($r_{s,sd}$) estabelecida, a resistência série local de referência ($r_{i,ref}$) é assumida diretamente proporcional a $r_{s,sd}$, através de um desvio estatístico (d_{rs}) (Equação 5.23),

$$r_{i,ref}(x_0, y_0) = d_{rs} r_{s,sd} \quad (5.23),$$

em que, $r_{i,ref}(x_0, y_0)$ utiliza uma indexação cartesiana para representação das coordenadas dos pixels na imagem, que será adotada também nas equações subsequentes.

O desvio estatístico (d_{rs}) é assumido constante para todas as células, considerando-se flutuações espaciais similares para estas. Para explicar a obtenção do d_{rs} outras definições precisam ser feitas, como a obtenção da resistência série local apresentada a seguir.

Resistencia Série Local

Para a obtenção da resistência série local, algumas relações são estabelecidas. Assim, partindo-se da relação entre a luminescência local e tensão local aplicada à junção p-n (Equação 5.21) e da equação do diodo ideal (Equação 3.6), existe uma dependência exponencial (Equação 5.24) entre a densidade de corrente local ($J_i(x, y)$) e a luminescência local ($\Phi_i(x, y)$),

$$\frac{\Phi_i(x, y)}{C} = \exp\left(\frac{V_i(x, y)}{n_{id}V_T}\right) = \frac{J_i(x, y)}{J_0} \quad (5.24),$$

em, C é o fator de calibração que representa as propriedades ópticas e materiais do dispositivo fotovoltaico, descrito na seção 5.10 (Equação 5.19); $V_i(x, y)$ a tensão de junção local; n_{id} é o fator de idealidade do diodo; V_T é a tensão térmica; e J_0 é a densidade de corrente de saturação.

Assim, ao se explicitar a Equação 5.11.1.3.1 em função da densidade de corrente local, evitando-se o termo exponencial (Equação 5.25), tem-se que,

$$J_i(x, y) = J_0 \left(\frac{\Phi_i(x, y)}{C} \right) \quad (5.25).$$

Mas também, ao se estabelecer a diferença entre a tensão de junção local de referência e qualquer tensão de junção local (Equação 5.26), tem-se que,

$$\begin{aligned} V_{i,ref}(x, y) - V_i(x, y) &= \\ &= \left(V_{i,c}(x, y) - \Delta V_{i,ref}(x_0, y_0) \right) - \left(V_{i,c}(x, y) - \Delta V_i(x, y) \right) \\ &= \Delta V_i(x, y) - \Delta V_{i,ref}(x_0, y_0) \end{aligned} \quad (5.26),$$

em que, $V_{i,c}(x, y)$ é a tensão aplicada aos terminais do circuito; $\Delta V_{i,ref}(x_0, y_0)$ é a variação de tensão através da resistência série local de referência; e $\Delta V_i(x, y)$ a variação de tensão através da resistência série local.

Essa diferença de tensões também é obtida ao se expressar a equação (Equação 5.11) em função dessa diferença. Assim, também chegamos a diferença entre a tensão de junção local de referência e qualquer tensão de junção local (5.27),

$$n_{id}V_T \left[\ln\left(\frac{\Phi_{i,ref}(x, y)}{C}\right) - \ln\left(\frac{\Phi_i(x, y)}{C}\right) \right] =$$

$$= n_{id} V_T \ln \left(\frac{\Phi_{i,ref}(x,y)}{\Phi_i(x,y)} \right) \quad (5.27).$$

Como,

$$\Delta V_i(x, y) - \Delta V_{i,ref}(x_0, y_0) = J_i r_{i,s}(x, y) - J_{i,ref} r_{i,ref}(x_0, y_0),$$

então, substituindo a Equação 5.27 na Equação 5.26, temos que,

$$n_{id} V_T \ln \left(\frac{\Phi_{i,ref}(x_0, y_0)}{\Phi_i(x,y)} \right) = J_i r_{i,s}(x, y) - J_{i,ref} r_{i,ref}(x_0, y_0) \quad (5.28).$$

Expressando-se a Equação 5.28 em função de $r_{i,s}(x, y)$ e substituindo as Equações 5.23 e 5.25 na Equação 5.28, obtemos a resistência série local (Equação 5.29),

$$r_{i,s}(x, y) = \frac{n_{id} V_T \ln \left(\frac{\Phi_{i,ref}(x,y)}{\Phi_i(x,y)} \right) + J_0 \left(\frac{\Phi_{i,ref}(x_0, y_0)}{C} \right) d_{rs} r_{s,sd}}{J_0 \left(\frac{\Phi_i(x,y)}{C} \right)} \quad 5.29.$$

Como a definição da $r_{i,s}$ (Equação 5.29) depende do desvio estatístico (d_{rs}), o d_{rs} será detalhado na subseção seguinte.

Desvio Estatístico

Em 5.11.1.2, a resistência série local de referência $r_{i,ref}(x_0, y_0)$ é obtida através da resistência série média de uma célula livre de defeitos $r_{s,sd}$ e de um desvio estatístico d_{rs} (Equação 5.23). Esse desvio é calculado iterativamente através do método da bissecção.

Para isso:

1. É definido um desvio estatístico (d_{rs}) inicial em que $d_{rs} \gg 1$.
2. Em seguida é obtido um mapa de resistências serie locais inicial através da Equação 5.29.
3. Com o mapa, é definida uma resistência série local média de uma célula livre de defeitos do módulo ($r_{k,s}$) a partir da média aritmética do mapa.
4. Ajusta-se o d_{rs} iterativamente pelo método da bissecção até que a resistência série local média de uma célula ($i = k$) livre de defeitos do módulo ($r_{k,s}$) seja igual a resistência série de uma célula livre de defeitos ($r_{s,sd}$) (obtida a partir da folha de dados);
5. Toda a simulação deve ser avaliada dentro de um intervalo de expectativa do fator de idealidade n_{id} .

Essas etapas do modelo de Kropp *et al.* em [26] finalizam a metodologia necessária para a determinação do mapa de resistência série locais através de imagem de eletroluminescência. As adaptações ao modelo serão descritas a seguir.

5.11.2 Adaptação do Modelo

Neste trabalho, algumas entradas do modelo foram adaptadas, como a obtenção da resistência série do módulo (RS_{mod}) e da tensão térmica (V_T).

O primeiro parâmetro citado foi inicialmente atribuído com base nos valores de RS_{mod} obtidos pelo modelo de Potthoff et al. [10], descrito na seção 5.10.

A tensão térmica (V_T) foi determinada a partir de valores médios de tensão, considerando a variação da tensão aplicada durante o processo. Essa variação decorre do tempo de exposição das imagens, superior ao relatado na literatura, devido à utilização de uma câmera comercial e à ausência de controle preciso de temperatura durante os ensaios.

Além disso, a resistência série global foi estimada por duas abordagens complementares, com o propósito de calibrar e validar o modelo baseado em eletroluminescência residual.

Cada uma delas foi selecionada por representar perspectivas distintas e complementares de caracterização da resistência série:

- Dados de datasheet, fornecem uma referência teórica, baseada em parâmetros nominais definidos pelo fabricante, permitindo verificar se o modelo proposto se mantém coerente com as especificações de projeto do módulo;
- Inclinação da curva I–V próxima à tensão de circuito aberto (V_{oc}), representa uma avaliação experimental direta da resistência série, a partir de medições elétricas do próprio módulo;

A utilização combinada desses dois métodos permitiu avaliar a consistência, as limitações e a aplicabilidade prática da metodologia proposta, comparando seus resultados a abordagens consolidadas de determinação de R_s .

Os resultados e comparativos entre os métodos são discutidos nas seções seguintes.

5.12 Comparativo de Métodos para Resistências Séries do Módulo Fotovoltaico

Dando continuidade à análise da resistência série, este capítulo apresenta três métodos distintos de estimativa da resistência série do módulo fotovoltaico (RS_{mod}). Os métodos analisados são:

- Estimativa a partir de dados de datasheet (seção 5.12.1);
- Estimativa por meio da inclinação da curva I–V na região da tensão de circuito aberto (V_{oc}) (seção 5.12.2).

Todos os métodos foram aplicados ao módulo Komaes KM(P)5, e os valores obtidos foram posteriormente comparados à estimativa de RS_{mod} derivada de imagens de eletroluminescência, com o objetivo de avaliar a consistência e robustez do modelo proposto.

No método 5.12.2, foram utilizados dados experimentais da curva I–V como entrada para o modelo computacional. Esses dados foram obtidos e processados conforme

a norma IEC 60891:2009 [32], para as condições padrão de teste. Utilizou-se, para isso, o traçador de curva de carga modelo PV-KLA 4.4, com o software de interface PVK 5.11.

Inicialmente, apresenta-se o método baseado exclusivamente em informações disponíveis na folha de dados (datasheet) fornecida pelo fabricante. Esse método busca ajustar o modelo de um diodo por meio de aproximações iterativas, utilizando como referência os parâmetros elétricos nominais do módulo fotovoltaico.

5.12.1 Estimativa de RS_{mod} a Partir de Dados de Datasheet

O primeiro método empregado para a determinação da resistência série do módulo (RS_{mod}) baseia-se exclusivamente nas informações disponibilizadas pelo fabricante.

Nessa abordagem, R_s é estimada iterativamente a partir do modelo de um diodo [33], ajustando-se o par resistivo, resistência série (R_s) e resistência paralela (R_p), de modo que o ponto de máxima potência (P_{MP}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e a corrente de curto-circuito (I_{sc}) do modelo se aproximem dos valores nominais fornecidos na folha de dados.

A relação empregada para essa estimativa é expressa pela Equação (5.30):

$$R_p = \frac{V_{MP}(V_{MP} + I_{MP}R_s)}{\left\{V_{MP}I_L - V_{MP}I_0 \exp\left[\frac{(V_{MP} + I_{MP}R_s)q}{N_{cel}n_{id}kT}\right] + V_{MP}I_0 - P_{MPdatasheet}\right\}} \quad (5.30),$$

em que V_{MP} é a tensão de máxima potência; I_{MP} é a corrente de máxima potência; I_L é a corrente fotogerada; I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo; N_{cel} é o número de células em série; n_{id} é o fator de idealidade do diodo; q é a carga elementar do elétron; k é a constante de Boltzman; T é a temperatura absoluta; e $P_{MPdatasheet}$ é o ponto de máxima potência indicado pelo fabricante.

Esse procedimento fornece uma estimativa teórica inicial de R_s e R_p , servindo como referência para calibração e comparação com os resultados obtidos pelos métodos experimentais e baseados em eletroluminescência.

5.12.2 – Estimativa de RS_{mod} Por Meio da Inclinação da Curva I–V na Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})

A segunda abordagem para determinação da resistência série do módulo (RS_{mod}) baseia-se na análise direta da curva característica corrente–tensão (I–V).

Próximo à tensão de circuito aberto (V_{oc}), a influência da resistência série se manifesta pelo arredondamento da curva, à medida que a corrente se aproxima de zero.

Nessa região, a resistência equivalente pode ser obtida a partir do inverso da derivada da corrente em relação à tensão. Como a curva I–V apresenta comportamento decrescente, o valor resultante é negativo, sendo necessário considerar o seu módulo para manter a coerência física do parâmetro.

A relação é expressa pela Equação 5.31:

$$RS_{mod} = - \left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=V_{OC}}^{-1} \quad (5.31).$$

A derivada foi obtida a partir do ajuste da curva I–V experimental, realizada por interpolação cúbica suavizada utilizando o método `UnivariateSpline`, disponível no módulo `scipy.interpolate` da biblioteca `SciPy`, implementada em linguagem Python.

Esse procedimento fornece uma estimativa experimental direta da resistência série global do módulo, servindo como referência complementar ao método baseado em dados de catálogo. Os resultados obtidos por esta e pelas demais abordagens serão comparados no capítulo seguinte, a fim de avaliar a consistência entre os métodos e a adequação do modelo proposto às características reais do dispositivo.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

Dando continuidade à aplicação prática dos métodos descritos nos capítulos anteriores, este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos ao longo das etapas experimentais e computacionais desenvolvidas neste trabalho.

Inicialmente, são apresentados os ensaios realizados para determinação do foco ótimo das imagens de eletroluminescência, parâmetro essencial para assegurar a nitidez e a reprodutibilidade dos registros. Em seguida, são discutidos os resultados referentes à relação entre tempo de exposição e ISO, bem como à avaliação da qualidade de imagem segundo o critério SNR_{50} definido pela norma IEC TS 60904-13 [31].

Na sequência, são apresentados os resultados das etapas de pré-processamento, abrangendo as correções de artefatos, campo plano e fundo, e os resultados da segmentação das células fotovoltaicas, obtidos a partir das imagens no espectro visível.

Com base nas imagens pré-processadas e segmentadas, são então apresentadas as estimativas de resistência série do módulo fotovoltaico Komaes KM(P)5, tanto em escala global quanto local. Inicialmente, são comparados os valores globais obtidos por três abordagens distintas:

- Análise de imagens de eletroluminescência residual (seção 5.10);
- Estimativa a partir de dados de datasheet (seção 5.12.1); e
- Estimativa por meio da inclinação da curva I–V na tensão de circuito

aberto (V_{oc}) (seção 5.12.2).

Por fim, com base nos valores globais estimados, é proposta a resolução espacial da resistência série do módulo. A partir da metodologia apresentada na seção 5.11, são construídos mapas de resistência série por pixel, permitindo a análise da distribuição interna desse parâmetro, a reconstrução da resistência série de cada célula (RS_{cel}) e a identificação de regiões com comportamento anômalo por meio de limiares estatísticos.

Este capítulo, portanto, integra análises qualitativas, quantitativas e visuais, proporcionando uma caracterização abrangente da resistência série em dispositivos fotovoltaicos.

6.1 Determinação do Foco das Imagens de Eletroluminescência

A definição do foco é uma etapa essencial para assegurar a nitidez e a confiabilidade das imagens de eletroluminescência (EL). O ajuste inadequado pode introduzir distorções e comprometer a análise quantitativa posterior. Nesta subseção são apresentados os resultados obtidos na avaliação da nitidez de imagens de EL e de espectro visível em diferentes configurações de foco manual.

Nas Figuras 6.1 e 6.2 são apresentados, respectivamente, os conjuntos de imagens de eletroluminescência e de espectro visível obtidos em diferentes níveis de foco manual. Observa-se que a nitidez das imagens de EL varia significativamente entre as configurações avaliadas, evidenciando sensibilidade do fenômeno eletroluminescente ao ajuste focal, mesmo quando o enquadramento e a distância entre câmera e dispositivo permanecem constantes.

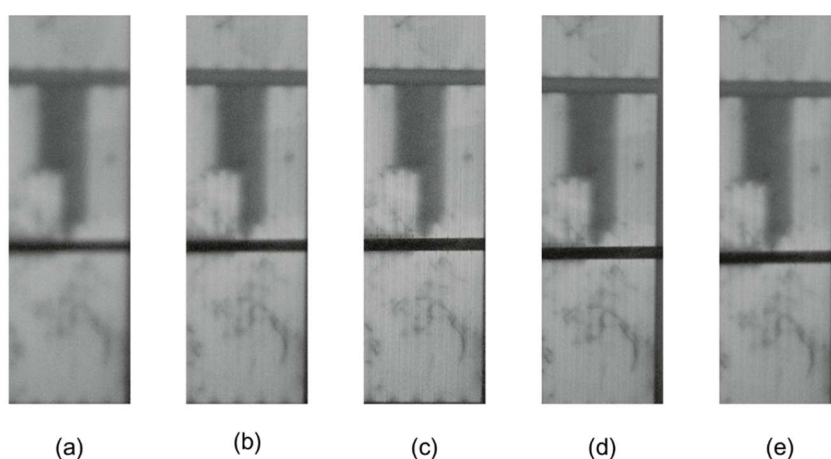


Figura 6.1: Comparativo da mesma região de pixels em imagens de Eletroluminescência com diferente foco manual. Figura 6.1 (c) apresenta percepção visual de melhor nível de foco relativo entre as imagens. Fonte: Produzida pelo autor.

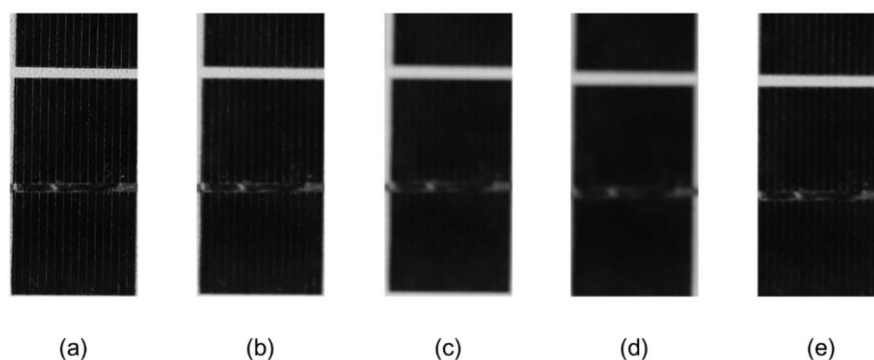


Figura 6.2: Comparativo da mesma região de pixels em imagens de DFV em espectro visível com mesmo setup e foco manual diferente. Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 6.3 são apresentados os valores da métrica Tenengrad calculados para as cinco imagens de EL analisadas. O maior valor encontrado corresponde à imagem ilustrada na Figura 6.1(c), indicando que essa configuração apresenta o melhor foco relativo dentre todas as avaliadas. Essa tendência também pode ser verificada visualmente pelas bordas mais definidas e maior contraste entre regiões emissivas e não emissivas.

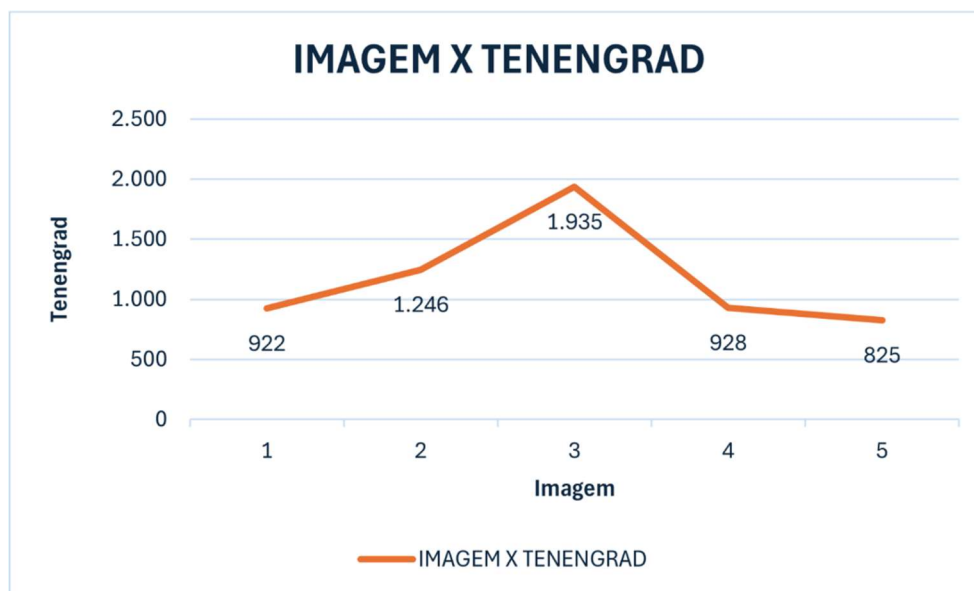


Figura 6.3: Tenengrad de imagens de Eletroluminescência com mesmo setup e foco manual diferente. Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 6.4 são apresentados os valores da métrica Tenengrad obtidos para as imagens no espectro visível registradas com as mesmas configurações de foco manual

utilizadas nas imagens de EL. O valor associado à imagem visível correspondente à Figura 6.2 (c) foi adotado como referência para o foco, uma vez que coincide com o melhor foco relativo identificado nas imagens de EL.

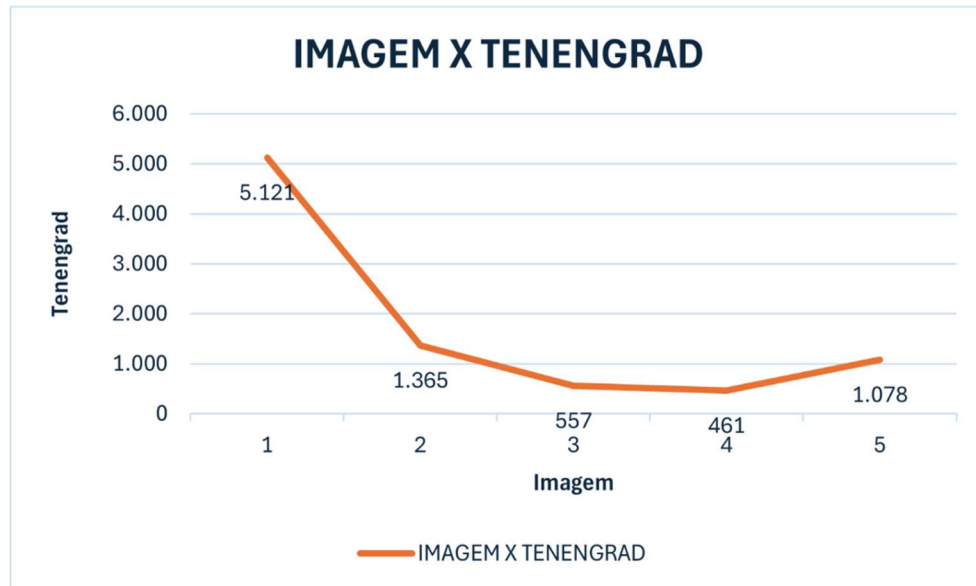


Figura 6.4: Tenengrad de imagens de DFV em espectro visível com mesmo setup e foco manual diferente. Fonte: Produzida pelo autor.

Os resultados indicam que há uma correspondência direta entre a nitidez observada no espectro visível e a nitidez das imagens de EL, de modo que o uso da métrica Tenengrad em imagens visíveis permite identificar, de forma não invasiva, o ponto focal que maximiza a resposta eletroluminescente. Esse comportamento confirma a possibilidade de utilizar a imagem visível como referência operacional para ajuste de foco, evitando a necessidade de múltiplas tentativas com o DFV polarizado.

Em síntese, os resultados demonstram que:

- A métrica Tenengrad é sensível às diferenças de foco tanto no espectro visível quanto na eletroluminescência;
- O ponto de foco que maximiza o Tenengrad em EL não coincide com o ponto de foco que maximiza o Tenengrad em espectro visível; e
- A correspondência entre ambos permite estimar o melhor foco de EL a partir de ajustes feitos com iluminação convencional, reduzindo o tempo de experimentação e evitando aquecimento desnecessário do DFV.

6.2 Relação ISO × Tempo de Exposição × SNR50:

Após a determinação do melhor ponto de foco relativo para o registro das imagens de eletroluminescência, procedeu-se à avaliação da influência dos parâmetros de aquisição, tempo de exposição e ganho (ISO), sobre a qualidade das imagens.

Essa análise tem por objetivo identificar as combinações que maximizam a relação sinal-ruído (SNR₅₀), garantindo registros com intensidade adequada e mínima saturação de pixels, conforme os critérios de qualidade definidos na norma IEC TS 60904-13 [31].

Na Tabela 6.1 são apresentados os valores obtidos experimentalmente para as combinações de ISO (200, 400 e 800) e tempos de exposição (60 s, 120 s, 240 s e 480 s). Para cada configuração, são exibidas a intensidade média da imagem, a saturação percentual dos pixels e o valor correspondente de SNR₅₀.

Tabela 6.1: Relação Parâmetros-Intensidade Média-SNR₅₀. Fonte: Produzida pelo autor.

Ganho (ISO)	Tempo de Exposição	Intensidade Média	Saturação Percentual	SNR ₅₀
200	60	22,16	0,000017	26,70
200	120	42,50	0,000021	35,42
200	240	76,06	0,000233	46,65
200	480	120,61	6,457783	58,20
400	60	43,12	0,000042	25,37
400	120	76,59	0,000329	32,24
400	240	121,07	7,105300	43,59
400	480	161,90	54,614100	67,65
800	60	74,21	0,000117	26,30
800	120	117,94	4,906738	40,52
800	240	159,91	54,182333	68,13
800	480	199,26	72,302375	101,78

Observa-se que o aumento do tempo de exposição promove elevação consistente na intensidade média e na SNR₅₀ para todos os valores de ISO. Entretanto, essa tendência é acompanhada por crescimento significativo da saturação percentual, particularmente para ISO 400 e 800, nos quais tempos de exposição acima de 240 s resultam em saturações superiores a 50%. Esse comportamento indica que a SNR₅₀ elevada obtida nessas configurações não representa, necessariamente, uma melhoria na qualidade da imagem, pois deriva de saturação excessiva em porções relevantes do módulo.

Para ISO 200, a saturação permanece baixa mesmo no maior tempo de exposição, atingindo valores inferiores a 7% em 480 s, o que sugere que esse nível de ganho apresenta melhor equilíbrio entre intensidade registrada e preservação da integridade do sinal. Embora a SNR₅₀ obtida em ISO 200 seja inferior às registradas para ISO 400 e 800 em tempos longos, seu menor nível de saturação permite uma representação mais fiel do sinal eletroluminescente.

O comportamento descrito indica que a combinação ISO 200 e tempo de exposição de 480 s apresenta melhor compromisso entre SNR₅₀, intensidade média e saturação percentual para o setup experimental empregado, evitando distorções que comprometeriam a avaliação do sinal e mantendo a imagem dentro das recomendações da IEC TS 60904-13 [31].

6.2.1 Ajuste Polinomial

Com o objetivo de modelar a relação entre SNR₅₀, ganho (ISO) e tempo de exposição, aplicou-se o ajuste polinomial descrito na Equação (5.5). Os coeficientes do ajuste obtidos encontram-se na Tabela 6.2 e a superfície ajustada é apresentada na Figura 6.5. O modelo apresentou elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99388$) e baixo erro absoluto médio (MAE = 1,31506), indicando forte aderência aos dados experimentais.

Tabela 6.2: Coeficientes de ajuste polinomial. Fonte: Produzida pelo autor.

Coeficiente	Valor
a	$6,67793 \times 10^{-05}$
b	-0,00012
c	0,00018
d	-0,07802
e	0,10175
f	33,21503

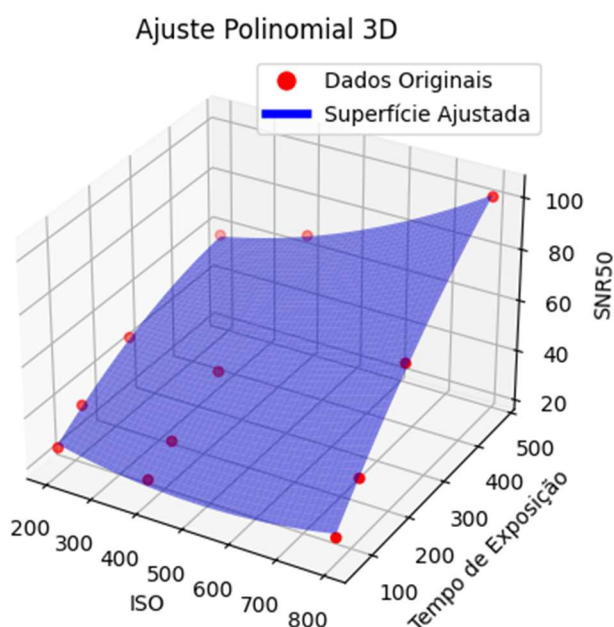


Figura 6.5: Superfície de Ajuste Polinomial ISO X Tempo de Exposição X SNR₅₀.
Fonte: Produzida pelo autor.

Visualmente, observa-se que o modelo captura adequadamente o comportamento crescente da SNR_{50} com o aumento do ISO e do tempo de exposição, reproduzindo a região de saturação da superfície experimental. Esses resultados demonstram que o ajuste polinomial proposto é adequado para prever a SNR_{50} do arranjo utilizado e para auxiliar na seleção de configurações de captura considerando o controle de saturação durante a seleção de parâmetros.

6.2.2 Síntese dos Resultados

Os resultados indicam que:

- A SNR_{50} aumenta com ISO e tempo de exposição;
- O aumento simultâneo leva a saturações elevadas, que distorcem o sinal;
- ISO 200 reduz a saturação de forma significativa;
- tempos longos (até 480 s) maximizam a relação sinal-ruído sem comprometer os níveis de saturação nesse ISO;
- O ajuste polinomial reproduz adequadamente a resposta do sistema e pode ser utilizado como ferramenta auxiliar de seleção de parâmetros.

Assim, ISO 200 e tempo de exposição de 480 s constituem a configuração mais adequada para o registro de imagens de EL no setup experimental deste trabalho.

6.3 Resultados do Pré-Processamento das Imagens de EL

Após a definição dos parâmetros ótimos de registro, foco, tempo de exposição e ISO, as imagens obtidas passaram por um conjunto de etapas de pré-processamento destinadas a eliminar artefatos, reduzir ruídos e corrigir não-uniformidades provenientes do sistema óptico e do sensor da câmera. O objetivo desta etapa é garantir que o sinal eletroluminescente registrado represente, de forma quantitativa e fiel, as características reais de emissão do dispositivo fotovoltaico, servindo de base para a análise e estimação das resistências série nas seções subsequentes.

Nas Figuras 5.9 a 5.14 são apresentados os efeitos progressivos das etapas de pré-processamento aplicadas às imagens de eletroluminescência. A seguir, discute-se o impacto de cada processamento na qualidade e na confiabilidade dos dados obtidos.

6.3.1 Imagem Bruta (Figura 5.9)

Na Figura 5.9 é apresentada a imagem original registrada antes de qualquer correção. Observa-se a presença de artefatos aleatórios de alta intensidade, não-uniformidades espaciais, variações significativas no nível de fundo e zonas de ruído térmico. Esses efeitos comprometem tanto a interpretação visual quanto qualquer análise

quantitativa subsequente, evidenciando a necessidade de um pipeline de pré-processamento robusto.

6.3.2 Correção de Efeitos de Tempo Único – STE (Figura 5.10)

Após a remoção dos efeitos de tempo único, conforme ilustrado na Figura 5.10, percebe-se a eliminação de pixels isolados de intensidade anômala, que se manifestavam como pontos brilhantes esparsos. A imagem corrigida apresenta maior consistência espacial, removendo eventos não reprodutíveis associados à incidência de partículas de alta energia no sensor.

Essa etapa evita distorções nos valores médios de intensidade e melhora a qualidade do sinal de interesse, sobretudo em regiões de baixa emissão luminescente.

6.3.3 Correção de Fundo (Figura 5.11)

A Figura 5.11 demonstra que a remoção da *dark current* e do ruído térmico reduz significativamente o nível de base da imagem. A região anteriormente dominada por ruído passa a apresentar sinal próximo ao zero, como esperado para áreas sem emissão luminescente.

Além disso, a estrutura espacial do sinal torna-se mais nítida, com melhor separação entre regiões emissivas e não emissivas. A correção de fundo também reduz gradientes artificiais no plano da imagem, permitindo comparação direta entre diferentes áreas do módulo fotovoltaico.

6.3.4 Correção de Campo Plano – Flat-Field (Figura 5.12)

A correção de campo plano, apresentada na Figura 5.12, remove não-uniformidades de iluminação e a vinheta introduzida pelo sistema óptico. A intensidade registrada torna-se mais homogênea em toda a superfície, eliminando variações artificiais associadas à lente, à posição relativa do sensor e às diferenças locais de ganho no detector.

Como resultado, a imagem passa a refletir com maior fidelidade a distribuição espacial real da emissão eletroluminescente, essencial para análises quantitativas como mapeamento de resistência série.

6.3.5 Correção de Artefatos Residuais – Filtro Mediano (Figura 5.13)

A aplicação do filtro mediano (Figura 5.13) reduz artefatos remanescentes de alto gradiente, preservando transições reais do sinal ao mesmo tempo em que suaviza pequenas irregularidades. O processamento elimina pixels defeituosos adicionais, que não haviam sido suprimidos nas etapas STE e de fundo, e contribui para tornar a imagem mais estável e representativa.

6.3.6 Remoção de Ruído por Médias Não Locais – NLMD (Figura 5.14)

Na Figura 5.14 é apresentado o resultado após a aplicação do método NLMD. Observa-se uma expressiva redução do ruído de alta frequência, mantendo, contudo, as estruturas espaciais características do módulo. O algoritmo preserva bordas e regiões de gradiente suave, garantindo que as informações relevantes para análises posteriores, como contraste local e padrões espaciais, permaneçam intactas.

O resultado constitui uma imagem com elevada relação sinal-ruído, isenta de artefatos perceptíveis e adequada para quantificação da emissão luminescente, permitindo posterior estimação de resistência série global e espacial.

6.4 Resultados da Segmentação das Células Fotovoltaicas

Concluídas as etapas de pré-processamento e assegurada a integridade das imagens de eletroluminescência, procedeu-se à segmentação das células fotovoltaicas.

Essa etapa tem por finalidade delimitar espacialmente cada célula do módulo, de modo que as análises posteriores de resistência série possam ser realizadas de forma independente para cada região ativa. As máscaras geradas a partir das imagens do espectro visível foram aplicadas às imagens de EL pré-processadas, permitindo o isolamento geométrico preciso das células constituintes do módulo.

Na Figura 5.15 é apresentado o resultado da segmentação das células fotovoltaicas, obtido a partir das máscaras geradas nas imagens do espectro visível e aplicadas às imagens de EL pré-processadas. A segmentação permitiu isolar de forma consistente cada uma das 36 células do módulo, mantendo a integridade geométrica das regiões e preservando as bordas reais observadas no dispositivo.

A opção pela segmentação manual mostrou-se adequada para este estudo, pois assegurou a delimitação precisa das células, condição que não havia sido alcançada com a segmentação semântica baseada em *U-Net*. Como consequência, as regiões segmentadas apresentam contornos regulares e coerentes com a geometria do módulo, proporcionando uma base confiável para o cálculo da resistência série espacial.

Em síntese, os resultados demonstram que:

- As máscaras segmentaram corretamente todas as células sem perda de geometria;
- A segmentação manual garantiu precisão espacial superior às tentativas de segmentação automática;
- As imagens segmentadas estão adequadas para estimação de resistência série global por célula e para composição do mapa espacial de R_s .

Esses resultados fornecem a base necessária para as próximas etapas do estudo, nas quais os métodos de extração de resistência série são aplicados às células individualmente segmentadas e ao módulo como um todo.

6.5 Resultados das Imagens de Eletroluminescência Utilizadas no Modelo

Com as células devidamente segmentadas e as imagens de eletroluminescência tratadas nas etapas anteriores, deu-se início à aplicação dos métodos de estimação de resistência série.

As imagens resultantes do pré-processamento e da segmentação representam o conjunto final de dados de entrada para o modelo adaptado de Potthoff et al. [10], constituindo a base para a análise comparativa e para a determinação da distribuição espacial da resistência série.

Nas Figuras 6.6 e 6.7 são apresentadas, respectivamente, as imagens de eletroluminescência registradas nos níveis de excitação $0,1 I_{sc}$ e I_{sc} , após as etapas de pré-processamento e segmentação descritas anteriormente. Essas imagens representam o ponto de partida para a aplicação do modelo adaptado de Potthoff et al. [10] e constituem a base para a obtenção da distribuição espacial de resistência série.

6.5.1 Imagem de EL a $0,1 I_{sc}$

A imagem adquirida a $0,1 I_{sc}$ (Figura 6.6) apresenta intensidade luminescente reduzida, como esperado para níveis baixos de corrente direta.

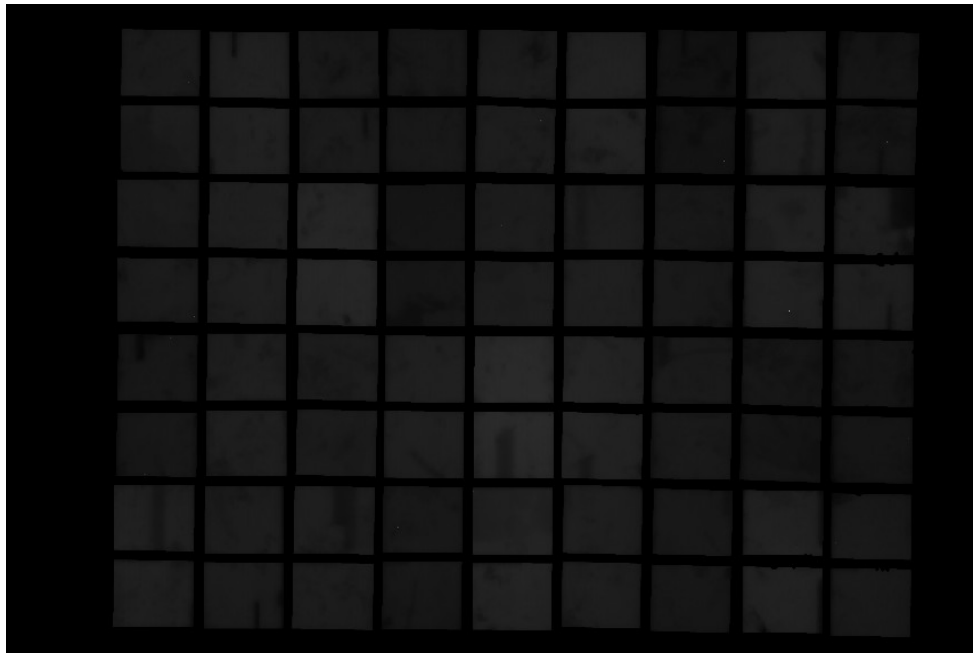


Figura 6.6: Imagem 8bits de Eletroluminescência a $0,1 I_{sc}$, pré-processada e segmentada. Fonte: Produzida pelo autor.

A segmentação evidencia o contorno de cada célula, permitindo que a emissão luminescente a $0,1 I_{sc}$ seja analisada de forma independente por região. Essa representação é essencial para a etapa de cálculo da R_s global do módulo e para a posterior obtenção do mapa espacial.

6.5.2 Imagem de EL a I_{sc}

A imagem registrada sob excitação igual à corrente de curto-circuito (Figura 6.7) apresenta aumento significativo no nível de emissão luminescente, revelando com maior clareza regiões de maior condutividade e eventuais descontinuidades.

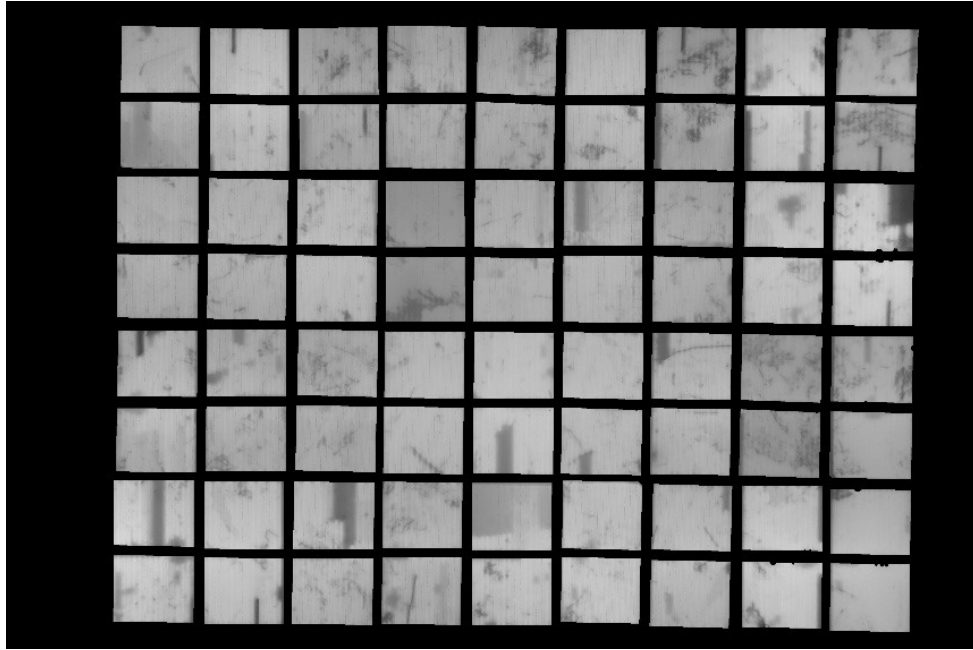


Figura 6.7: Imagem 8bits de Eletroluminescência a $1 I_{sc}$, pré-processada e segmentada.
Fonte: Produzida pelo autor.

A segmentação aplicada sobre essa imagem possibilita a análise comparativa entre as distribuições de intensidade sob diferentes níveis de corrente, permitindo identificar não linearidades locais que compõem a base da modelagem proposta.

6.6 Estimativa da Resistência Série do Módulo (RS_{mod}) Por Eletroluminescência

As imagens de eletroluminescência apresentadas anteriormente constituem a base experimental para a aplicação do modelo adaptado proposto. A partir dessas imagens, procedeu-se à estimativa da resistência série global do módulo, conforme descrito na metodologia. Essa etapa marca a transição entre o tratamento das imagens e a quantificação efetiva dos parâmetros elétricos do dispositivo, permitindo validar o desempenho do modelo sob condições reais de ensaio.

Com base na metodologia apresentada na seção 5.10, foi realizada a estimativa da resistência série do módulo a partir de imagens de eletroluminescência residual (EL) adquiridas em duas condições de corrente de curto-circuito (I_{sc}): $0,1 I_{sc}$ e I_{sc} .

Inicialmente, a resistência calculada por célula R_{cal} , obtida com o auxílio das componentes de resistência de contato (R_c) e resistência das fitas condutoras (R_f), resultou em aproximadamente $0,1828 \Omega/\text{célula}$. Esse valor associado ao baixo fluxo de corrente da imagem de $0,1 I_{sc}$ representa uma pequena queda de tensão sobre a resistência série, que foi negligenciada para tal condição.

Em seguida, a luminescência máxima de cada célula na imagem de $0,1 I_{sc}$ foi determinada e então foi aplicada a Equação 5.19 para o cálculo do fator de calibração (C). Dentre os dados utilizados nessa etapa, a tensão térmica (V_T) foi calculada para uma temperatura de 25°C. Já a tensão de operação do módulo variou entre 20,052 V e 20,64 V durante o ensaio de EL, a média dessa variação foi utilizada como tensão aplicada ao módulo. Com isso, o valor estimado do fator de calibração foi $C \approx 4,748 \times 10^{-9}$.

Com esse fator de calibração e a imagem obtida sob I_{sc} , utilizou-se a Equação 5.20 para estimar a resistência série do módulo fotovoltaico (RS_{mod}). Para isso, a máxima luminescência por célula foi determinada. Adotou-se também a tensão térmica (V_T) para temperatura de 25°C. E, como a tensão de operação do módulo variou entre 22,49 V e 23,21 V durante o registro da imagem, sua média foi utilizada. O valor obtido foi $RS_{mod} \approx 5,204 \Omega$.

Esse valor reflete a resistência série do módulo RS_{mod} sob condições de operação. Os parâmetros C e RS_{mod} serão utilizados para a estimação do mapa espacial de R_s .

6.7 Estimativa da Resistência Série do Módulo Fotovoltaico Através de Métodos Convencionais

Após a estimativa da resistência série global do módulo por meio das imagens de eletroluminescência residual, procedeu-se à aplicação de métodos convencionais para fins de comparação e validação dos resultados. Essa etapa visa verificar a coerência entre a metodologia proposta e abordagens consolidadas de determinação de resistência série em módulos fotovoltaicos, utilizando tanto dados de catálogo quanto medições experimentais da curva I–V.

Além da abordagem via EL, outros dois métodos foram aplicados para estimar RS_{mod} com base em dados elétricos do módulo, conforme descrito nas seções 5.11 e 5.12.

6.7.1 Estimativa de RS_{mod} a Partir de Dados de Datasheet

Primeiro, estimou-se a RS_{mod} por meio do ajuste iterativo dos parâmetros do modelo de um diodo aos dados nominais fornecidos pelo fabricante, conforme o método de Villalva et al. [33]. As curvas I–V e P–V resultantes são apresentadas na Figura 6.8, e os parâmetros ajustados correspondentes encontram-se na Tabela 6.3.

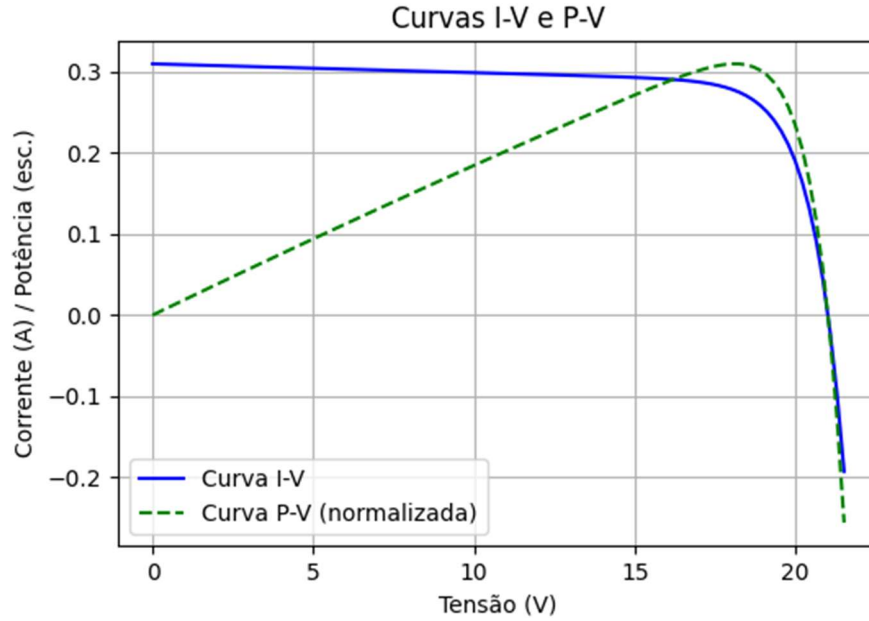


Figura 6.8: Curvas I-V e P-V ajustadas através de dados experimentais (datasheet) do módulo Komaes KM(P)5. Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 6.3: Parâmetros resultantes pelo método de Villalva et al. em [33]. Fonte: Produzida pelo autor.

$I_0 [A]$	n	$RS_{cel} [\Omega]$	$R_p [\Omega]$
$3,881 \times 10^{-11}$	1,020	0,141	917,841

Como RS_{cel} representa a resistência série média de uma célula do módulo Komaes KM(P)5, seu valor multiplicado pelo número de células (36) resulta em $RS_{mod} \approx 5,076 \Omega$.

6.7.2 Estimativa de RS_{mod} por Meio da Inclinação da Curva I–V na Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})

A segunda abordagem para estimar a resistência série baseia-se na inclinação da curva característica I–V próxima à tensão de circuito aberto (V_{oc}). Nessa região, a corrente tende a zero, e a inclinação da curva reflete diretamente o efeito resistivo interno do módulo. Assim, RS_{mod} pode ser determinada a partir do inverso da derivada $\frac{dI}{dV}$ calculada nesse ponto, conforme a Equação 5.31.

Para isso, os dados experimentais da curva I–V foram suavizados por meio de uma interpolação cúbica utilizando o método *UnivariateSpline*, disponível no módulo

`scipy.interpolate` da biblioteca *Python SciPy*. Esse procedimento elimina ruídos experimentais e permite estimar com precisão a derivada $\frac{dI}{dV}$ em torno de V_{oc} . Na Figura 6.9 é apresentada a curva ajustada.

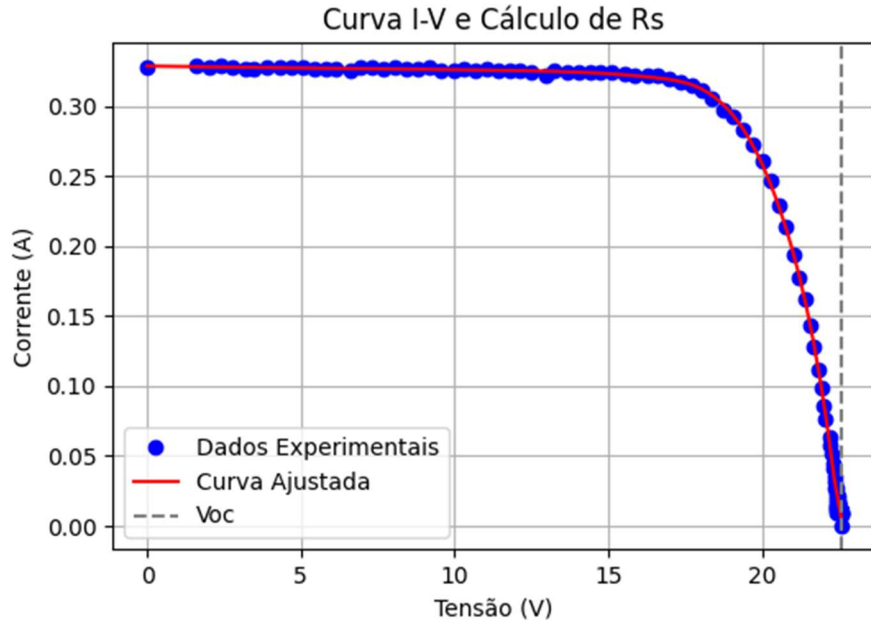


Figura 6.9: Curva I-V ajustada através de interpolação cúbica suavizada a partir de dados experimentais de módulo Komaes KM(P)5. Fonte: Produzida pelo autor.

Na Tabela 6.4 são apresentados os valores de resistência série por célula (RS_{cel}) obtidos para diferentes graus de suavização empíricos (s). O parâmetro s controla o equilíbrio entre fidelidade aos dados e suavidade da curva ajustada. Observou-se que, para valores de s no intervalo $[0,00034, 0,00018]$, a resistência estimada manteve-se estável, indicando convergência do método. Para s inferiores a 0,00018, os resultados tornaram-se instáveis ou fisicamente incoerentes.

Tabela 6.4: Grau de suavização do método *UnivariateSpline* do módulo *Python scipy.interpolate* e RS_{cel} resultante. Fonte: Produzida pelo autor.

Grau de suavização (s)	RS_{cel} resultante [Ω]
0,1	10,419
0,01	5,739
0,0005	2,022
0,00045	2,016
0,00044	1,742
0,00043	0,828
[0,00042 0,00039]	0,209
0,00038	-0,201
[0,00036 0,00035]	0,855
[0,00034 0,00018]	0,215
0,00017	-0,247
0,00005	-0,137
0,000039	NaN

O valor médio de $RS_{cel} = 0,215 \Omega$ foi adotado como representativo da resistência série por célula. Multiplicando esse valor pelo número total de células (36), obteve-se a resistência série global do módulo: $RS_{mod} \approx 7,740 \Omega$.

6.8 Comparação Entre Métodos de Obtenção do RS_{mod}

Após a aplicação dos diferentes métodos de estimação descritos anteriormente, foi realizada uma análise comparativa dos valores de resistência série global obtidos para o módulo fotovoltaico Komaes KM(P)5.

Os resultados apresentaram variações expressivas entre as abordagens. A partir da inclinação da curva I–V em V_{oc} , obteve-se $RS_{mod} = 7,740 \Omega$, enquanto o modelo analítico fundamentado em parâmetros de *datasheet* (Villalva et al. [33]) resultou em $RS_{mod} = 5,076 \Omega$. Já a estimativa baseada em imagens de eletroluminescência (EL) no escuro, conforme metodologia adaptada de Potthoff et al. [10], resultou em $RS_{mod} = 5,204 \Omega$.

Considerando o valor estimado pelo método de Villalva et al. [33] como referência, verificou-se que a estimativa obtida pela inclinação da curva I–V em V_{oc} foi aproximadamente 54% superior. A estimativa baseada em EL apresentou diferença menor que 3% em relação à referência, indicando forte concordância entre ambos os métodos.

Essas discrepâncias evidenciam a sensibilidade dos métodos de extração de parâmetros às condições experimentais, à natureza dos dados de entrada e às hipóteses de modelagem adotadas.

Com os valores de RS_{mod} estimados, torna-se possível projetar essa resistência em escala espacial, utilizando imagens de eletroluminescência para mapear a distribuição de R_s ao longo do módulo fotovoltaico. A próxima seção apresenta essa análise espacial, com os mapas de resistência absoluta e relativa por pixel, segmentação por célula e reconstrução dos valores de RS_{cel} e RS_{mod} .

Com base na comparação apresentada, o valor de RS_{mod} obtido pelo método de Eletroluminescência ($\approx 5,204 \Omega$) foi adotado como referência principal para a projeção espacial, por apresentar maior consistência com os resultados analíticos e melhor aderência às condições experimentais do módulo.

Contudo, considerando que a RS_{mod} se mostrou sensível ao método de obtenção, as demais estimativas, derivadas de *datasheet* ($5,076 \Omega$) e da inclinação I–V em V_{oc} ($7,740 \Omega$), também foram aplicadas de forma complementar, com o objetivo de avaliar como a variação de RS_{mod} afeta a distribuição espacial.

A seguir, a seção 6.4 apresenta a resolução espacial da resistência série obtida a partir dessas abordagens, incluindo os mapas absolutos, normalizados e segmentados por célula, bem como a análise de defeitos locais.

6.9 Resistência Série Resolvida Espacialmente Através da EL Residual

A resolução espacial da resistência série, conforme a metodologia apresentada no Capítulo 5, resulta na geração de mapas de resistência série local em escala absoluta. Esses mapas representam a magnitude da resistência em cada pixel e permitem avaliar a presença, bem como caracterizar o impacto local, de possíveis defeitos no dispositivo fotovoltaico (DFV).

Entretanto, como parte do processo de modelagem, a obtenção dos mapas de resistência série depende diretamente do valor absoluto da resistência série do módulo (RS_{mod}). Considerando que, conforme demonstrado na seção anterior, RS_{mod} apresenta sensibilidade em função do método de determinação, propõe-se também a avaliação da resistência série de forma normalizada. Essa abordagem busca expressar os resultados em valores relativos à máxima resistência observada no mapa, reduzindo a influência da escala absoluta e permitindo uma comparação estrutural mais coerente entre diferentes entradas para o método de obtenção de mapas de resistência série local.

Inicialmente, são apresentados e analisados os mapas de resistência série locais absolutos obtidos a partir de três abordagens distintas: (i) dados de *datasheet*; (ii) imagens de eletroluminescência; e (iii) inclinação da curva I–V no ponto de tensão de circuito aberto (V_{oc}). Em seguida, são avaliados os mapas de resistência série local relativa, expressos em percentuais, derivados das versões absolutas, possibilitando uma análise comparativa mais robusta da distribuição espacial da resistência série.

6.9.1 Mapas de Resistência Série Absoluta

Nas Figuras 6.10 a 6.12 é apresentada a distribuição espacial da resistência série local obtida com diferentes valores de resistência série absoluta do módulo (RS_{mod}). Esses mapas de resistência série absolutos, apresentam valores de resistência variáveis de acordo com a técnica aplicada para a obtenção do valor de RS_{mod} .

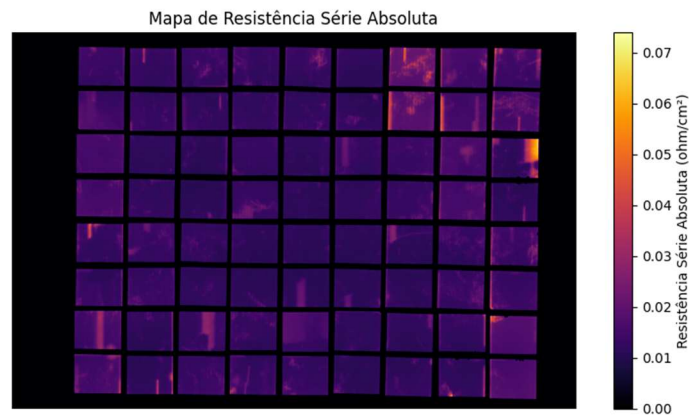


Figura 6.10: Mapa de Resistência Série Absoluta com $RS_{mod} = 5,076 \Omega$ Obtido Através de Dados de Datasheet. Fonte: Produzida pelo autor.

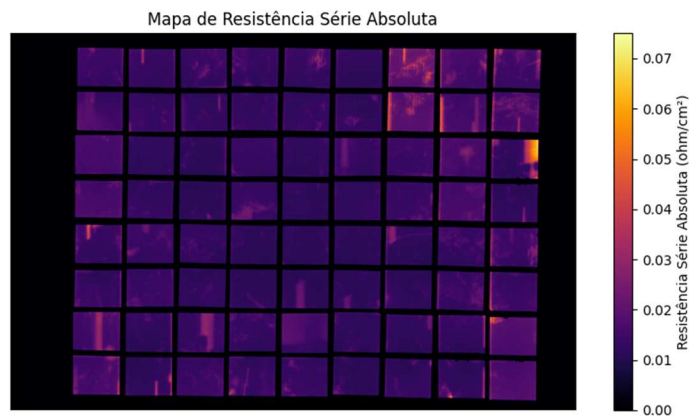


Figura 6.11: Mapa de Resistência Série Absoluta com $RS_{mod} = 5,204 \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.

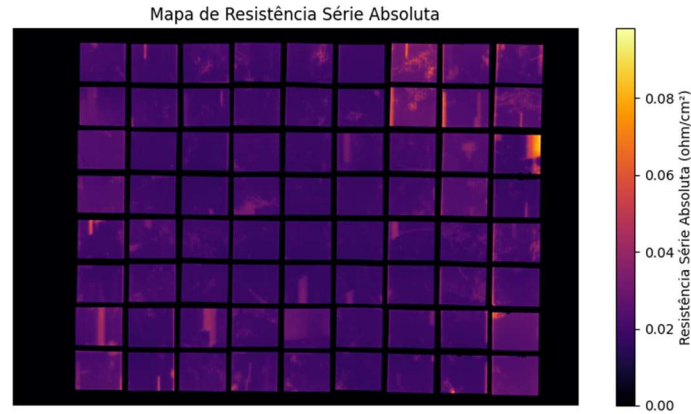


Figura 6.12: Mapa de Resistência Série Absoluta com $RS_{mod} = 7,740 \, \Omega$ Obtido Através da Inclinação da Curva I-V no Ponto da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}). Fonte: Produzida pelo autor.

O mapa de resistência série absoluta com $RS_{mod} = 5,076 \, \Omega$ (Figura 6.10), obtido através de dados de *datasheet*, ilustra valores de resistência entre $0,010 \, \Omega/\text{cm}^2$ e $0,074 \, \Omega/\text{cm}^2$. Já o mapa de resistência série absoluta com $RS_{mod} = 5,204 \, \Omega$ (Figura 6.11), obtido através de eletroluminescência residual, reproduz valores de resistência entre $0,010 \, \Omega/\text{cm}^2$ e $0,075 \, \Omega/\text{cm}^2$. E, por fim, mapa de resistência série absoluta com $RS_{mod} = 7,740 \, \Omega$ (Figura 6.12), obtido através da inclinação da curva I-V no ponto da tensão de circuito aberto (V_{oc}) apresenta valores de resistência entre $0,016 \, \Omega/\text{cm}^2$ e $0,098 \, \Omega/\text{cm}^2$.

Embora todos os mapas representem padrões espaciais similares, as métricas extraídas da comparação quantitativa entre os mapas revelam diferenças relevantes relacionadas à escala absoluta dos valores de resistência série (Tabela 6.5).

Tabela 6.5: Comparação entre Mapas de Resistência Série Absoluta. Fonte: Produzida pelo autor.

Comparação RS_{mod} [Ω]	MAE (Ω/cm^2)	MSE ($(\Omega/\text{cm}^2)^2$)	Pearson r	SSIM
5,076 vs 5,204	0,00019	0,0	1,0	0,99984
5,076 vs 7,740	0,00445	3×10^{-5}	0,99877	0,94561
5,204 vs 7,740	0,00426	3×10^{-5}	0,99892	0,95080

A comparação entre os mapas resultantes de RS_{mod} obtido através de dados de *datasheet* e EL (respectivamente $5,076 \, \Omega$ e $5,204 \, \Omega$) apresenta um alto índice de similaridade estrutural (SSIM, do inglês *Structural Similarity Index* = 0,99984), com diferença média desprezível (Erro Absoluto Médio, MAE, do inglês *Mean Absolute Error* = $0,00019 \, \Omega$), diferença quadrática média quase nula (MSE, do inglês *Mean Square*

Error) e correlação linear perfeita ($r = 1$), indicando que ambas as abordagens capturam padrões espaciais praticamente idênticos.

Por outro lado, o mapa gerado com base em valores de RS_{mod} obtidos através da inclinação da curva I-V no ponto da tensão de circuito aberto (V_{oc}) (7,740 Ω) apresenta diferenças estruturais moderadas em relação aos demais, com valores de SSIM entre 0,946 e 0,951, MAE na ordem de 0,0045 e 0,0043 Ω/cm^2 e MSE de 3×10^{-5} (Ω/cm^2)² para ambas as comparações (Tabela 6.5). Apesar de ainda manterem alta correlação linear ($r > 0,998$), esses resultados reforçam que o valor absoluto da resistência série total do módulo (RS_{mod}) afeta diretamente a escala dos valores mapeados.

A comparação do comportamento estatístico dos mapas também foi avaliada via diagrama de caixa (Figura 6.13). Observou-se, como esperado, que os mapas resultantes de RS_{mod} obtido através de dados de *datasheet* e EL ($RS_{mod} = 5,076 \Omega$ e $RS_{mod} = 5,204 \Omega$) apresentaram distribuições com valores médios e dispersão similares. Por outro lado, o mapa de resistência série absoluta com $RS_{mod} = 7,740 \Omega$ obtido através da inclinação da curva I-V no ponto da tensão circuito aberto (V_{oc}) apresenta mediana mais alta, maior dispersão e consequentemente valores mais elevados de resistência série local.

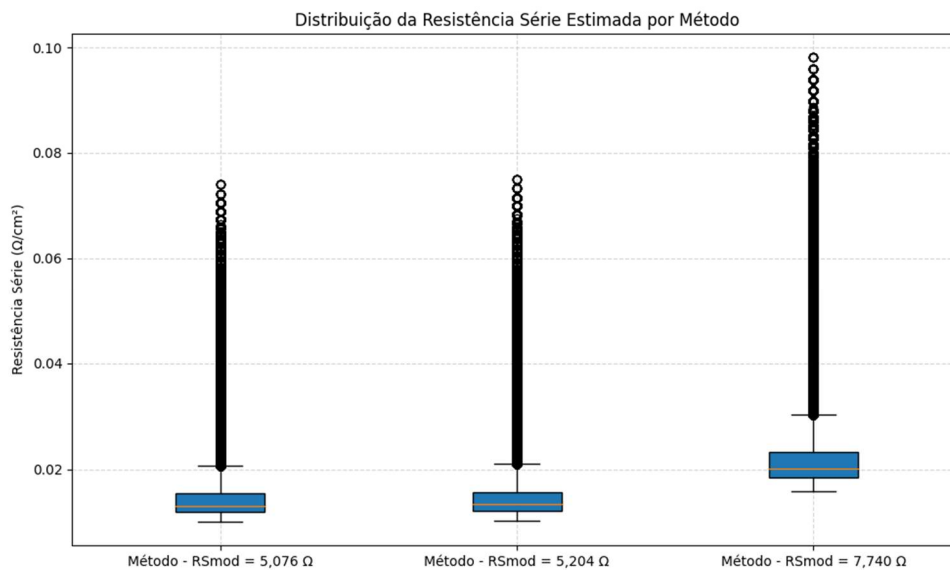


Figura 6.13: Distribuição dos Mapas de Resistência Série Locais. Fonte: Produzida pelo autor.

Como todos os métodos foram sensíveis a *outliers*, o limite superior do diagrama de caixas pode ser interpretado como um possível limiar para identificação de defeitos. Dessa forma, seus valores foram extraídos para segmentação e serão tratados nas seções subsequentes.

Assim, embora todos os métodos cumpram o papel de mapear a distribuição espacial da resistência série, as métricas evidenciam que a comparação direta entre mapas

absolutos obtidos através da mesma imagem de eletroluminescência pode ser comprometida por variações na estimativa de RS_{mod} . Com isso, recorrer a versões normalizadas ou relativas percentuais é uma alternativa para análise comparativa da distribuição espacial das resistências.

6.9.2 Mapas de Resistência Série Relativa

Com o intuito de reduzir a influência dos diferentes valores absolutos de resistência série total do módulo (RS_{mod}) nas comparações espaciais entre métodos, foram gerados mapas relativos de resistência série local. Para isso, cada mapa foi normalizado em relação ao seu próprio valor máximo e disposto em formato percentual, de modo que os valores locais passam a representar um percentual da maior resistência do respectivo mapa (Figuras 6.14 a 6.16). Essa abordagem permite destacar a distribuição espacial interna da resistência série de forma independente da escala absoluta.

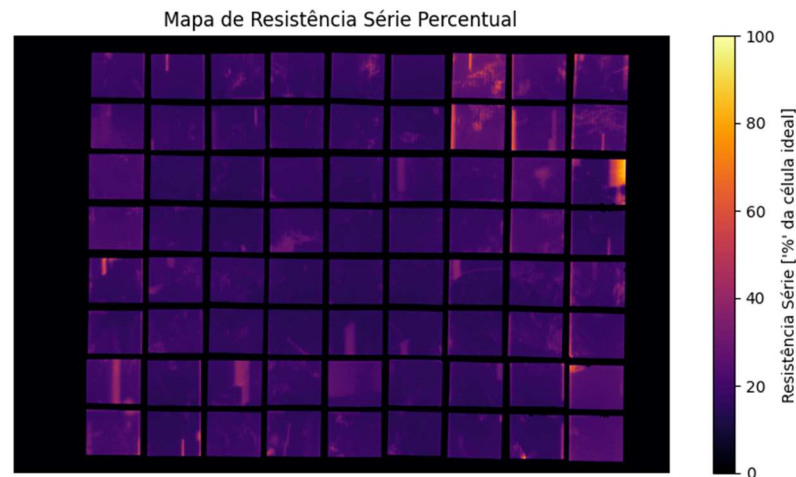


Figura 6.14: Mapa de Resistência Série Relativa Percentual com $RS_{mod} = 5,076 \, \Omega$ Obtido Através de Dados de *Datasheet*. Fonte: Produzida pelo autor.

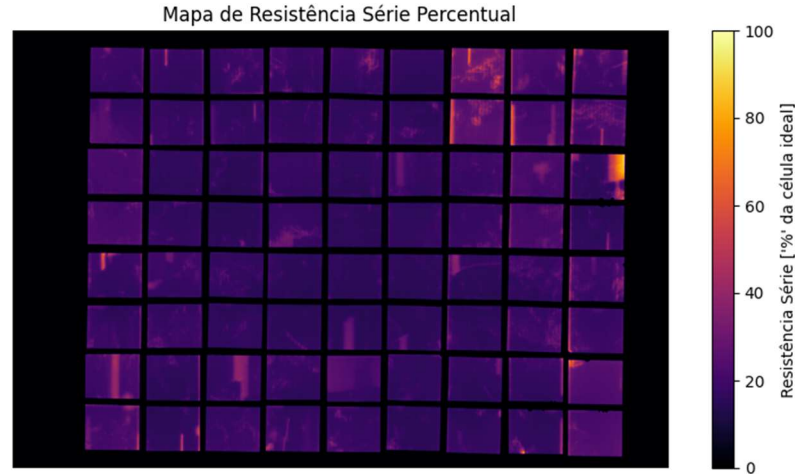


Figura 6.15: Mapa de Resistência Série Relativa Percentual com $RS_{mod} = 5,204 \, \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.

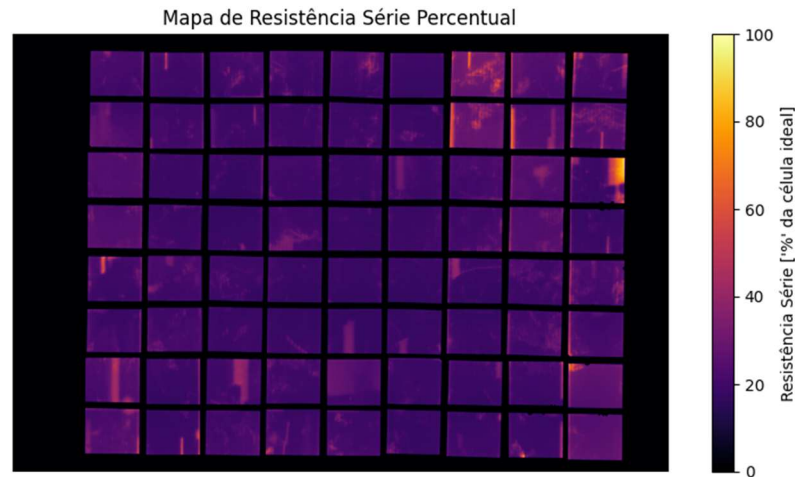


Figura 6.16: Mapa de Resistência Série Relativa Percentual com $RS_{mod} = 7,740 \, \Omega$ Obtido Através da Inclinação da Curva I-V no Ponto da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}). Fonte: Produzida pelo autor.

Na Tabela 6.6 são apresentadas as métricas comparativas entre os mapas de resistência série relativos percentuais. A comparação entre os mapas em que a resistência série total do módulo foi obtida através de dados de *datasheet* ($RS_{mod} = 5,076 \, \Omega$) e por eletroluminescência ($RS_{mod} = 5,204 \, \Omega$) (Figuras 6.14 e 6.15, respectivamente) revelou alta similaridade estrutural (SSIM = 0,99998); diferença média pequena (MAE = 0,09299 Ω/cm^2); diferença média quadrática baixa (MSE = 0,01441 (Ω/cm^2)²); e correlação linear perfeita ($r = 1$). Esses resultados indicam que, embora os mapas tenham sido

normalizados individualmente, os padrões espaciais extraídos com o auxílio dessas duas técnicas são praticamente equivalentes.

Tabela 6.6: Comparação entre Mapas de Resistência Série Relativa Percentual. Fonte: Produzida pelo autor.

Comparação RS_{mod} [Ω]	MAE (Ω/cm^2)	MSE (Ω/cm^2) ²	Pearson r	SSIM
5,076 vs 5,204	0,09299	0,01441	1,0	0,99998
5,076 vs 7,740	1,65992	4,59327	0,99877	0,99373
5,204 vs 7,740	1,56693	4,09306	0,99892	0,99445

Por outro lado, a comparação do mapa de resistência série em que o valor da RS_{mod} foi obtido pela inclinação da curva I-V no ponto da tensão de circuito aberto (V_{oc}) (7,740 Ω) (Figura 6.16) com os demais métodos, apresentou diferenças médias significativas (MAE $\approx$ 1,660 e 1,567 Ω/cm^2) e diferenças médias quadráticas ainda maiores (MSE $\approx$ 4,593 e 4,093 (Ω/cm^2)²) (Tabela 6.6), revelando um aumento na variabilidade pixel a pixel. No entanto, o SSIM ainda se manteve elevado (SSIM $\approx$ 0,994) e a correlação linear continuou alta ($r \approx$ 0,999), o que evidencia que, apesar da diferença na escala de normalização, as estruturas espaciais continuam similares.

Portanto, a normalização pela resistência máxima local permitiu uma comparação estrutural entre os métodos, revelando que todos capturam padrões semelhantes de variação espacial da resistência série, ou seja, a informação espacial depende essencialmente da imagem de EL, mesmo que tenham escalas absolutas distintas. Essa abordagem é útil para destacar regiões de concentração de perdas e avaliar a coerência espacial entre métodos, ainda que as unidades não permitam interpretação direta em termos absolutos de resistência.

6.9.3 Estimativa da Resistência Série por Célula e Total a partir da Segmentação Espacial das Resistências Locais

Com a segmentação de cada uma das células do módulo fotovoltaico estudado (Figura 6.17), foi possível calcular a resistência série equivalente de cada célula e a resistência série equivalente do módulo com base nos mapas de resistência série locais expressos em Ω/cm^2 .

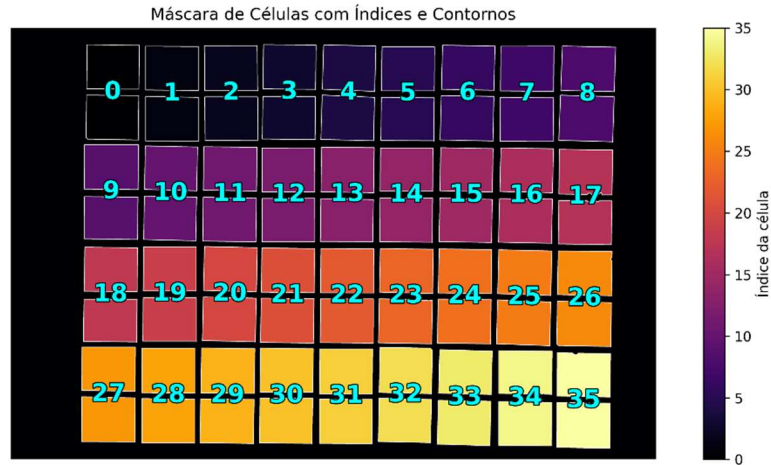


Figura 6.17: Células Segmentadas por Índices. Fonte: Produzida pelo autor.

Para isso, inicialmente, adotou-se o modelo de associação em paralelo das resistências séries locais pertencentes a cada célula. No entanto, essa hipótese em conjunto com a associação série entre células, resultou em estimativas de resistência série total do módulo (RS_{mod}) equivalentes significativamente inferiores à RS_{mod} utilizada anteriormente para obtenção dos mapas locais, revelando-se uma estratégia inadequada para representar a realidade física do dispositivo analisado.

Diante disso, procedeu-se à reformulação do modelo, assumindo-se a associação em série das resistências locais dentro de cada célula. Essa abordagem em conjunto com a associação série entre células forneceu valores mais consistentes com aqueles obtidos por técnicas tradicionais de extração de RS_{mod} e apresentou maior aderência ao comportamento físico observado (Figura 6.18 a 6.20).

A justificativa para tal modelagem baseia-se no fluxo preferencial de elétrons ao longo da célula. Isso se dá devido ao alinhamento desse fluxo em direção aos contatos metálicos longitudinais (como barras de coleta ou *fingers*). Além disso, em dispositivos com distribuição não uniforme de resistividade, como ocorre no dispositivo fotovoltaico (DFV) em questão, devido a variações na qualidade do material semiconductor ou efeitos de degradação localizada, o caminho preferencial da corrente tende a contornar regiões de maior resistência, reforçando a natureza seriada do fluxo elétrico.

Embora no âmbito de resistência local seja conveniente modelar que a corrente flua por caminhos paralelos em um sentido amplo, o modelo com associação em série das resistências locais é mais adequado para representar a acumulação das perdas em resistência série equivalente por célula já que fisicamente não há barreiras entre regiões.

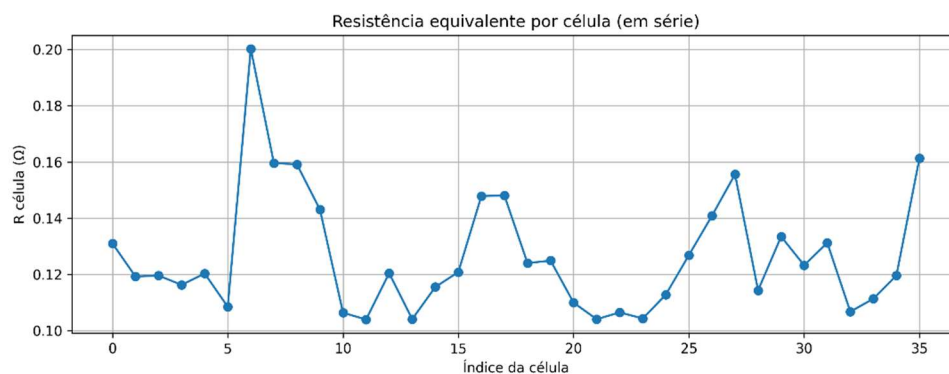


Figura 6.18 Resistência Série Equivalente Por Célula com $RS_{mod} = 5,076 \Omega$ Obtido Através de Dados de Datasheet. Fonte: Produzida pelo autor.

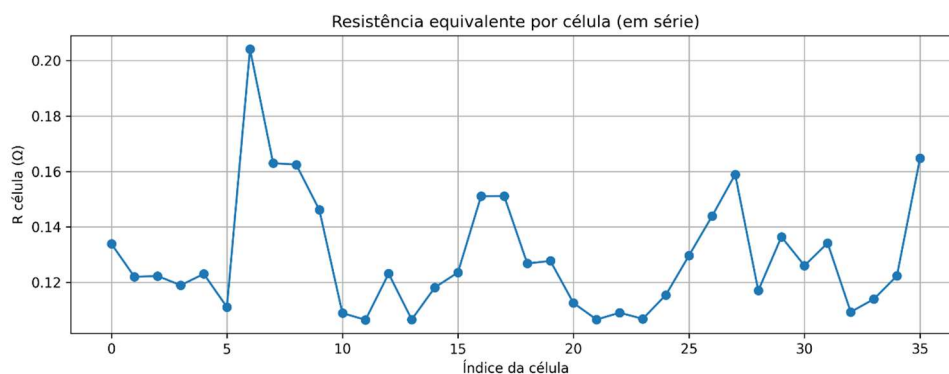


Figura 6.19 Resistência Série Equivalente Por Célula com $RS_{mod} = 5,204 \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.



Figura 6.20 Resistência Série Equivalente Por Célula com $RS_{mod} = 7,740 \Omega$ Obtido Através da Inclinação da Curva I-V no Ponto da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}). Fonte: Produzida pelo autor.

A análise da resistência equivalente por célula evidencia que a célula mais afetada por efeitos resistivos não é aquela que apresenta a maior resistência local. Na Figura 6.21 é apresentada a segmentação da resistência série local relativa percentual por faixas de

5%. Observa-se que a nona célula da segunda fileira horizontal (célula 17 da Figura 6.17) apresenta, entre seus mais elevados valores de resistência série, os maiores níveis de resistência série local do módulo. No entanto, ela é apenas a sexta célula entre as mais afetadas por efeitos resistivos do tipo série no mapa de resistência série equivalente por célula (Figura 6.21).

Por outro lado, ainda na Figura 6.21, a sétima célula da primeira fileira horizontal (célula 6 da Figura 6.17) é a mais afetada por resistência série, mesmo apresentando, entre seus mais elevados valores de resistência série, valores inferiores aos mais elevados valores registrados na nona célula da segunda fileira horizontal (Figura 6.21).

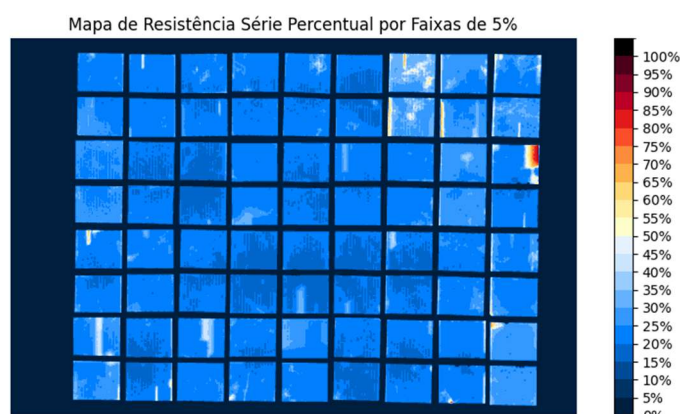


Figura 6.21: Segmentação de Resistência Série Relativa Percentual por Faixas com $RS_{mod} = 5,204 \, \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.

Já no âmbito global do módulo, a resistência série total do módulo (RS_{mod}) foi determinada por meio da soma das resistências individuais de cada célula (Tabela 6.7). Essa abordagem se justifica na associação em série das células no módulo ensaiado.

Tabela 6.7: RS_{mod} Reconstituído a Partir de Mapas de R_s Locais. Fonte: Produzida pelo autor.

RS_{mod} Estimado [Ω]	RS_{mod} Reconstituído [Ω]
5,076	4,556
5,204	4,657
7,740	6,906

A análise de erros entre os valores de resistência série do módulo (RS_{mod}) estimados e os reconstituídos a partir dos mapas de resistência série local (Tabela 6.8)

retorna um desvio médio absoluto (MAE) entre 0,52 e 0,83 Ω , com um erro percentual absoluto médio (MAPE, do inglês *Mean Absolute Percentual Error*) entre 10,24% e 10,78%.

Tabela 6.8: Métricas de erro entre os valores estimados e os reconstituídos de resistência série do módulo (RS_{mod}). Fonte: Produzida pelo autor.

RS_{mod} Estimado vs RS_{mod} Reconstituído [Ω]	MAE [Ω]	MAPE [%]	MSE [Ω^2]
5,076 vs 4,556	0,5200	10,24	0,2704
5,204 vs 4,657	0,5470	10,51	0,2992
7,740 vs 6,906	0,8340	10,78	0,6956

Esses valores indicam que, embora os valores reconstituídos não coincidam exatamente com os valores estimados, a ordem de grandeza e o padrão de variação são mantidos de forma consistente. O erro quadrático médio (MSE), que penaliza diferenças maiores, também permanece em níveis moderados (entre 0,27 e 0,69 Ω^2), reforçando a adequação geral da estimativa.

Os erros percentuais inferiores a 11% para todos os casos sugerem que o método de reconstrução com base em resistências locais e células conectadas em série é tecnicamente viável e coerente com a característica elétrica real do módulo fotovoltaico. Além disso, o padrão crescente de erro absoluto entre os três casos pode ser parcialmente atribuído ao aumento dos valores absolutos de RS_{mod} .

Portanto, os resultados demonstram que a reconstrução do RS_{mod} a partir da segmentação espacial das resistências locais por célula é consistente com os valores estimados, apresentando erros absolutos e relativos compatíveis com margens aceitáveis em análises experimentais. A abordagem se mostra válida para fins de diagnóstico, modelagem e comparação entre métodos, desde que os mapas locais sejam devidamente calibrados e segmentados.

6.9.4 Detecção de Defeitos Através de Limiar de Resistências

Com a segmentação das resistências séries locais por célula, o limite superior para valores atípicos do diagrama de caixa, disposto anteriormente (Figura 6.13), foi utilizado como limiar de segmentação de defeitos, para cada RS_{mod} utilizada (Tabela 6.9), considerando defeituosas as regiões de cada mapa com resistência série local acima do respectivo limiar do mapa. Isso resultou em mapas segmentados com a delimitação das bordas dos defeitos e realce de suas regiões internas em verde e verde em transparência reduzida (Figuras 6.22-6.24).

Tabela 6.9: Limiar de Segmentação de Defeitos por RS_{mod} . Fonte: Produzida pelo autor.

$RS_{mod} [\Omega]$	Limiar [Ω/cm^2]
5,076	0.020676
5,204	0.021088
7,740	0.030304

Regiões com Defeito - Mapa de Resistência Série Absoluta ($RS_{mod} = 5,076 \Omega$)

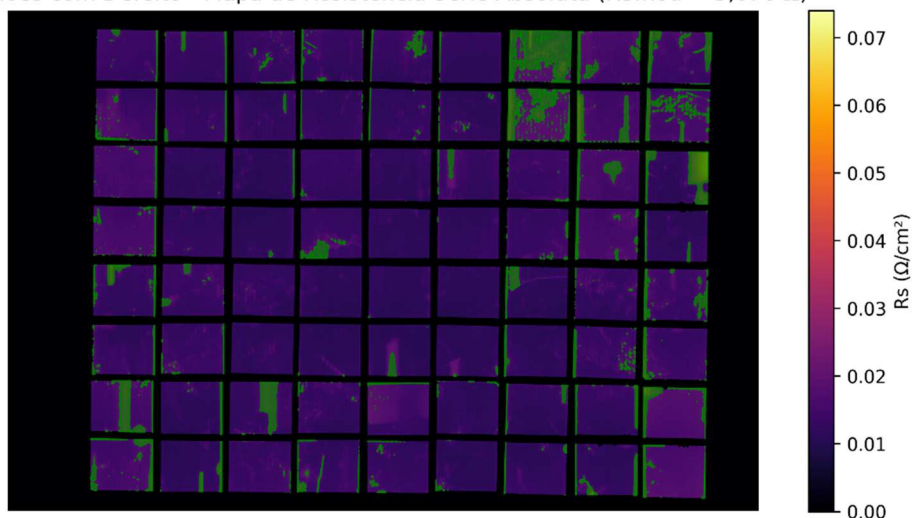


Figura 6.22: Mapa de Segmentação de Defeitos Por Limiar de Resistência Série Local com $RS_{mod} = 5,076 \Omega$ Obtido Através de Dados de Datasheet. Fonte: Produzida pelo autor.

Regiões com Defeito - Mapa de Resistência Série Absoluta ($RS_{mod} = 5,204 \Omega$)

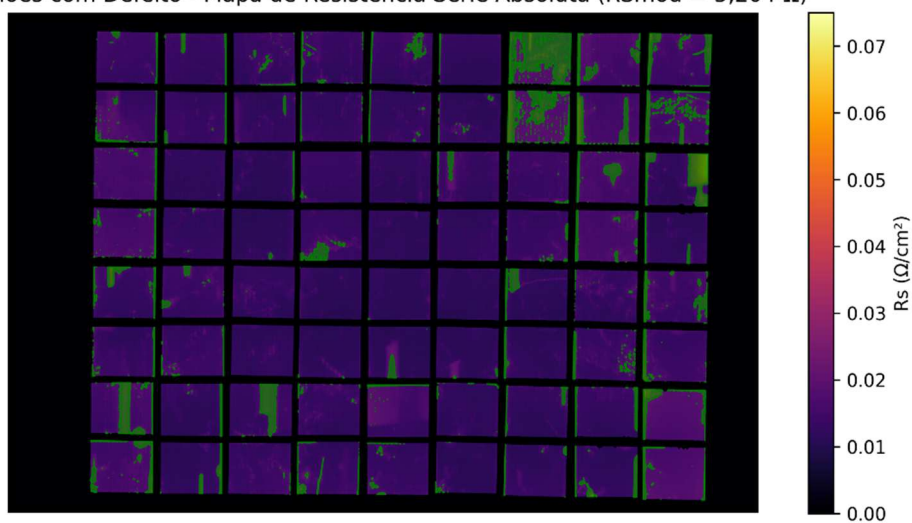


Figura 6.23: Mapa de Segmentação de Defeitos Por Limiar de Resistência Série Local com $RS_{mod} = 5,204 \Omega$ Obtido Através de Eletroluminescência Residual. Fonte: Produzida pelo autor.

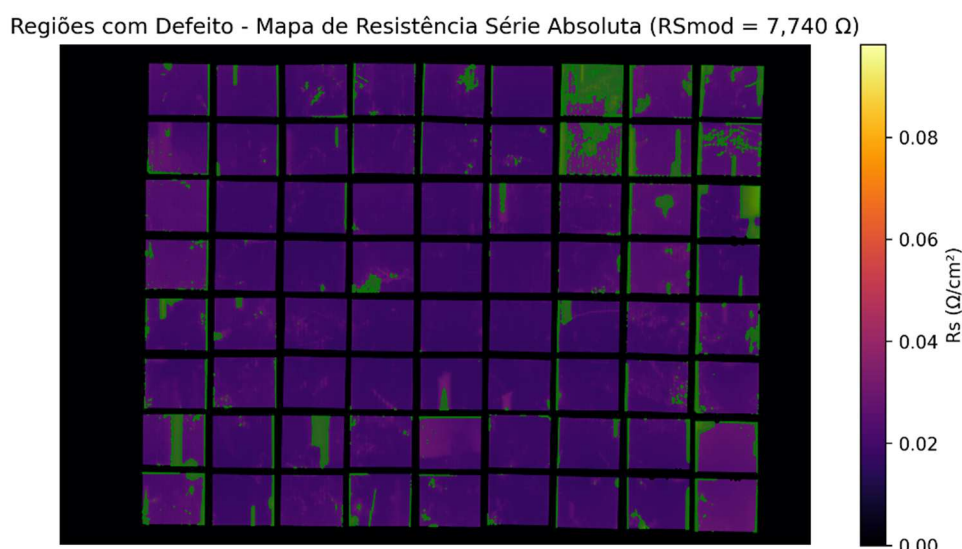


Figura 6.24: Mapa de Segmentação de Defeitos Por Limiar de Resistência Série Local com $RS_{mod} = 7,740 \, \Omega$ Obtido Através da Inclinação da Curva I-V no Ponto da Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}). Fonte: Produzida pelo autor.

Ao analisar os dados segmentados, comparando-se os mapas, verificou-se que todos os mapas delimitam regiões de defeito que representam, respectivamente, 5,67%, 5,66% e 5,55% da área que representa o total de células no módulo (Área Útil [cm^2], Tabela 6.10), assim como um quantitativo de agrupamentos de pixels com defeitos, respectivamente, de 1200, 1199 e 1171 *clusters*. Essa variação indica uma leve redução da área com defeito com o aumento de RS_{mod} , assim como uma redução no número de *clusters*. Esse último, não representando necessariamente uma proporcionalidade com a redução das áreas com defeito.

Tabela 6.10: Quantitativo de Defeitos: Mapa de De Segmentação de Defeitos Por Limiar de Resistência Série Local. Fonte: Produzida pelo autor.

RS_{mod} [Ω]	Área Útil [cm^2]	Área com Defeito [cm^2]	Área com Defeito [%]	<i>Clusters</i> com Defeito
5,076	317,306682	17,984406	5,67	1200
5,204	317,306682	17,957786	5,66	1199
7,740	317,306682	17,614410	5,55	1171

É importante destacar que o módulo analisado não passou por processos de indução de falhas ou degradações controladas. As regiões identificadas como “defeituosas” correspondem, portanto, a áreas de maior resistência série relativa, que podem estar associadas a variações estruturais preexistentes, como microfissuras, falhas de soldagem ou diferenças locais de condutividade, mas não foram confirmadas por inspeção física direta. Assim, os “defeitos” detectados devem ser interpretados como

anomalias elétricas potenciais, inferidas a partir da análise de eletroluminescência residual e do limiar estatístico aplicado, dentro do escopo deste estudo piloto.

Tendo em vista a conjuntura da abordagem proposta, que integra dados de imagem de eletroluminescência residual (câmeras comerciais) com análise elétrica quantitativa, os resultados apresentados neste capítulo fundamentam a eficácia da metodologia na caracterização de resistências série de módulos fotovoltaicos. A conclusão e as considerações finais serão feitas a seguir.

Capítulo 7

Conclusão

O objetivo central desta dissertação foi desenvolver e validar uma metodologia para caracterizar a resistência série em dispositivos fotovoltaicos a partir de imagens de eletroluminescência residual (EL) capturadas com câmeras comerciais. O estudo propôs um sistema de baixo custo, definiu procedimentos de aquisição e pré-processamento de imagens e comparou a estimativa da resistência total do módulo com métodos tradicionais.

A metodologia resultou em um arranjo experimental funcional, baseado em uma câmera DSLR modificada, câmara escura e fonte programável, capaz de registrar imagens de EL com boa relação sinal-ruído. O método de calibração e modelagem proposto demonstrou coerência entre os valores de resistência série obtidos por EL e os estimados por abordagens analíticas convencionais, validando a aplicabilidade da técnica em contextos experimentais.

Os resultados mostraram que o uso de imagens de eletroluminescência residual permite não apenas quantificar a resistência série global do módulo, mas também representar sua distribuição espacial. Os mapas de resistência série obtidos evidenciaram regiões com maior resistência local, associadas a possíveis irregularidades estruturais, e permitiram reconstruir a resistência série global com erro médio inferior a 11%.

A metodologia desenvolvida, portanto, se mostra uma alternativa acessível e tecnicamente viável para inspeção e diagnóstico de módulos fotovoltaicos, especialmente em laboratórios e pequenas empresas, reduzindo a dependência de equipamentos científicos de alto custo.

7.1 Trabalhos Futuros

Como perspectivas de continuidade, sugere-se:

- Validar o método em diferentes tecnologias de módulos e sob condições externas de operação;
- Implementar controle térmico mais homogêneo durante o ensaio;

- Desenvolver mecanismos de sintonia automática de parâmetros, incluindo foco motorizado e ajuste adaptativo de ISO e tempo de exposição, para facilitar o uso por operadores não especializados;
- Aplicar aprendizado de máquina para segmentação automática e classificação de defeitos;
- Comparar a EL residual com outras técnicas de imagem para aprimorar a caracterização da resistência série.

Conclui-se que a metodologia proposta cumpre seu propósito, demonstrando que é possível caracterizar de forma precisa e econômica a resistência série de módulos fotovoltaicos por meio da eletroluminescência residual. As contribuições aqui apresentadas abrem caminho para novas pesquisas e aplicações na área de energia solar fotovoltaica.

Capítulo 8

Referências Bibliográficas

- [1] PETRAGLIA, A.; NARDONE, V. “Electroluminescence in photovoltaic cell”. *Physics Education*, v. 46, n. 5, p. 511–513, 2011. DOI: 10.1088/0031-9120/46/5/F01.
- [2] MERTENS, K. *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*. Chichester: John Wiley & Sons, 2014.
- [3] FIGUEIREDO, G.; PINHO ALMEIDA, M. “Alternativa de baixo custo para imagens em eletroluminescência de módulos fotovoltaicos”. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018.
- [4] FUYUKI, T.; KONDO, H.; YAMAZAKI, T.; *et al.* “Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence”. *Applied Physics Letters*, v. 86, n. 26, p. 1–3, 2005. DOI: 10.1063/1.1978979.
- [5] WÜRFEL, P.; TRUPKE, T.; PUZZER, T.; *et al.* “Diffusion lengths of silicon solar cells from luminescence images”. *Journal of Applied Physics*, v. 101, n. 12, 2007. DOI: 10.1063/1.2749201.
- [6] TSAI, D. M.; WU, S. C.; CHIU, W. Y. “Defect detection in solar modules using ICA basis images”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 9, n. 1, p. 122–131, 2013. DOI: 10.1109/TII.2012.2209663.
- [7] KOCH, S.; WEBER, T.; SOBOTTKA, C.; *et al.* “Outdoor electroluminescence imaging of crystalline photovoltaic modules: comparative study between manual ground-level inspections and drone-based aerial surveys”. In: *Proceedings of the 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, v. 53, n. 9, p. 1736–1740, 2016. DOI: 10.4229/EUPVSEC20162016-5DO.12.2.
- [8] KONTGES, M.; KUNZE, I.; KAJARI-SCHRÖDER, S.; *et al.* “Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks”. In: *Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, p. 6–10, set. 2010. DOI: 10.4229/25thEUPVSEC2010-4BO.9.4.
- [9] BEDRICH, K. G.; LUO, W.; PRAVETTONI, M.; *et al.* “Quantitative electroluminescence imaging analysis for performance estimation of PID-influenced PV modules”. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 8, n. 5, p. 1281–1288, 2018. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2018.2846665.
- [10] POTTHOFF, T.; BOTHE, K.; EITNER, U.; *et al.* “Detection of the voltage

- distribution in photovoltaic modules by electroluminescence imaging”. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 18, n. 2, p. 100–106, 2010. DOI: 10.1002/pip.941.
- [11] MERTENS, K. “Fundamentals of semiconductor physics”. In: *Photovoltaics: Fundamentals, technology, and practice*. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. p. 55.
- [12] MERTENS, K. “Structure and method of operation of solar cells”. In: *Photovoltaics: Fundamentals, technology, and practice*. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. p. 70.
- [13] HECKTHEUER, L. A. *Análise de associações de módulos fotovoltaicos*. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- [14] PV EDUCATION. *IV curve*. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [15] MERTENS, K. “Photovoltaic metrology”. In: *Photovoltaics: Fundamentals, technology, and practice*. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. p. 219.
- [16] KAJARI-SCHRÖDER, S.; KUNZE, I.; EITNER, U.; *et al.* “Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 95, n. 11, p. 3054–3059, 2011. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.06.032.
- [17] KÖNTGES, M.; KUNZE, I.; KAJARI-SCHRÖDER, S.; *et al.* “The risk of power loss in crystalline silicon-based photovoltaic modules due to micro-cracks”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 95, n. 4, p. 1131–1137, 2011. DOI: 10.1016/j.solmat.2010.10.034.
- [18] PINTO FILHO, G. F. *Degradação induzida pelo potencial em módulos e instalações fotovoltaicas de c-Si*. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- [19] PINGEL, S.; FRANK, O.; WINKLER, M.; *et al.* “Potential induced degradation of solar cells and panels”. In: *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, p. 2817–2822, 2010. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616823.
- [20] SCHÜTZE, M.; *et al.* “Laboratory study of potential induced degradation of silicon photovoltaic modules”. In: *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, p. 821–826, 2011. DOI: 10.1109/PVSC.2011.6186080.
- [21] SCHRODER, D. K. *Semiconductor material and device characterization*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [22] GORANTI, S.; TAMIZHMANI, G. “Potential induced degradation (PID) study on accelerated stress tested PV modules”. In: *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, p. 2438–2441, 2012. DOI: 10.1109/PVSC.2012.6318088.
- [23] KIRCHARTZ, T.; HELBIG, A.; REETZ, W.; *et al.* “Reciprocity between electroluminescence and quantum efficiency used for the characterization of silicon solar cells”. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 17, n. 6, p. 394–402, set. 2009. DOI: 10.1002/pip.895.
- [24] RAU, U. “Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells”. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*, v. 76, n. 8, p. 1–8, 2007. DOI: 10.1103/PhysRevB.76.085303.
- [25] HINKEN, D.; RAMSPECK, K.; BOTHE, K.; *et al.* “Series resistance imaging of

- solar cells by voltage dependent electroluminescence”. *Applied Physics Letters*, v. 91, n. 18, p. 10–13, 2007. DOI: 10.1063/1.2804562.
- [26] KROPP, T.; SCHUBERT, M.; WERNER, J. H. “Quantitative prediction of power loss for damaged photovoltaic modules using electroluminescence”. *Energies*, v. 11, n. 5, 2018. DOI: 10.3390/en11051172.
- [27] CANON DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. [Imagem adaptada]. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.canon.com.br/img/bloco/conteudo/item/34880/941-gal-car-10zoom.jpg>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [28] ASTRONOMIK. [Imagem adaptada]. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: https://www.astronomik.com/thumbnail/17/67/d0/1716278964/astronomik-mc-clear_trans_800x800.png?ts=1748868823. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [29] TEQUIPMENT.NET. [Imagem adaptada]. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.tequipment.net/AgilentE3631A/>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [30] BEDRICH, K. G., 2017. *Quantitative electroluminescence measurements of PV devices*. Tese (Doutorado) – Loughborough University, Loughborough, 2017.
- [31] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC TS 60904-13: Photovoltaic devices – Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules*. 2018.
- [32] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60891: Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*. 2009.
- [33] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, mai. 2009. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2013862.

Capítulo 9

Apêndice A – Produção Científica

Durante o desenvolvimento da pesquisa o autor publicou um artigo no Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos (CONAEND&IEV 2021) abordando a análise qualitativa de imagens de eletroluminescência (EL) residual utilizando câmera comercial. E teve trabalho aceito para publicação no *Solar World Congress 2025*. Este último abordando a temática desta dissertação:

- **Alcântara Neto J. R. de, Canuto J. C., Riffel D. B., et al.** “END em células fotovoltaicas por eletroluminescência: câmeras de baixo custo”. *XXXVIII Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção – CONAENDI&IEV 2021*, 569, São Paulo (Brasil, evento virtual), 9–11 mar. 2021.
- **Alcântara Neto J. R. de, Riffel D. B., Silva A. M.** “Low-cost methodology for series resistance spatial characterization in PV devices through electroluminescence imaging”. *Solar World Congress 2025*, s.n., Fortaleza – CE (Brasil), 3–7 nov. 2025. No prelo.