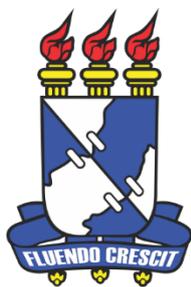




PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THIAGO MOTA VIEIRA

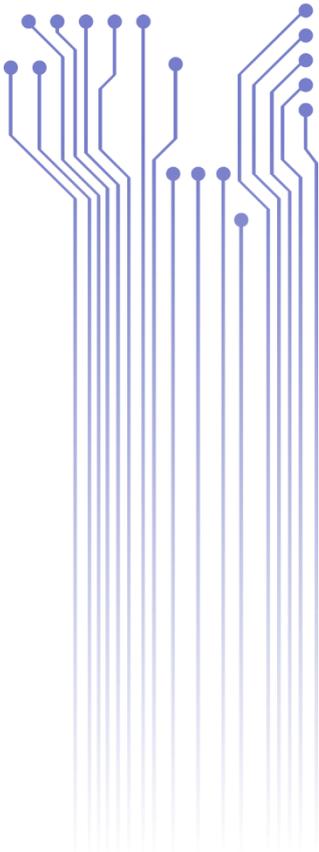


Universidade Federal de Sergipe



DISSERTAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE MONITORAMENTO E
DETECÇÃO DE DEFEITOS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS UTILIZANDO
TERMOGRAFIA ATIVA MODULADA**



São Cristóvão
2023

THIAGO MOTA VIEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE MONITORAMENTO E
DETECÇÃO DE DEFEITOS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS
UTILIZANDO TERMOGRAFIA ATIVA MODULADA

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica (PROEE) da instituição Fundação Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos para a obtenção de título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Monitoramento e Processamento de Energia

Orientador: Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Coorientador: Douglas Bressan Riffel, D. Sc.

Aprovado pelo colegiado do PROEE em / /

São Cristóvão
2023



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

" DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE MONITORAMENTO E DETECÇÃO DE DEFEITOS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS UTILIZANDO TERMOGRAFIA ATIVA MODULADA "

Discente:

Thiago Mota Vieira

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. Eduardo Oliveira Freire (PROEE/UFS)
Presidente

Prof. Dr. Rômulo Alves de Oliveira (IFS)
Examinador Externo

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

Thiago Mota Vieira
Candidato

Cidade Universitária "Prof. José Aloísio de Campos", 17 de agosto de 2023.

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

V658d Vieira, Thiago Mota
Desenvolvimento de um método de monitoramento e detecção de defeitos em células fotovoltaicas utilizando termografia ativa modulada / Thiago Mota Vieira ; orientador Tarso Vilela Ferreira. - São Cristóvão, 2023.
119 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia elétrica) – Universidade Federal de Sergipe, 2023.

1. Células fotoelétricas 2. Correntes elétricas. 4. Sistemas imageadores – Qualidade da imagem. I. Ferreira, Tarso Vilela orient. II. Título.

CDU 621.3

Dedico este trabalho a Deus, em primeiro lugar, por toda sustentação ao longo da minha vida, aos meus pais, Norma e Antonio, e à minha irmã, Jéssica. Sem vocês a concretização deste sonho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me sustentando até aqui ao longo de toda a minha jornada. Os caminhos até aqui nem sempre foram tranquilos, mas em todos os momentos eu senti a presença e o cuidado de Deus.

Agradeço à minha mãe, Norma, por ter sido, incontáveis vezes, um elo forte e inquebrável para a nossa família, um exemplo incrível de força, coragem e sensibilidade; a melhor mãe do mundo, sem dúvidas. A meu pai, Antonio, que, à sua maneira, sempre demonstrou cuidado nunca hesitando em me apoiar nos meus sonhos. À minha irmã, Jéssica, que há muito se tornou uma referência profissional para mim, além de uma grande amiga e parceira de vida para todas as horas.

Ao orientador prof. Dr. Tarso Vilela por ter sido, para além de um guia exímio e muito competente no desenvolvimento da minha pesquisa acadêmica, um grande suporte e exemplo de ser humano, por quem eu tenho profunda admiração. Ao meu coorientador prof. Dr. Douglas Bressan pela presença sempre constante e muito importante nos momentos de alegrias e nos momentos de maior dificuldade e instabilidade ao longo dos últimos dois anos. Hoje, eu me entendo como um engenheiro, pesquisador e cidadão melhor e mais preparado pelo muito que aprendi com vocês. Gratidão!

Agradeço à Família Resistência, grupo composto pelos grandes amigos Talita, Wendel, Júlio Cesar, Yasmin, Klaus, Raysonara, Samara, Leones, Sabrina Ariosvaldo, Jorge e André, por toda a amizade, apoio e com quem eu pude compartilhar momentos muito felizes nesses últimos anos.

Agradeço ao time do Laboratório de Engenharia e Energia (LABENGE-UFS), em especial aos amigos Neto, Adriano, Renan, Luiz Filipe, Ézio e Mayara pelas parcerias tão fundamentais. Os experimentos não seriam tão divertidos e enriquecedores sem vocês por perto. Vocês são parte importante dessa conquista!

Sou igualmente grato a toda a equipe do Laboratório de Automação Controle e Simulação (LACS-UFS), em especial ao prof. Dr. George Xavier e aos colegas Matheus,

Bruno, Gustavo e Edvaldo pelo apoio na rotina de pesquisa e pelo fomento de discussões científicas de grande valor.

Meu muito obrigado aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PROEE) da Universidade Federal de Sergipe pelos ensinamentos e suporte no esclarecimento das diversas questões científicas. Às instituições de fomento Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC) por acreditar no meu projeto e pela bolsa de estudos concedida, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Que a educação nunca perca o seu devido valor e respeito!

A todos aqueles que não comporta citar neste texto, mas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta grande conquista, meu muito obrigado!

“Na vida não existe nada a temer, mas a entender.”

Composição: Marie Curie

RESUMO

A ocorrência de defeitos em células fotovoltaicas está intrinsecamente relacionada à uma redução na eficiência e confiabilidade desses dispositivos. Assim, técnicas de monitoramento, a exemplo da termografia ativa modulada, eletroluminescência e curva característica I-V são adotadas para avaliar a integridade das células. No presente trabalho, um novo procedimento experimental que utiliza a termografia ativa modulada em células fotovoltaicas é proposto com o objetivo de melhorar a capacidade de detecção de defeitos do ensaio termográfico. As técnicas convencionais que fazem uso da modulação por largura de pulso para estimular as células costumam operar em um ponto fixo na curva I-V. Em vez disso, é proposta uma metodologia baseada em uma excitação por sinal de tensão elétrica senoidal que amplia a faixa de pontos operacionais da célula durante o ensaio. Técnicas tradicionais de processamento de imagem (análise de componentes principais, transformada rápida de Fourier, método de mudança de fase por quatro pontos por ciclo de modulação e método da função gaussiana bidimensional) foram utilizadas isoladamente para analisar as imagens térmicas de células fotovoltaicas saudáveis e defeituosas durante o modo de operação em regime permanente. Os resultados obtidos permitiram constatar que esta nova abordagem fornece uma delimitação mais suavizada e clara das regiões defeituosas propiciando uma caracterização adequada dos defeitos existentes. Além disso, as imagens de fase ganharam destaque na caracterização dos defeitos, em especial para as frequências de 50 mHz e 100 mHz, em função das diferenças de contraste que apresentaram. Com isso, mudanças significativas entre as regiões defeituosas e saudáveis para diferentes frequências de modulação e tipos de defeitos foram identificadas.

Palavras-chave: Fotovoltaico; Termografia Ativa Modulada; Novo Procedimento Experimental; Sinal de Corrente Elétrica Senoidal; Processamento de Imagens Térmicas.

ABSTRACT

The occurrence of defects in photovoltaic cells is intrinsically related to a reduction in the efficiency and reliability of these devices. Therefore, monitoring techniques, such as lock-in thermography, electroluminescence, and I-V characteristic curve, are adopted to assess the integrity of the cells. In this study, a novel experimental procedure using lock-in thermography in photovoltaic cells is proposed aiming to improve the defect detection capability of the thermographic test. Conventional techniques that use pulse width modulation to stimulate photovoltaic cells usually operate at a fixed point on the I-V curve. Instead, a methodology based on a sinusoidal electrical voltage signal excitation is proposed, which expands the range of operational points of the cell during the test. Several traditional image processing techniques (principal component analysis, fast Fourier transform, four-step phase-shifting method, and two-dimensional Gaussian function method) were used alone to analyze the thermal images of defective and non-defective photovoltaic cells during the steady-state operation mode. The results obtained showed that this new approach provides a smoother and clearer delimitation of defective regions, enabling an adequate characterization of existing defects. Additionally, the phase images gained prominence in the characterization of defects, in particular for the frequencies of 50 mHz and 100 mHz, due to the contrast they presented with significant changes between defective and non-defective regions for different modulation frequencies and types of defects.

Keywords: Photovoltaic; Lock-in Thermography; Novel Experimental Procedure; Sinusoidal Electric Current Signal; Thermal Image Processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemático-illustrativa da banda de condução, região de <i>gap</i> e banda de valência dos materiais condutores, semicondutores e isolantes.	24
Figura 2 – Modelo de representação da célula fotovoltaica.	25
Figura 3 – Modelo elétrico equivalente de diodo único de uma célula fotovoltaica.	26
Figura 4 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica onde são indicados os seus principais parâmetros.	27
Figura 5 – Curvas I-V de células fotovoltaicas de silício para diferentes níveis de temperatura.	29
Figura 6 – Curvas I-V de células fotovoltaicas de silício para diferentes intensidades de radiação.	29
Figura 7 – Diagrama esquemático do funcionamento de um termovisor.	30
Figura 8 – Representação esquemática do fluxo radiativo recebido por um termovisor.	32
Figura 9 – Emitância espectral para superfície negra, cinza e real.	32
Figura 10 – Interação entre a energia radiante e o material alvo.	34
Figura 11 – Espectro típico de radiação eletromagnética devido à temperatura de um corpo.	35
Figura 12 – Comparação entre o sinal de entrada e a resposta térmica de um ensaio de LIT.	39
Figura 13 – Princípio matemático da LIT para derivar as imagens de amplitude e fase do conjunto de imagens termográficas.	40
Figura 14 – Modelo da curva I-V no escuro para DLIT aplicada a uma célula fotovoltaica.	40
Figura 15 – Passos fundamentais em processamento digital de imagens.	41
Figura 16 – Representação de uma imagem digital bidimensional.	43
Figura 17 – Modelo RGB.	44
Figura 18 – (a) Imagem original que contém uma região de intensidade constante; (b) resultado da segmentação baseada nas propriedades da região.	45
Figura 19 – Visualização de um sinal no domínio do tempo e da frequência.	48
Figura 20 – Interpretação da transformada de Fourier.	49
Figura 21 – Princípio de fase da termografia sensitiva.	50
Figura 22 – Fluxograma da metodologia adotada.	60
Figura 23 – Fotografia aproximada da (a) célula defeituosa 01, (b) célula defeituosa 02 e célula saudável 03 (c) aproximada e (d) com vista mais ampla.	62
Figura 24 – Esquema da aplicação da DLIT explicitando a faixa de pontos operacionais do sinal de tensão elétrica senoidal utilizado na excitação de uma célula fotovoltaica como amostra.	63
Figura 25 – Fluxograma das etapas do procedimento computacional completo.	64
Figura 26 – Fluxograma da rotina de segmentação das células fotovoltaicas.	66
Figura 27 – Fluxograma da aplicação da FFT aos dados térmicos.	67
Figura 28 – Fluxograma da aplicação da análise de quatro pontos por ciclo de modulação aos dados térmicos.	68
Figura 29 – Fluxograma da aplicação da análise de componentes principais aos dados térmicos.	69
Figura 30 – Fluxograma da aplicação do método gaussiano bidimensional aos dados térmicos.	69
Figura 31 – Fotografia da parte interna da câmara escura usada no experimento mostrando a câmara IR e o posicionamento da célula fotovoltaica.	72
Figura 32 – Diagrama esquemático do circuito <i>buffer push-pull</i>	75
Figura 33 – Testes em bancada com o circuito <i>buffer push-pull</i> e utilizando-se uma carga resistiva de 5 Ω	75
Figura 34 – Testes em bancada com o circuito <i>buffer push-pull</i> e utilizando-se a célula fotovoltaica como carga.	76
Figura 35 – Imagens eletroluminescentes da (a) célula defeituosa 01, (b) célula defeituosa 02 e (c) célula saudável 03.	77
Figura 36 – Imagens térmicas de duas células fotovoltaicas defeituosas (a) 01 e (b) 02.	79
Figura 37 – Resposta térmica temporal para um pixel na região saudável da célula defeituosa 01.	80
Figura 38 – Resposta térmica temporal para um pixel nas proximidades de um defeito da célula defeituosa 01.	80
Figura 39 – Resposta térmica temporal para um pixel na superfície da célula saudável 03.	80
Figura 40 – Histograma da imagem da célula fotovoltaica em tons de cinza.	81
Figura 41 – Etapas do algoritmo de segmentação: (a) Imagem térmica; (b) Conversão para tons de cinza; (c) Binarização da imagem; (d) Remoção dos cabos.	82

Figura 42 – Etapas do algoritmo de segmentação (continuação): (a) Remoção das laterais contendo fundo da imagem; (b) Corte superior; (c) Corte inferior; (d) Máscara final.	82
Figura 43 – Correção de distorção. Imagens de amplitude (a) distorcida e (b) alinhada e imagens de fase (c) distorcida e (d) alinhada.	83
Figura 44 – Imagens de (a) eletroluminescência, (b) primeira, (c) segunda e (d) terceira componentes principais para uma frequência de 50 mHz relativo ao ensaio usando a célula saudável 01.	84
Figura 45 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da primeira componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.	85
Figura 46 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da primeira componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.	86
Figura 47 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da segunda componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.	87
Figura 48 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da segunda componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.	87
Figura 49 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da terceira componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.	88
Figura 50 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da terceira componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.	88
Figura 51 – Imagens de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e (b) fase obtida da aplicação da 4-SPSM para o teste realizado com 50 mHz usando a célula saudável 01.	90
Figura 52 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase obtidas da aplicação da 4-SPSM para os testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.	91
Figura 53 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase obtidas da aplicação da 4-SPSM para os testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.	91
Figura 54 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de amplitude obtidas da aplicação da 4-SPSM para os testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.	92
Figura 55 – Espectro de magnitude unilateral de Fourier.	93
Figura 56 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase obtidas da aplicação da FFT aos testes realizados com a (b) frequência fundamental e a (c) segunda e (d) terceira harmônicas utilizando uma frequência de modulação de 50 mHz com a célula saudável 01.	94
Figura 57 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase para a frequência fundamental obtidas da aplicação da FFT para os testes realizados com a frequência de modulação de (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando o célula defeituosa 01.	94
Figura 58 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase para a frequência fundamental obtidas da aplicação da FFT para os testes realizados com a frequência de modulação de (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando o célula defeituosa 02.	95
Figura 59 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase para a segunda harmônica do espectro de Fourier obtidas da aplicação da FFT para os testes realizados com a frequência de modulação de (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz ou (e) 100 mHz para a célula defeituosa 01.	95
Figura 60 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase para a segunda harmônica do espectro de Fourier obtidas da aplicação da FFT para os testes realizados com a frequência de modulação de (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz ou (e) 100 mHz para a célula defeituosa 02.	96
Figura 61 – Verificação do grau de reprodutibilidade experimental por análise estatística.	99
Figura 62 – Imagens de desvio padrão de duas células fotovoltaicas, sendo uma (a) saudável e a outra (b) defeituosa.	100
Figura 63 – Célula saudável 01: (a) imagem eletroluminescente, (b) imagem de magnitude da FFT; (c) modelo gaussiano; célula defeituosa 01: (d) imagem eletroluminescente, (e) imagem de magnitude da FFT; (f) modelo gaussiano;	102
Figura 64 – Gráficos do gradiente nas imagens da célula saudável 02: (a) primeira componente principal, (b) magnitude – FFT, (c) fase e (d) detalhamento da fase.	103
Figura 65 – Forma de onda da corrente de coletor nos estágios de saída classe A e B.	117

Figura 66 – Estágios de saída classe B	118
Figura 67 – Característica de transferência do estágio de saída classe B.	119
Figura 68 – Circuito classe B com amplificador operacional para redução de distorção de <i>crossover</i>	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Contribuições percentuais das componentes principais.	59
Tabela 2 – Valores dos parâmetros do sinal de excitação da célula.	73
Tabela 3 – Contribuições percentuais das componentes principais.	89
Tabela 4 – Comparação entre imagens obtidas pelo método proposto e pelo teste com sinal PWM com frequência de excitação de 100 mHz em ambos; as técnicas utilizadas foram (a) e (d) PCA (primeira componente principal); (b) e (e) 4-SPSM; e (c) e (f) FFT.	97
Tabela 5 – Desvio padrão da sequência de medições consecutivas com a célula saudável 01.	99
Tabela 6 – Desvio padrão da sequência de medições consecutivas com a célula defeituosa 01.	99
Tabela 7 – Tempo médio de processamento das técnicas de PDI para um ensaio de LIT realizado a 6 mHz (<i>flock - in</i>).	101
Tabela 8 – Coeficiente de determinação R^2 para células fotovoltaicas saudáveis e defeituosas excitadas por sinais modulados com a mesma configuração dos parâmetros amplitude, nível de <i>offset</i> e frequência de modulação.	114
Tabela 9 – Coeficiente de determinação R^2 para a célula saudável 03 excitada por sinais de mesma amplitude e nível de <i>offset</i> , porém diferentes frequências de modulação.	115
Tabela 10 – Coeficiente de determinação R^2 para a célula defeituosa 01 excitada por sinais de mesma amplitude e nível de <i>offset</i> , porém diferentes frequências de modulação.	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio
CIS	Seleneto de Cobre e Índio
DC	<i>Direct Current</i>
FV	Fotovoltaico
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
DLIT	<i>Dark Lock-in Thermography</i>
ILIT	<i>Illuminated Lock-in Thermography</i>
IR	Infravermelho
IRT	<i>Infrared Thermography</i>
CIFL	Corrente Induzida por Feixe de Luz
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LIT	<i>Lock-in Thermography</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PDI	Processamento Digital de Imagem
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TIE	Termografia Ativa por Indução Eletromagnética
2-SPSM	<i>Two-Step Phase-Shifting Method</i>
3-SPSM	<i>Three-Step Phase-Shifting Method</i>
4-SPSM	<i>Four-Step Phase-Shifting Method</i>
5-SPSM	<i>Five-Step Phase-Shifting Method</i>

SUMÁRIO

1	Introdução.....	18
1.1	Objetivos.....	21
1.1.1	Objetivo Primário.....	21
1.1.2	Objetivos Secundários.....	21
1.2	Estrutura do Trabalho.....	22
2	Fundamentação Teórica.....	23
2.1	Energia Solar Fotovoltaica.....	23
2.2	Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica.....	25
2.3	Termografia Infravermelha.....	29
2.3.1	Princípios Físicos Básicos da Termografia Infravermelha.....	35
2.3.2	Tipos de Termografia Infravermelha.....	37
2.3.3	Termografia Ativa Modulada (<i>Lock-in Thermography</i>).....	38
2.4	Processamento Digital de Imagens.....	41
2.4.1	Imagem Digital.....	42
2.4.2	Segmentação de Imagens.....	44
2.4.2.1	Limiarização Global Utilizando o Método de Otsu.....	46
2.4.3	Correção de Distorção em Imagens Digitais.....	47
2.5	Transformada de Fourier.....	48
2.6	Análise de Quatro Pontos por Ciclo de Modulação.....	50
2.7	Análise de Componentes Principais.....	52
2.8	Função Gaussiana Bidimensional Elíptica.....	53
3	Revisão Bibliográfica.....	54
4	Metodologia.....	60
4.1	Materiais e Construção do Arranjo Experimental.....	61
4.2	Procedimento Computacional.....	64
4.2.1	Geração das Matrizes de Temperatura.....	65
4.2.2	Rotina de Segmentação.....	65
4.2.3	Aplicação das Técnicas de Análise.....	66
5	Resultados e Discussão.....	71
5.1	Construção e Testes do Arranjo Experimental para Ensaios de DLIT.....	71
5.2	Processamento Digital das Imagens Térmicas.....	76
5.2.1	Levantamento da Base de Dados.....	77
5.2.2	Rotina de Segmentação.....	81
5.2.3	Caracterização dos Defeitos nas Células Fotovoltaicas.....	84
5.2.3.1	Caracterização por PCA.....	84
5.2.3.2	Caracterização por 4-SPSM.....	89
5.2.3.3	Caracterização por FFT.....	92

5.2.4	Comparação entre o Método Proposto Usando uma Corrente Elétrica Senoidal Verdadeira e a Técnica Usando um Sinal PWM.....	97
5.2.5	Avaliação da Reprodutibilidade dos Ensaios de DLIT	98
5.2.6	Análise do Custo Computacional	100
5.2.7	Classificação das Células Fotovoltaicas: Método da Função Gaussiana Bidimensional	101
6	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	105
	Referências	107
	APÊNDICE A – Tabelas	114
	APÊNDICE B – Circuito <i>Buffer Push-Pull</i>	117

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário de grande demanda energética e investimentos em sistemas de energia renovável, a geração solar fotovoltaica tem apresentado uma importante ascensão. As previsões indicam um declínio adicional de custos e um aumento contínuo na capacidade fotovoltaica à medida que avançamos para um futuro de energia mais limpa [1]. Em todo o mundo, em 2020, foi contabilizado um aumento de 138,2 GW de energia solar instalada, representando um aumento de 18% em relação a 2019, o que elevou a capacidade solar acumulada global para 773,2 GW, um aumento de 22% [2]. Espera-se que, até 2040, a energia solar se torne a mais importante fonte de energia renovável do planeta [3].

Uma preocupação que tem surgido nos últimos anos é com relação à estimativa da quantidade de módulos no fim da sua vida útil. Conforme a capacidade de geração de energia solar aumenta, haverá um crescimento proporcional na quantidade de módulos fotovoltaicos que alcançam o final de sua vida útil. Com base na premissa de uma vida útil de 30 anos, incluindo diferentes cenários de deterioração, estima-se que a quantidade de módulos fotovoltaicos no final de sua vida útil colocados para descarte possa chegar a 1 milhão de toneladas em 2035 [4]. Aliado a isso, ainda não existem políticas de descarte de módulos fotovoltaicos vigentes, o que pode ocasionar, futuramente, um problema de cunho ambiental.

Em contrapartida, os investimentos em novas tecnologias fotovoltaicas mais eficientes e robustas visam, dentre outros objetivos, desenvolver técnicas capazes de monitorar o desempenho desses sistemas. Assim, torna-se possível identificar e diagnosticar defeitos, como a degradação das células fotovoltaicas decorrente do processo de fabricação, transporte e instalação muitas vezes não identificáveis por inspeção visual. Essas imperfeições impactam diretamente na energia elétrica gerada por esses dispositivos [5].

Dentre as principais técnicas de monitoramento de sistemas fotovoltaicos atualmente disponíveis, a termografia infravermelha (do inglês *infrared thermography* -

IRT) destaca-se como uma das principais ferramentas em técnicas de monitoramento não destrutivo de dispositivos fotovoltaicos e muitos outros materiais, como exposto em [6]. A IRT é capaz de transformar a energia térmica proveniente da radiação emitida na faixa do espectro eletromagnético infravermelho (do inglês *infrared* - IR) pela superfície de um objeto em uma imagem visível [7]. A IRT tem sido usada na inspeção de propriedades termofísicas, descontinuidades, defeitos e características abaixo da superfície, corrosão oculta e espessura de revestimentos [8].

Segundo Teubner et al. [9], relativamente aos sistemas de geração fotovoltaica, a termografia tem sido considerada um importante recurso utilizado na avaliação qualitativa desses sistemas no intuito de caracterizar regiões de defeitos existentes e visa identificar anomalias térmicas nos módulos fotovoltaicos evitando, assim, que comprometam todo o funcionamento do sistema fotovoltaico. Breiteinstein e Langenkamp [10] ressaltam que a IRT, enquanto forma de medir a distribuição de temperatura sobre uma superfície, pode ser aplicada mesmo em superfícies rugosas e, por meio desta técnica, pode-se obter a imagem de uma amostra a uma certa distância sem estabelecer contato direto com a superfície. Segundo Breiteinstein e Langenkamp [10], as câmeras infravermelhas (IR), que utilizam matriz de plano focal, são responsáveis por combinar alta sensibilidade térmica com altas taxas de aquisição de imagem; a termografia baseada em câmeras IR provou fornecer os melhores desempenhos em relação à sensibilidade de detecção dentro de um tempo de medição limitado.

A IRT pode ainda ser dividida em duas categorias: termografia ativa e passiva. Na termografia passiva, o material analisado apresenta uma diferença de temperatura em relação ao ambiente que o cerca, não havendo necessidade de controle ou estímulo por parte de quem executa o procedimento, apenas monitoramento. Na termografia ativa, a região de interesse é estimulada através de uma fonte de energia conhecida para produzir um contraste térmico que pode ser detectado com o uso de uma câmera IR [11]. Nesse aspecto, a termografia modulada (do inglês *lock-in thermography* - LIT) utiliza uma câmera IR para verificar a temperatura da superfície de uma onda térmica que se propaga através de um dado material produzindo imagens térmicas [12].

Em geral, uma vantagem expressiva da termografia ativa sobre o método passivo é a menor dependência das condições ambientais [13] e, particularmente, para o caso da LIT, a excitação por sinal modulado também configura uma característica importante à técnica. Existem, na literatura científica, vários estudos que usam a LIT para caracterizar defeitos em células fotovoltaicas [14-21]. Dois tipos principais de LIT possuem destaque:

dark lock-in thermography (DLIT), ou termografia ativa modulada no escuro, e *illuminated lock-in thermography* (ILIT), ou termografia ativa modulada iluminada. O primeiro é usado aplicando uma polarização reversa para concentrar a corrente em *shunts* ou uma polarização direta para detectar *shunts*; o segundo tipo usa a luz em vez da tensão aplicada pelos contatos para conduzir correntes através dos *shunts* [22,23]. Essas regiões, tradicionalmente chamadas de “*shunts*”, são locais que indicam uma corrente escura (ou *dark current*) fortemente aumentada e podem mostrar uma característica linear (ôhmica) [24].

No presente trabalho, é proposta a implementação de uma metodologia de ensaio não destrutivo baseada em termografia ativa modulada aplicada a células fotovoltaicas com ênfase na detecção de defeitos. Pretende-se, portanto, obter um perfil térmico modulado a partir da aplicação de um sinal de tensão elétrica senoidal em diferentes frequências de modulação, amplitudes e níveis de *offset* a células fotovoltaicas defeituosas e saudáveis, o que confere ineditismo à esta aplicação quando comparado à modulação por largura de pulso (do inglês *pulse width modulation* – PWM) convencional adotada em outros trabalhos [23-27]. A utilização do PWM obriga a célula a operar sempre no mesmo ponto operacional. No entanto, uma fonte de energia senoidal faz com que a célula fotovoltaica opere em uma ampla faixa de pontos I-V em sua curva característica. Espera-se que, desse modo, essa particularidade do procedimento experimental possa evidenciar melhor alguns defeitos.

Ao considerar, na metodologia adotada nesta pesquisa, uma janela de tempo adequada, tem-se que a temperatura da superfície da célula fotovoltaica ensaiada evolui periodicamente em um padrão modulado do modo de operação transiente para o regime estacionário. Dessa forma, as ondas térmicas geradas no interior da célula ajudam na detecção de defeitos, pois parte dessas ondas são refletidas e capturadas pela câmera infravermelha. Para análise e tratativa dos dados térmicos serão utilizadas técnicas de processamento digital de imagens (PDI), baseadas em rotinas de segmentação e nas metodologias da transformada rápida de Fourier, análise de componentes principais e técnica dos quatro pontos por ciclo de modulação, conforme demonstrado em 2023 por Vieira e outros [28] na caracterização de defeitos em células fotovoltaicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO PRIMÁRIO

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver uma metodologia capaz de detectar defeitos em células fotovoltaicas de forma qualitativa e quantitativa baseado no monitoramento por ensaios não destrutivos utilizando termografia ativa modulada.

1.1.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Como forma de atingir o objetivo primário deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos secundários:

- i. Elaborar procedimento experimental baseado em termografia ativa modulada no escuro aplicada a células fotovoltaicas com a proposição do uso de um sinal de tensão elétrica senoidal como sinal de excitação;
- ii. Montar e testar aparato experimental necessário à realização dos ensaios termográficos;
- iii. Construir uma base de dados estruturada a partir da realização dos ensaios termográficos no escuro de células fotovoltaicas aquecidas pela aplicação de sinal de tensão elétrica modulado (tipo senoidal);
- iv. Desenvolver uma rotina computacional capaz de segmentar as imagens da base de dados restringindo a região de interesse na qual está contida a célula fotovoltaica;
- v. Desenvolver rotinas computacionais específicas para obtenção do mapa de temperaturas referidas aos pixels de todas as imagens térmicas;
- vi. Desenvolver rotinas computacionais específicas para aplicação de técnicas de análise do perfil de aquecimento senoidal (resposta térmica) das células;
- vii. Utilizar uma medida de correlação entre a medição e uma distribuição gaussiana bidimensional como indicador da existência de defeitos nas células fotovoltaicas com base na resposta térmica das células ao sinal de excitação elétrica senoidal.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, além da Introdução. No Capítulo 2, intitulado “Fundamentação Teórica”, define-se a energia solar fotovoltaica, bem como o princípio de funcionamento da célula fotovoltaica, os princípios básicos e modalidades da termografia infravermelha, além de algumas técnicas de processamento digital de imagens: a transformada de Fourier; o método de análise dos quatro pontos por ciclo de modulação, análise de componentes principais e a função gaussiana bidimensional. No Capítulo 3, denominado “Revisão Bibliográfica”, são expostos os trabalhos relacionados aos ensaios de termografia ativa modulada, principalmente aqueles aplicados a células e módulos fotovoltaicas, destacando o que há de mais relevante na literatura até o presente momento. No Capítulo 4, “Metodologia”, são apresentados o sistema experimental construído e utilizado para a aquisição das imagens termográficas, os procedimentos de obtenção das matrizes de temperatura das imagens térmicas das células fotovoltaicas, a rotina de segmentação executada, os algoritmos de aplicação das técnicas selecionadas para análise das imagens térmicas e os algoritmos de classificação desenvolvidos para a detecção de defeitos. Os resultados das análises dos dados térmicos obtidos ao longo do desenvolvimento da pesquisa são apresentados no Capítulo 5. No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e as sugestões para a continuidade da pesquisa desta dissertação. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que nortearam o presente estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção irá abordar a energia solar fotovoltaica bem como o princípio de funcionamento da célula fotovoltaica e os princípios básicos e modalidades da termografia infravermelha. Além disso, serão apresentados os fundamentos das técnicas de processamento digital de imagens utilizadas neste trabalho, bem como a transformada rápida de Fourier (do inglês *fast Fourier transform* - FFT), método de análise dos quatro pontos por ciclo de modulação (do inglês *four-step phase-shifting method* – 4-SPSM), análise de componentes principais (do inglês *principal component analysis* – PCA) e função gaussiana bidimensional.

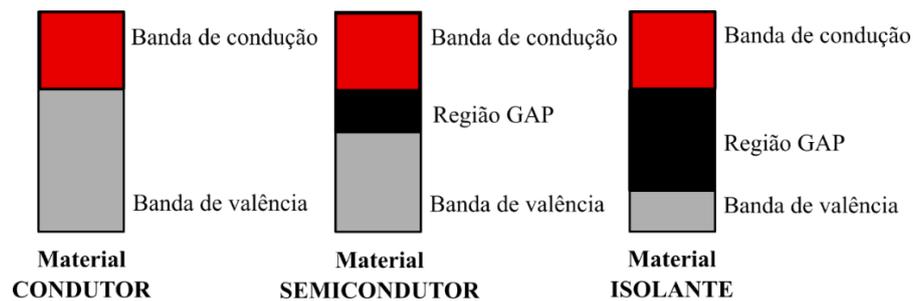
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica define-se como a energia elétrica gerada por meio da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Este processo de conversão energética ocorre em um dispositivo, a célula fotovoltaica, que opera de acordo com o princípio do efeito fotovoltaico. Dentre as principais vantagens da energia solar fotovoltaica podem ser citados: a confiabilidade, o baixo custo de operação e manutenção, fonte primária de energia gratuita, limpa e abundante, permite que a geração ocorra próxima do centro de consumo e sem emissão de ruídos [29]. A energia solar fotovoltaica está presente em diversas tipologias de sistemas fotovoltaicos abrangendo aplicações nos campos de tecnologia aeroespacial [30], telecomunicações [31, 32], bombeamento hidráulico [33, 34], dessalinização da água [30, 32], entre outros.

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores que possuem uma banda de valência ocupada por elétrons e uma banda de condução vazia a baixas temperaturas. A distância entre essas duas bandas, conhecida como *gap* de energia, geralmente é cerca de 1 eV nos semicondutores, tornando-os diferentes dos isolantes que têm *gaps* maiores, da ordem de vários eV, como ilustrado na Figura 1 [35]. Por definição, semicondutores

são materiais que possuem sua banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução com ausência de elétrons sob temperatura de zero absoluto (0 K). Os semicondutores são materiais que não podem ser classificados como condutores nem como isolantes, pois necessitam de uma energia inferior a 3 eV para transportar um elétron da banda de valência para a banda de condução, sendo o silício o mais comumente utilizado [5].

Figura 1 – Representação esquemático-illustrativa da banda de condução, região de *gap* e banda de valência dos materiais condutores, semicondutores e isolantes.



Fonte: autoria própria.

Ao incidir sobre um material semicondutor, a luz solar fornece uma quantidade suficiente de energia ao elétron da camada mais externa dos átomos do material e, com isso, esse elétron passa da camada de valência para a camada de condução. Esse processo, como definido pelo efeito fotovoltaico, propicia a geração de eletricidade tal como acontece com as células fotovoltaicas. No caso das células fotovoltaicas, como exposto em [36], há, ainda, a incorporação de uma junção PN no material semicondutor através da qual se estabelece uma barreira de potencial. A partir da junção dos materiais tipo N e tipo P, acontece uma migração de elétrons do lado tipo N, que possui um excedente de elétrons gerados pela ação dos fótons incidentes, para o lado tipo P, que possui um excedente de lacunas. Na construção da célula fotovoltaica, a superfície na qual incide a luz solar é composta do material tipo N e na camada logo abaixo encontra-se o material tipo P. Na Figura 2 é apresentado um modelo clássico de representação para a célula fotovoltaica.

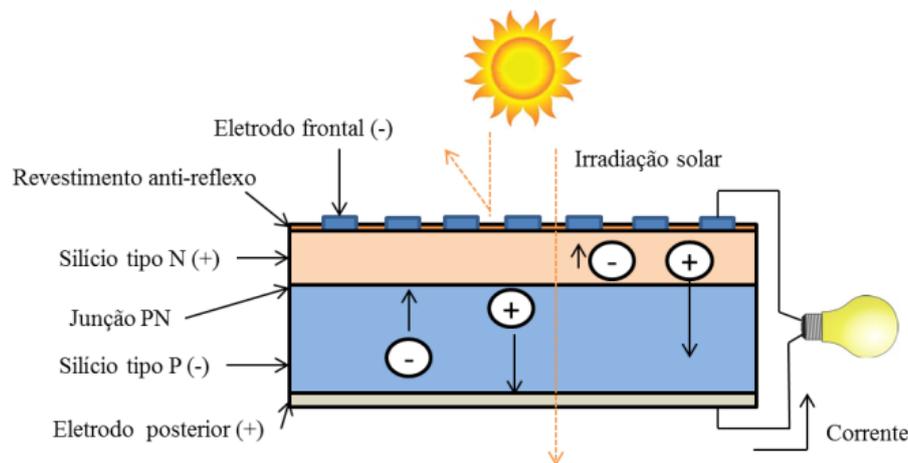
As tecnologias de células fotovoltaicas são comumente classificadas em três gerações de acordo com a matéria-prima empregada e o grau de desenvolvimento comercial. Sampaio e González [29] definem essas gerações como:

- **Sistemas fotovoltaicos de primeira geração:** são aqueles plenamente estabelecidos no mercado, se fundamentam na tecnologia do silício cristalino (c-

Si), tanto em sua forma cristalina simples (sc-Si) quanto na forma multicristalina (mc-Si);

- **Sistemas fotovoltaicos de segunda geração:** se baseiam em tecnologias de filme fino, englobando principalmente três vertentes essenciais: (1) Silício amorfo (a-Si) e micro silício amorfo (a-Si/ μ c-Si); (2) telureto de cádmio (CdTe); e (3) seleneto de cobre e índio (CIS), juntamente com cobre-índio-gálio-selênio (CIGS);
- **Terceira geração de sistemas fotovoltaicos:** abarcam tecnologias orgânicas, que ainda estão em fase de demonstração ou não foram amplamente comercializadas, bem como novos conceitos em desenvolvimento.

Figura 2 – Modelo de representação da célula fotovoltaica.



Fonte: [37].

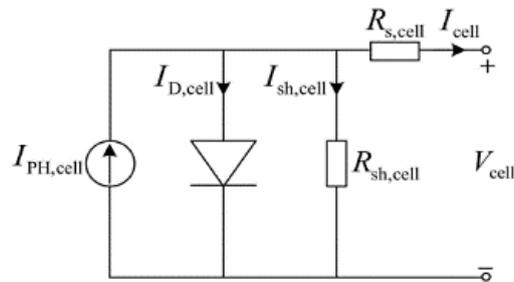
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA

FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica pode ser eficientemente representada por um modelo elétrico que consiste em elementos de um circuito elétrico equivalente. O modelo mais comum para descrever o comportamento elétrico das células fotovoltaicas é o modelo de um diodo. Neste modelo, a célula é representada como uma fonte de corrente fotogerada que está conectada, em paralelo, com o diodo. A junção PN da célula, que se assemelha a um diodo, exibe os efeitos da corrente de saturação reversa e do fator de idealidade do diodo. Na Figura 3 é ilustrado o modelo elétrico equivalente de diodo único para uma célula

fotovoltaica, em que $I_{PH,cell}$ é a corrente fotogerada na célula [A], $I_{D,cell}$ é a corrente no diodo [A], $I_{sh,cell}$ é a corrente [A] que flui pela resistência paralelo $R_{sh,cell}$ [Ω], $R_{s,cell}$ é a resistência série da célula [Ω], e V_{cell} e I_{cell} são a tensão [V] e a corrente [A] nos terminais da célula, respectivamente.

Figura 3 – Modelo elétrico equivalente de diodo único de uma célula fotovoltaica.



Fonte: [38].

Considerando as perdas devido ao material da célula fotovoltaica (FV), características de resistência, a resistência interna em série (R_s) da célula consiste na recombinação da região da junção PN, resistência do material e resistência de contato. Por outro lado, a resistência interna paralela (R_p) da célula varia com a corrente de fuga na borda em pequenos curtos-circuitos ou qualquer outro caminho alternativo para a corrente fotogerada [38]. Os componentes resistivos do modelo refletem diversos fatores que ocasionam perda de potência à célula FV.

Pela aplicação da Lei de Kirchhoff das correntes no circuito da Figura 3, obtém-se a Equação 1 que relaciona as correntes na célula fotovoltaica:

$$I_{cell} = I_{PH,cell} - I_D - I_{sh,cell}. \quad (1)$$

Em que: I_{cell} é a corrente resultante na célula [A]; $I_{PH,cell}$ é a corrente fotogerada [A]; I_D é a corrente no diodo [A]; e $I_{sh,cell}$ é a corrente de fuga pela resistência paralela [A].

A Equação 2, baseada no modelo de Shockley, expressa, matematicamente, a corrente que flui na junção PN do diodo.

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{akT} \right] - 1 \right\}. \quad (2)$$

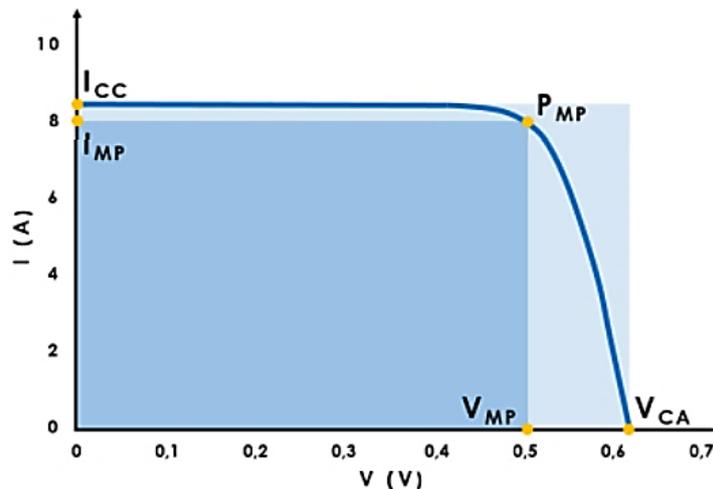
Em que: I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo [A]; α é o fator de idealidade do diodo; k é a constante de Boltzmann ($1,3806488 \times 10^{-23}$ [J.K⁻¹]); T é a temperatura absoluta da junção [K]; V_{cell} é a tensão nos terminais da célula [V]; R_s é a resistência série da célula [Ω]; e I_{cell} é a corrente na célula [A].

Assim, substituindo-se (1) em (2), tem-se a Equação 3 resultante que é conhecida como modelo de cinco parâmetros por relacionar os parâmetros $I_{PH,cell}$, I_0 , α , R_s e $R_{sh,cell}$ contidos no modelo do diodo.

$$I_{cell} = I_{PH,cell} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{\alpha k T} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh,cell}}. \quad (3)$$

A Equação 3 descreve o comportamento da curva característica I-V, corrente *versus* tensão, de uma célula fotovoltaica, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica onde são indicados os seus principais parâmetros.



Fonte: [39].

O formato da curva característica I-V depende da tecnologia da célula fotovoltaica quanto mais próximo do formato quadrado ela for, maior será a eficiência da célula [5].

Os principais parâmetros que podem ser percebidos na curva I-V são:

- **Corrente de curto-circuito (I_{CC}):** máxima corrente gerada pela célula fotovoltaica e que pode ser medida na condição em que os terminais da célula estejam curto-circuitados;
- **Tensão de circuito aberto (V_{CA}):** tensão máxima gerada pela célula quando a corrente é zero, ou seja, seus terminais estão em aberto;

- **Ponto de máxima potência (P_{MP}):** ponto da curva I-V em que ocorre a máxima transferência de potência pela célula e é composto pela corrente de máxima potência (I_{MP}) e tensão de máxima potência (V_{MP}).

Outros parâmetros relacionados à curva I-V que complementam a caracterização da mesma são o fator de forma (FF) e a eficiência (η). O fator de forma é definido como a razão entre a máxima potência, em condição padrão, produzida pela célula e o produto entre a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto, como descrito na Equação 4. Adicionalmente, a eficiência revela o grau de rendimento na conversão da energia solar em energia elétrica, e é calculada pela razão entre a potência máxima gerada pela célula e a potência da radiação incidente (P_{IN}) sobre ela, de acordo com a Equação 5. Seu valor é influenciado por diversos elementos, tais como o tipo de semicondutor empregado, o processo de fabricação, a presença de falhas e impurezas no semicondutor, entre outros [5].

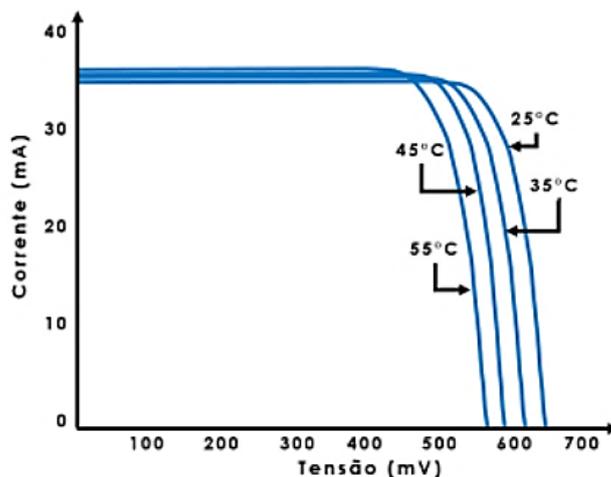
$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{CA} I_{CC}} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{IN}} = \frac{V_{MP} I_{MP}}{AG} \quad (5)$$

Em que: A é a área do dispositivo fotovoltaico [m^2] e G é a irradiância incidente [W/m^2].

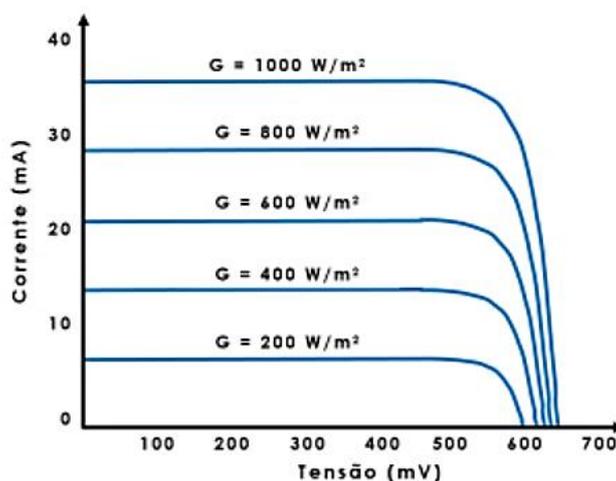
Alguns parâmetros externos, como a temperatura e irradiância solar, influenciam diretamente o formato da curva I-V e, conseqüentemente, na potência gerada pela célula FV. No caso da temperatura, o impacto mais significativo ocorre na tensão da célula e, para a irradiância, tem-se variações mais expressivas nos níveis de corrente de curto circuito por uma relação de proporcionalidade direta, como pode ser visto na Figura 5 e Figura 6.

Figura 5 – Curvas I-V de células fotovoltaicas de silício para diferentes níveis de temperatura.



Fonte: [39].

Figura 6 – Curvas I-V de células fotovoltaicas de silício para diferentes intensidades de radiação.



Fonte: [39].

2.3 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

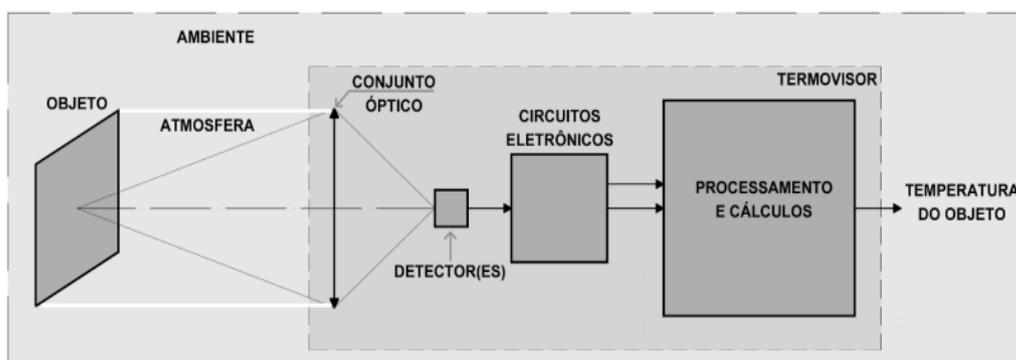
A descoberta da radiação infravermelha foi atribuída ao astrônomo alemão William Herschel. No ano de 1800, em um de seus experimentos, Herschel se empenhava em identificar as cores do espectro eletromagnético responsáveis pelo fenômeno de aquecimento em objetos. Para esse propósito, empregou como elementos um prisma, cartão e termômetros equipados com lâmpadas escurecidas. Durante o experimento, a luz solar passava através do prisma e Herschel cuidadosamente observava o comportamento da temperatura ao movimentar o termômetro da região violeta para a região vermelha,

seguindo a sequência do arco-íris gerado pela luz. William concluiu que a maior elevação de temperatura ocorria em uma faixa além do espectro visível [41, 42].

A termografia IR, que opera na faixa da radiação infravermelha, é uma técnica de aquisição e análise de informações térmicas a partir de imagens obtidas a distância, ou seja, sem contato. A termografia IR baseia-se no fenômeno físico de que todo objeto com temperatura acima de zero absoluto, emite radiação eletromagnética em função da excitação das suas moléculas [43]. A maioria das medições de temperatura por infravermelho é feita na região entre 2 a 13 micrometros [44].

Os instrumentos responsáveis pela aquisição das imagens térmicas são os termovisores, ou câmeras termográficas. Estes podem ser encontrados de modelos e complexidades tecnológicas distintas, porém compartilham do mesmo princípio básico de funcionamento. Na Figura 7 tem-se ilustrado o esquema simplificado do funcionamento de um termovisor.

Figura 7 – Diagrama esquemático do funcionamento de um termovisor.



Fonte: [43].

Como representado na Figura 7, o objeto a ser analisado irradia uma energia na faixa de frequência do infravermelho do espectro eletromagnético. Essa energia se propaga pela atmosfera até alcançar o termovisor que, ao ser recebida pelo detector é amplificada em circuitos eletrônicos e convertida em um sinal condicionado para o processamento eletrônico, por exemplo tensão elétrica. Cálculos são efetuados para se correlacionar a irradiação recebida com a temperatura do objeto e, finalmente, a imagem térmica é construída e visualizada ou armazenada pelo operador do equipamento [43]. Logo, pode-se inferir que a temperatura do objeto é medida indiretamente por meio da medição da radiação captada pelo detector do instrumento e pelo algoritmo de cálculo.

Um termovisor deve ser, portanto, capaz de converter a radiação IR recebida pelos detectores da câmera, em uma imagem visual bidimensional, também chamada de

termograma, geralmente numa escala de cores ou tons de cinza. [43]. O termograma corresponde a uma matriz (quadrática ou retangular) de dados discretos (pixels), onde cada pixel assume o valor da intensidade de cores proporcional a um sinal adquirido pelos sensores térmicos e apresentado em escala de temperatura que correlaciona suas cores com a temperatura do objeto inspecionado [45]. Entretanto, a fim de se obter uma medição coerente da temperatura da superfície de um material por meio de um termovisor, é fundamental conhecer a emissividade do material em questão bem como os parâmetros: temperatura ambiente, umidade relativa, temperatura ambiente refletida e distância de observação.

Ao apontar para um objeto, a câmera IR recebe, além da radiação emitida pelo objeto, a radiação que o entorno reflete na superfície do objeto. Essas radiações sofrem uma atenuação no percurso da medição. Isso origina uma terceira contribuição de radiação recebida pelo termovisor que é proveniente da atmosfera. Outros distúrbios no meio que possam vir a gerar contribuição em termos de radiação, como a dispersão da luz solar, geralmente são difíceis de mensurar e possuem intensidades pequenas o suficiente para que sejam desconsiderados nessa análise.

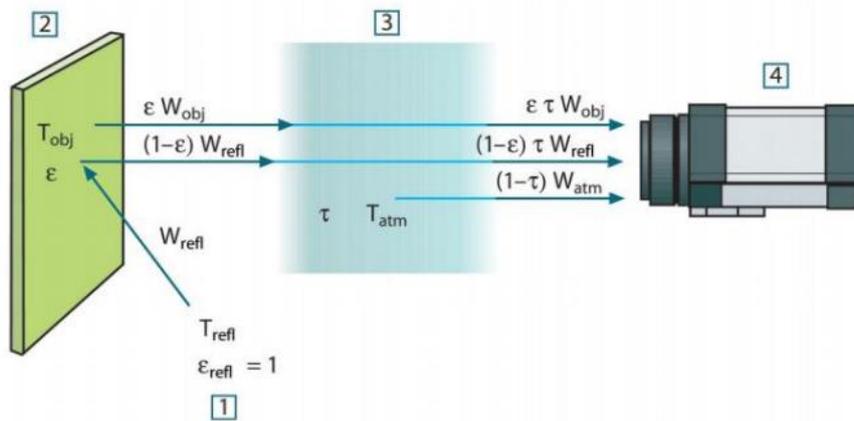
Na Figura 8 é representada a maneira como os sinais são recebidos por um termovisor em uma medição. No esquemático, W_{obj} , W_{refl} e W_{atm} representam a parcela de radiação emitida pelo objeto, refletida pelo objeto e transmitida pela atmosfera, respectivamente. Consequentemente, tem-se que: $\varepsilon\tau W_{obj}$ é a emissão feita pelo objeto, em que ε é a emitância do objeto e τ é a transmitância da atmosfera; $(1 - \varepsilon)\tau W_{refl}$ é a emissão refletida pelas fontes do ambiente, em que $(1 - \varepsilon)$ é a refletância do objeto; $(1 - \tau)\tau W_{atm}$ é a emissão a partir da atmosfera, em que $(1 - \tau)$ é a emitância da atmosfera.

A emissividade pode ser definida como a razão entre a energia radiante emitida por uma superfície real e a energia radiante emitida por um corpo negro, de mesma área e nas mesmas condições de temperatura [46]. O corpo negro é um caso ideal que considera um corpo que emite a quantidade máxima possível de radiação em qualquer comprimento de onda a qualquer temperatura. Tal corpo também absorve toda a radiação incidente sobre ele em qualquer comprimento de onda e temperatura [47].

De modo geral, três tipos de fontes de radiação são definidos pelo modo como a emitância espectral varia com o comprimento de onda. Sendo assim, para o corpo negro $\varepsilon = 1$, para o corpo cinza ε assume valor constante e menor que 1, e para uma superfície

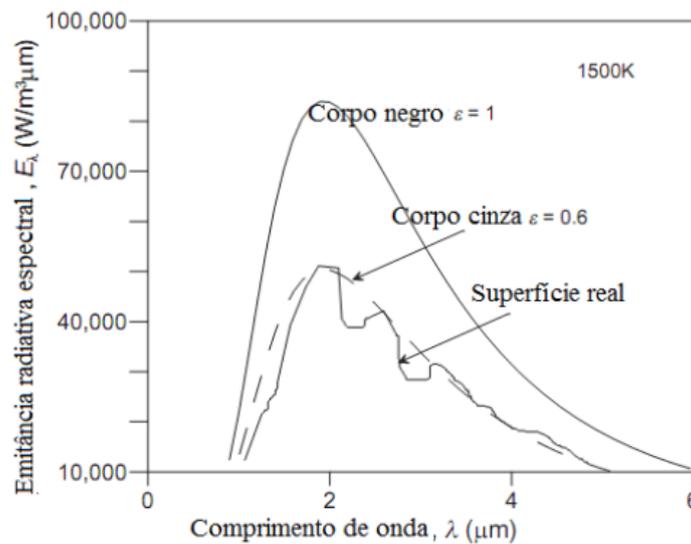
real ε varia de acordo com o comprimento de onda. A curva da distribuição espectral dessas três fontes de radiação é apresentada na Figura 9.

Figura 8 – Representação esquemática do fluxo radiativo recebido por um termovisor.



Fonte: [44].

Figura 9 – Emitância espectral para superfície negra, cinza e real.



Fonte: [48].

A termografia tem sido notavelmente bem-sucedida na inspeção de materiais com alta emissividade, com variações entre 0,7 e 0,9. Esse êxito deriva, em parte, da intensa radiação emitida por materiais com alta emissividade, conforme previsto pela Lei de Stefan-Boltzmann definida adiante. Além disso, a eficácia é também atribuída ao fato de que materiais que possuem baixa emissividade apresentam elevada taxa de reflexão fazendo com que reflitam radiação proveniente de outras fontes. Isso pode acarretar na

presença de ruídos na imagem termográfica e reduzir a clareza dos dados de interesse provenientes do objeto em inspeção.

A emissividade é uma propriedade inerente de cada objeto e varia com a direção da radiação, o comprimento de onda e os atributos superficiais, como a rugosidade. Com base na emissividade específica do objeto e nos princípios estabelecidos pela Lei de Planck, a câmera termográfica calcula e apresenta a temperatura superficial do objeto. A Equação 6 descreve a Lei de Planck.

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda KT} - 1)}. \quad (6)$$

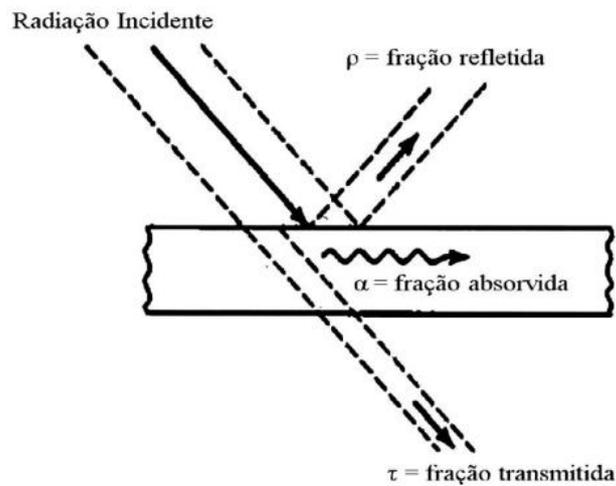
Em que: $M_{\lambda}(T)$ é a intensidade da radiação espectral do corpo negro [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$]; T é a temperatura absoluta do objeto (corpo negro) [K]; h é a constante de Planck, $6,626069\ 57 \times 10^{-34}$ [J.s]; c é a velocidade da luz no vácuo, $2,997924\ 58 \times 10^8$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; λ é o comprimento de onda analisado [μm]; e K é a constante de Boltzmann..

Para garantir uma inspeção termográfica precisa, é recomendado posicionar o termovisor com ângulo de medição zero entre a câmera e a normal à superfície do objeto em análise, ou seja, alinhado paralelamente à normal. Entretanto, estudos experimentais, em [43], revelaram que quando o ângulo é menor que 45° , o erro de medição devido ao desalinhamento óptico é considerado desprezível.

Ao interagir com um meio semitransparente (sólido ou líquido), a radiação pode sofrer alguns processos resultantes, sendo eles: absorção, reflexão ou transmissão. Os três processos podem, inclusive, acontecer de forma simultânea (vide Figura 10). Esses processos dão origem às conhecidas propriedades de absortividade (α), refletividade (ρ) e transmissividade (τ) cujas definições são apresentadas por Perin [46]:

- **Absortividade:** é a fração de energia incidente na superfície de um corpo que é absorvida por esse corpo. Sendo que a absortividade para o corpo negro é igual a 1 para todos os comprimentos de onda;
- **Refletividade:** é a fração de energia incidente na superfície de um corpo que é refletida por este corpo. Sendo que a refletividade para o corpo negro é igual a zero para todos os comprimentos de onda;
- **Transmissividade:** a transmissividade de materiais semitransparentes é a fração da energia incidente que transpõe o material.

Figura 10 – Interação entre a energia radiante e o material alvo.



Fonte: [49].

Assim que, para as superfícies radiantes cinzas, estabelece-se a Equação 7:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (7)$$

Para superfícies opacas, ou seja, cuja transmissividade é nula ($\tau = 0$), a Equação 8 simplifica a Equação 7 em:

$$\alpha + \rho = 1. \quad (8)$$

Ou ainda, utilizando-se a Lei de Kirchoff, a qual define a relação entre a emissividade e absorvidade de um corpo, para o caso em que as superfícies são difusas, cinzas e opacas, obtém-se a Equação 9:

$$\varepsilon = 1 - \rho. \quad (9)$$

De maneira geral, algumas das principais aplicações da termografia são:

- monitoramento de dispositivos de sistemas fotovoltaicos;
- monitoramento de instalações elétricas prediais e industriais;
- inspeções mecânicas e eletromecânicas;
- diagnóstico estrutural na construção civil;
- avaliação do nível de corrosão;
- modelagem aerodinâmica;

- inspeções em instalações de usinas nucleares.

2.3.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS BÁSICOS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

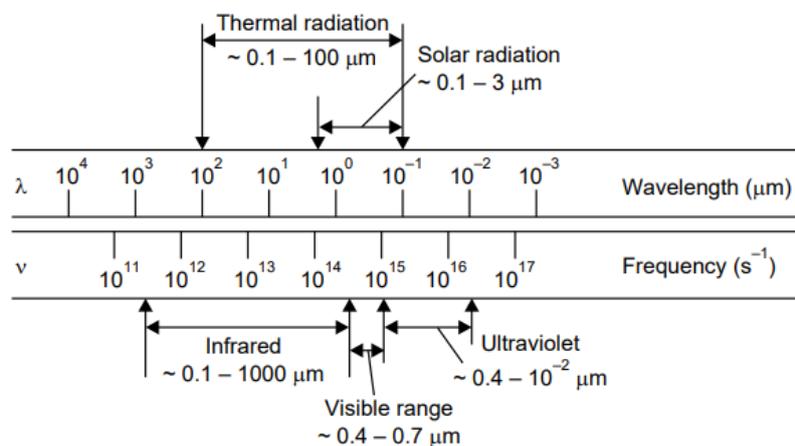
A radiação infravermelha obedece às leis das radiações nas diferentes extensões do espectro eletromagnético. Assim, pode ser absorvida, refletida ou refratada e trafega no vácuo à velocidade da luz, aproximadamente. A frequência deste tipo de radiação pode ser determinada pela Equação 10.

$$f = \frac{c}{\lambda}. \quad (10)$$

Em que f é a frequência da onda [Hz], c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda [m].

Na Figura 11, é apresentado o espectro eletromagnético típico onde pode-se observar a região referente à radiação infravermelha sendo compreendida entre aproximadamente $0,1 \mu\text{m}$ e $1000 \mu\text{m}$.

Figura 11 – Espectro típico de radiação eletromagnética devido à temperatura de um corpo.



Fonte: [47].

Nesse aspecto, é importante entender o conceito de transferência de calor. Sejam dois ou mais corpos que estejam a temperaturas diferentes entre si, existirá uma transferência de calor (ou transferência de energia térmica) entre eles até que a temperatura dos corpos alcance o equilíbrio térmico. O fluxo de calor se dá sempre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. O mecanismo de transferência de calor pode acontecer de três modos: convecção (normalmente entre fluidos), condução

(normalmente entre sólidos) e radiação. A definição dessas três modalidades é definida em [47] da seguinte forma:

- **Convecção:** é o processo de transferência de calor entre uma superfície e um fluido que flui em contato com a superfície;
- **Condução:** é o modo de transferência de energia como calor devido à diferença de temperatura dentro de um corpo ou entre corpos em contato térmico sem o envolvimento de fluxo de massa e mistura;
- **Radiação:** o processo pelo qual o calor é transferido de um corpo devido à sua temperatura, sem o auxílio de qualquer meio intermediário.

É possível quantificar o processo de condução térmica por meio da Equação 11 conhecida como Lei de Fourier. Considerando uma superfície plana com distribuição de temperaturas $T(x)$:

$$q_x'' = -k \frac{dT(x)}{dx}. \quad (11)$$

Em que o fluxo térmico q_x'' [W/m²] é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência e é proporcional ao gradiente de temperatura $\frac{dT(x)}{dx}$ nesta mesma direção. O parâmetro k é a condutividade térmica [W/(m.K)] e é característico do material. A condutividade térmica inserida nesse contexto é uma propriedade termofísica do material e descreve a taxa com que o fluxo de calor escoar sob influência de um gradiente térmico [50]. O sinal negativo indica que o calor está sendo transferido na direção da temperatura decrescente.

Outra propriedade relacionada à análise da condução de calor quando em regime transiente é a difusividade térmica, que representa a velocidade com que o calor se difunde por meio de um material e pode ser expressa matematicamente em função das propriedades condutividade térmica, densidade e calor específico de acordo com a Equação 12:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}. \quad (12)$$

Em que α é a difusividade térmica; C_p é o calor específico [J./(kg.K)]; e ρ é a densidade [kg/m³].

Para o processo de convecção, a equação que descreve a taxa de transferência de calor possui a forma da Equação 13, também conhecida como Lei do Resfriamento de Newton.

$$q'' = h(T_s - T_\infty). \quad (13)$$

Em que q'' [W/m²], o fluxo de calor por convecção e é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e do fluido, T_s e T_∞ , respectivamente. h é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m².K)].

Para a emissão por radiação, a equação que descreve o fluxo térmico emitido é a Equação 14 (Lei de Stefan-Boltzmann). A Equação 14 indica, portanto, o poder emissivo de uma superfície descrevendo a relação entre a quantidade de radiação térmica por unidade de área superficial (E) emitida por um corpo e sua temperatura (T), em Kelvin.

$$E = \varepsilon_d \sigma_d T^4. \quad (14)$$

Em que ε_d representa a emissividade do corpo e σ_d é a constante de Stefan-Boltzmann.

2.3.2 TIPOS DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha pode ser dividida em duas categorias principais, sendo elas a termografia passiva e a termografia ativa. A seguir apresentam-se os conceitos e descrição de cada categoria.

- **Termografia passiva:** é uma variante referida como termografia convencional, representando a abordagem mais elementar dentre os ensaios termográficos. Sua simplicidade reside no fato de que o próprio objeto inspecionado emite radiação infravermelha, ou seja, há fonte interna de excitação térmica. Nesse caso, a inspeção não requer qualquer estímulo térmico externo do objeto. Um exemplo dessa modalidade de termografia é a avaliação de revestimentos internos de fornos, uma vez que a inspeção é realizada na superfície externa do forno e com isso consegue-se avaliar o estado e eficiência do material utilizado como revestimento dele [51].

- **Termografia ativa:** Ao contrário da abordagem de termografia passiva, a termografia ativa demanda a utilização de uma fonte de excitação, também conhecida como excitador térmico, para criar uma discrepância de temperatura, ou seja, um contraste térmico, entre a área defeituosa e a área sem defeitos [52]. A termografia ativa é uma metodologia flexível, pois permite que sejam feitas alterações no arranjo experimental, como no tipo de estímulo externo aplicado, para atender aos requisitos das mais diversas aplicações. Além da termografia ativa modulada, existem outras modalidades, tais como *step heating*, termografia ativa pulsada e a vibrotermografia.

2.3.3 TERMOGRAFIA ATIVA MODULADA (*LOCK-IN THERMOGRAPHY*)

Ao contrário da termografia tradicional que utiliza o fóton na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético para produzir imagens de um padrão de temperatura específico, a LIT usa excitação modulada para excitar portadores de carga periodicamente [52]. Nesse tipo de ensaio uma câmera IR é utilizada para realizar a medição da temperatura da superfície de um dado material a partir da captura de imagens térmicas a uma determinada taxa de *frames* e durante um tempo de aquisição definido. Todas as imagens capturadas são enviadas para uma unidade de processamento para serem avaliadas e analisadas por técnicas de processamento adequadas.

Na termografia modulada, realizada a uma frequência angular $\omega_{lock-in}$, o sinal de excitação $E(t)$ assume a forma genérica:

$$E(t) = E_{DC} + E_0 \text{sen}(\omega_{lock-in} t). \quad (15)$$

Em que, geralmente, para as fontes de aquecimento reais $E_0 \leq E_{DC}$ [52], sendo E_{DC} o nível DC do sinal e E_0 a amplitude da senoide. Todavia, apenas o termo senoidal contribui para a variação da temperatura da superfície do material.

Para uma amostra plana, a temperatura ao longo da amostra varia de acordo com a Equação 16 [12].

$$T_{z,t} = A(z) \cos[\omega t - \phi(z)] = T_0 e^{-\frac{z}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right). \quad (16)$$

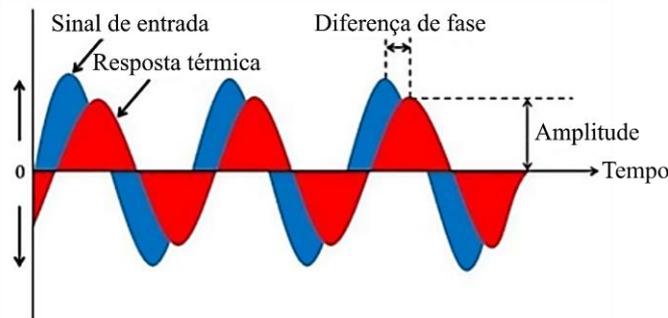
Em que: T_0 é a mudança inicial na temperatura [$^{\circ}\text{C}$]; z é a profundidade do defeito [m]; ω é a frequência angular [rad/s]; λ é o comprimento de onda térmica; $A(z)$ é a amplitude térmica; $\phi(z)$ é o deslocamento de fase da onda térmica; e μ é o comprimento de difusão térmica [m], sendo este último definido pela Equação 17.

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}. \quad (17)$$

Em que: f é a frequência [Hz] e α é a difusividade térmica do material [m^2s^{-1}].

As imagens térmicas são resultantes da propagação de ondas térmicas no interior do material excitado, as quais geram mudanças na amplitude e no ângulo de fase do sinal térmico de saída com relação ao sinal de entrada em cada pixel. Dessa forma, pode-se chegar a uma imagem de fase a partir da qual é possível medir o contraste de fase pela diferença de ângulo entre as regiões defeituosas e sadias [12]. Na Figura 12 é apresentado o princípio da detecção de defeitos usando LIT.

Figura 12 – Comparação entre o sinal de entrada e a resposta térmica de um ensaio de LIT.



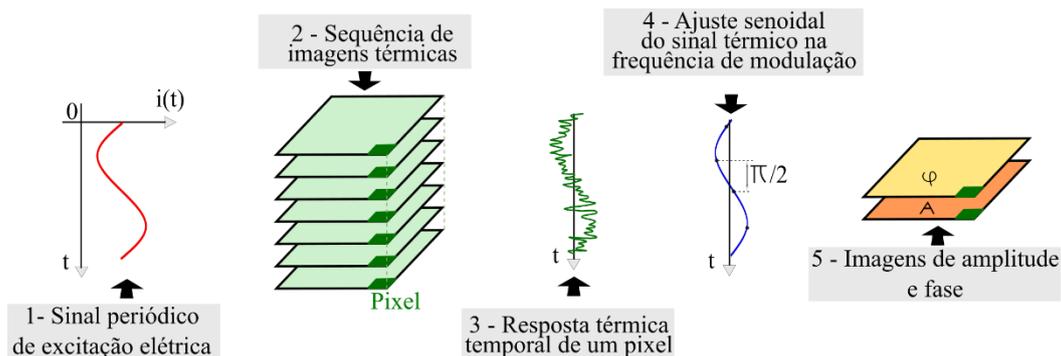
Fonte: Adaptado de [12].

Entretanto, a escolha da frequência de modulação do sinal de excitação ($f_{lock-in}$) pode resultar no fato de que o defeito não exiba nenhum deslocamento de fase em relação à região sadia no entorno, ainda que o comprimento da difusão térmica seja maior que a profundidade do defeito. Assim, para que haja uma boa estimativa dos defeitos na imagem de fase, é desejável que os ensaios de LIT sejam repetidos para várias frequências distintas dentro de uma faixa adequada para o tipo de material ensaiado e de estímulo externo aplicado [53, 54].

Na Figura 13 é apresentado o princípio matemático realizado pelos algoritmos de processamento de imagens térmicas advindas de ensaios com LIT destacando as imagens de amplitude e fase resultantes do processo e, em geral, obtidas pela aplicação de técnicas

como a FFT e 4-SPSM, por exemplo. O procedimento ilustrado na Figura 13 é o que se propõe neste trabalho, em que se considera um sinal de corrente elétrica senoidal como sinal de entrada a ser aplicado à célula FV. Dessa maneira, obtém-se uma sequência de imagens térmicas cuja variação temporal da temperatura é analisada pixel a pixel pelas estratégias de processamento até resultar nas imagens finais.

Figura 13 – Princípio matemático da LIT para derivar as imagens de amplitude e fase do conjunto de imagens termográficas.

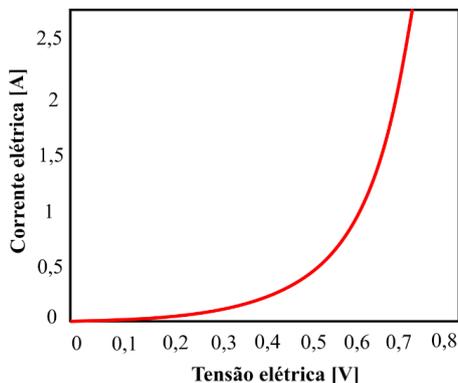


Fonte: autoria própria.

No caso especial das medições de corrente e tensão em ambientes sem iluminação de acordo com o método de ensaio DLIT, essas são bastante valiosas para analisar as propriedades do diodo. Quando a célula é exposta à luz, pequenas variações na intensidade luminosa introduzem um ruído significativo no sistema, comprometendo a sua reprodução. No entanto, as medições por DLIT por injeção de sinal elétrico na célula em vez de iluminação evita esse problema. Em alguns casos, a curva I-V iluminada é essencialmente a curva I-V no escuro deslocada pela corrente gerada pela luz [10].

Na Figura 14 é apresentada a curva I-V no escuro para uma dada célula fotovoltaica.

Figura 14 – Modelo da curva I-V no escuro para DLIT aplicada a uma célula fotovoltaica.

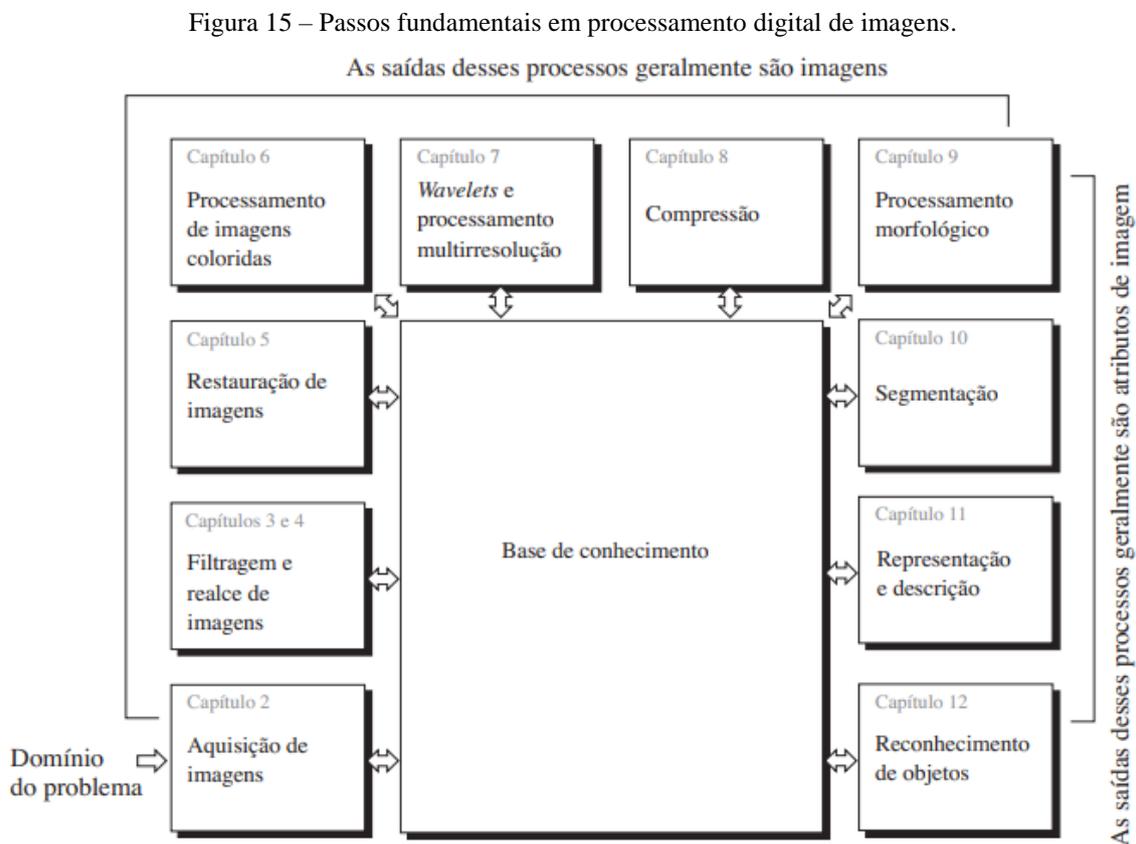


Fonte: autoria própria.

Adicionalmente, outro aspecto relevante é que nas medições por DLIT, a corrente elétrica flui na direção oposta haja visto que a célula, nesses casos, assume o papel de carga. Desse modo, os caminhos da corrente elétrica são diferentes e por essa razão apresentam uma menor resistência em série nas medições no escuro quando comparado às medições iluminadas.

2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

A área de processamento digital de imagens abrange o processamento de imagens em formato digital por meio de um computador digital. Não há consenso geral entre os especialistas sobre o ponto em que ocorre a distinção entre o processamento de imagens e outras áreas correlatas, como análise de imagens e visão computacional. Em algumas ocasiões, a diferenciação é feita considerando o processamento de imagens como uma disciplina em que tanto a entrada quanto a saída de um processo consistem em imagens. [55]. Na Figura 15 o processamento digital de imagens é apresentado como uma sequência de etapas inter-relacionadas.



Fonte: [55].

A obtenção de uma imagem digital dá início ao processo sendo que esta imagem, normalmente, corresponde à digitalização de uma outra imagem resultante da iluminação que é refletida na superfície dos objetos através de um sistema apropriado de aquisição. A imagem digital torna possível o posterior tratamento computacional que pode ser iniciado numa etapa conhecida como pré-processamento, a qual envolve processos como a filtragem de ruídos introduzidos pelos sensores e a correção de distorções, por exemplo.

A análise e identificação de objetos nas imagens costuma caracterizar o próximo passo. A partir da extração das características ou atributos das imagens (bordas, área, texturas, etc.) é possível separar os objetos que compõem a região de interesse do plano de fundo, ou seja, da região da imagem que não engloba informações úteis para uma aplicação específica. Essa etapa é denominada de segmentação, pois, como afirma [56], ela visa identificar características constantes e descontinuidades nas imagens. Alguns objetos são facilmente identificáveis na imagem, o que torna a segmentação relativamente simples. Quando isso não acontece, outras técnicas mais elaboradas podem ser necessárias para a correta modelagem. Após realizar a segmentação para identificar as formas geométricas dos objetos, é possível empregar operadores morfológicos para analisar e alterar essas formas, além de extrair informações suplementares do objeto. Essas informações podem ser valiosas para uma posterior etapa de descrição e classificação, ou reconhecimento, do objeto.

2.4.1 IMAGEM DIGITAL

Uma imagem é uma representação da interação e reflexão entre luz e matéria e pode ser reproduzida tendo como parâmetro principal a simulação da visão humana [57]. A imagem digital, por outro lado, é um registro do fenômeno físico de espalhamento e reflexão da luz sobre um objeto [58]. A luz refletida atravessa um conjunto de filtros organizados em forma de um mosaico com as cores vermelho, verde e azul, denominado de filtro de Bayer.

Uma imagem monocromática é uma função bidimensional contínua $f(x, y)$, na qual x e y são coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto (x, y) , chamado de elemento de imagem ou pixel, é proporcional à intensidade luminosa (brilho ou nível de cinza) no ponto considerado [56]. De acordo com Gonzales e Wood [55], a intensidade luminosa no ponto (x, y) pode ser decomposta em: componente de iluminação, $i(x, y)$, associada à quantidade de luz incidente sobre o ponto (x, y) e a componente de

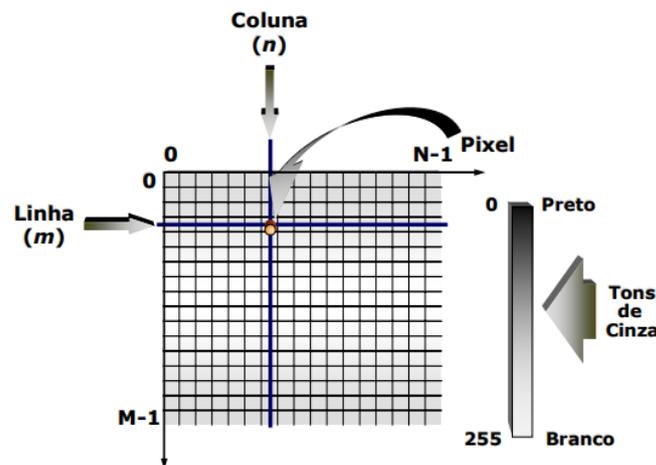
reflectância, $r(x, y)$, associada à quantidade de luz refletida pelo mesmo ponto. O produto de $i(x, y)$ por $r(x, y)$ resulta em:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y). \quad (18)$$

Em que $0 < i(x, y) < \infty$ e $0 < r(x, y) < 1$. Enquanto $i(x, y)$ dependente das características da fonte de iluminação, $r(x, y)$ dependente das características da superfície do objeto.

Na Figura 16, é apresentada a representação matricial convencional para indicar a localização de um pixel dentro de uma imagem bidimensional composta por um arranjo de pixels. O índice inicial, m , refere-se à posição da linha em que o pixel está localizado, enquanto o segundo índice, n , indica a posição da coluna. Normalmente, numa escala de níveis de cinza, atribui-se a cor preta ao nível de cinza mais escuro, indicando-o como valor 0 (zero), e atribui-se a cor branca ao nível de cinza mais claro, com o valor 255 considerando as possibilidades de representação por 8 bits.

Figura 16 – Representação de uma imagem digital bidimensional.



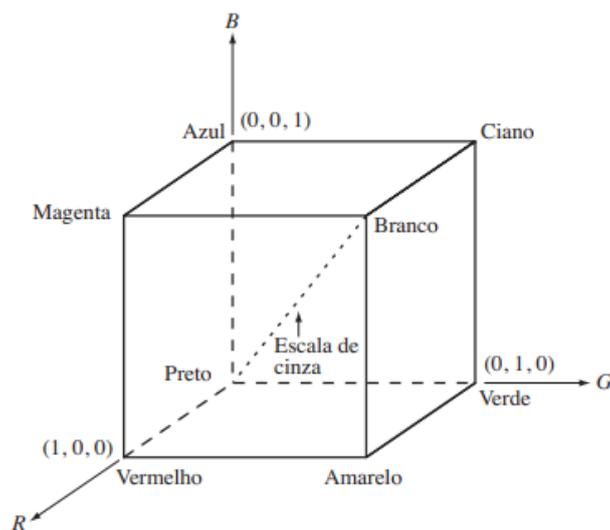
Fonte: [56].

Entretanto, uma imagem colorida pode ser compreendida como a composição de três imagens monocromáticas, ou seja:

$$f(x, y) = f_R(x, y) + f_G(x, y) + f_B(x, y). \quad (19)$$

Em que $f_R(x, y)$, $f_G(x, y)$ e $f_B(x, y)$ representam as intensidades luminosas das componentes vermelha, verde e azul da imagem, respectivamente, no ponto (x, y) . Desse modo, em uma imagem digital colorida no sistema RGB, as cores secundárias podem ser representadas por um pixel que pode ser visto como um vetor cujas componentes representam as intensidades de vermelho, verde e azul de sua cor, como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Modelo RGB.



Fonte: [55].

2.4.2 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS

Conforme dito anteriormente, a segmentação tem como objetivo dividir uma imagem em partes ou objetos que a constituem. Assim, ocorre a separação das regiões que compõe a imagem em grupos que possuem características similares. Na Figura 18 tem-se apresentado um exemplo de segmentação.

Os algoritmos de segmentação são capazes de discernir diferenças entre dois ou mais objetos, permitindo a discriminação tanto entre as partes desses objetos quanto entre eles e o plano de fundo da imagem (*background*). Em relação à segmentação de imagens em tons de cinza, os algoritmos se baseiam principalmente na identificação de descontinuidades e semelhanças nos níveis de cinza. A base para identificação dessas descontinuidades se refere ao processo de dividir a imagem em áreas caracterizadas por mudanças bruscas nos níveis de cinza. Normalmente, o interesse está na detecção de pontos isolados, linhas e bordas na imagem. Por outro lado, a fundamentação na

similaridade se concentra na aplicação de limiares e no crescimento de regiões que possuam características semelhantes [56].

Figura 18 – (a) Imagem original que contém uma região de intensidade constante; (b) resultado da segmentação baseada nas propriedades da região.



Fonte: Adaptado de [55].

No contexto da segmentação, as técnicas de limiarização configuram uma importante abordagem para viabilizar a segmentação. Para uma imagem em tons de cinza, por exemplo, a limiarização tem como intuito agrupar regiões cujos tons de cinza são semelhantes a partir do estabelecimento de um limiar. Gonzalez em [55] define a limiarização como uma operação que envolve testes com um limiar definido T de modo que, uma imagem $f(x, y)$ ao ser submetida a um limiar T é capaz de produzir uma imagem $g(x, y)$ tal que:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x, y) > T \\ 0, & \text{se } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (20)$$

Apesar da convenção de usar intensidade 0 para o fundo e 1 para o objeto, dois valores distintos quaisquer podem ser utilizados na definição da Equação 20.

Gonzalez [55] estabelece, ainda, as possíveis classes de limiarização de acordo com suas características, sendo:

- **limiarização global:** quando T é uma constante aplicável a uma imagem inteira;
- **limiarização variável:** quando o valor de T muda ao longo da imagem;
- **limiarização local** ou **regional:** usado para denotar a limiarização variável na qual o valor de T em qualquer ponto (x, y) em uma imagem depende das propriedades de uma vizinhança de (x, y) (por exemplo, a intensidade média dos pixels da vizinhança);

- **limiarização dinâmica** ou **adaptativa**: quando T depende das coordenadas espaciais (x, y) .

2.4.2.1 LIMIAÇÃO GLOBAL UTILIZANDO O MÉTODO DE OTSU

O método de limiarização proposto por Otsu, em 1979, é um dos mais antigos e conhecidos métodos de limiarização global. O método é ótimo no sentido de que maximiza a variância entre classes, uma medida bem conhecida utilizada na análise estatística discriminante [59]. O ponto central desse método é que as classes com limiares bem definidos devem apresentar diferenças notáveis em seus valores de intensidade de pixels, sendo que um limiar que resulte na melhor separação entre as classes em termos de valores de intensidade é considerado o limiar ótimo. Desse modo, o método de Otsu promove uma boa separação entre as classes, proporcionando uma segmentação altamente eficiente. A utilização disseminada desse método para a binarização de imagens é notável, especialmente em situações onde as disparidades de intensidade entre as classes são mais notórias.

O algoritmo de Otsu segue a seguinte sequência [55]:

- I. Calcula o histograma normalizado da imagem e designa os componentes do histograma como p_i , onde i é a quantidade de componentes do histograma ($0 \dots L - 1$), com L representando os níveis e sendo $p_i = \frac{n_i}{MN}$ em que n_i representa o número de pixel de intensidade i e MN o número total de pixels da imagem;
- II. Cálculo das somas acumuladas para todos os limiares possíveis $P_1(k)$ para $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$, em que $P_1(k) = \sum_{i=0}^k p_i(k)$ é a probabilidade de que um pixel seja atribuído à uma das classes e $P_2(k) = 1 - P_1(k)$ é a probabilidade de que um pixel seja atribuído à outra classe;
- III. Cálculo das médias acumuladas $m(k)$ para $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$, sendo:

$$m(k) = \sum_{i=0}^k ip_i ; \quad (21)$$

- IV. Cálculo da intensidade média global m_g (intensidade média da imagem inteira), sendo:

$$m_g = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i ; \quad (22)$$

- V. Cálculo da variância σ^2 entre as classes para $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$, em que:

$$\sigma^2(k) = \frac{[m_g P_1(k) - m(k)]^2}{P_1(k)[1 - P_1(k)]}; \quad (23)$$

- VI. Obtenção do limiar de Otsu, k^* , para o qual $\sigma^2(k)$ é máxima. Se a máxima não for única, obter k^* pela média dos valores de k que correspondem aos diversos valores máximos detectados.

2.4.3 CORREÇÃO DE DISTRORÇÃO EM IMAGENS DIGITAIS

A correção de distorção das imagens digitais pode ser feita através da aplicação de transformações geométricas. O princípio básico das transformações geométricas é o traslado dos pontos no plano (x, y) para novas posições distintas das posições originais. Esses pontos podem ser escalonados ao longo do eixo x ou ao longo do eixo y , trasladados, rotacionados em torno de um ponto, ou, ainda, sofrer mais de uma dessas transformações.

Para as correções de distorção adotadas nas imagens térmicas deste estudo, foram utilizadas estratégias computacionais baseadas na teoria de transformação geométrica conhecida como Transformação Afim. Trata-se de uma classe de transformações lineares que preservam paralelismo e razões de distância, incluindo translação, rotação, cisalhamento, reflexão e redimensionamento (escala). Nesse tipo de transformação cada ponto da imagem de entrada é mapeado para um novo local na imagem de saída usando uma matriz de ordem 3.

Matematicamente, uma transformação geométrica afim em um espaço n -dimensional pode ser representada por:

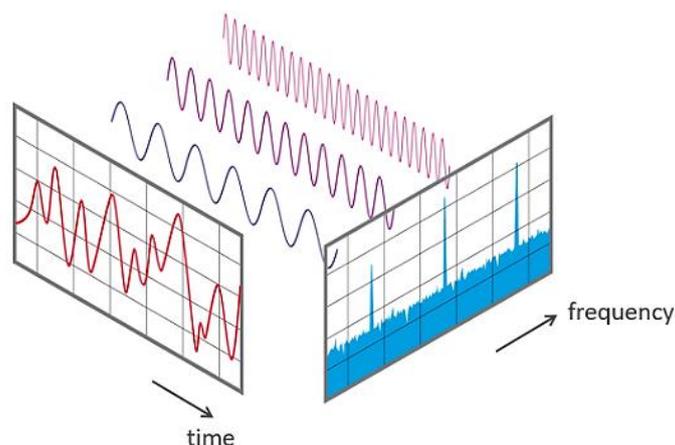
$$T(p) = A \times p + t. \quad (36)$$

Em que: $T(p)$ é o ponto transformado; A é uma matriz $n \times n$ (não singular) que representa a parte linear da transformação; p é o vetor de coordenadas do ponto original no espaço n -dimensional; e t é o vetor de translação (uma constante) que representa o deslocamento da origem.

2.5 TRANSFORMADA DE FOURIER

O estudo de sinais e sistemas usando representações senoidais é denominado Análise de Fourier. A transformada de Fourier (TF) transforma um sinal no domínio do tempo para o domínio de frequência (vide esquema ilustrativo da Figura 19) resultando em dois espectros, um de magnitude e outro de fase, que permitem verificar a contribuição de cada harmônica para o sinal periódico. Desse modo, o ponto chave da TF é a possibilidade de analisar uma função ou forma de onda tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. De acordo com o teorema de Fourier, o sinal pode ser visto, portanto, como uma superposição de múltiplos sinais senoidais com frequências que são múltiplos inteiros da fundamental.

Figura 19 – Visualização de um sinal no domínio do tempo e da frequência.



Fonte: [60].

Alguns problemas mais complexos de serem solucionados diretamente podem ter sua solução facilitada aplicando a TF, resolvendo o problema em outro domínio (frequência) e, então, aplicando-se a transformada inversa pode se chegar à solução. Para

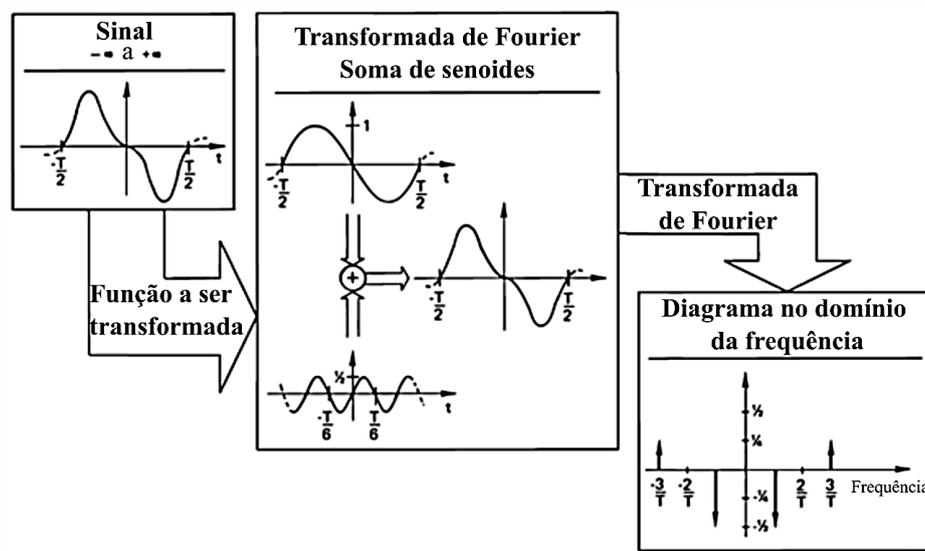
um sinal contínuo não periódico, a TF unidimensional pode ser expressa matematicamente pela Equação 24 [55].

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j2\pi\mu t} dt. \quad (24)$$

Em que: $j = \sqrt{-1}$; t é a variável contínua de integração (em geral, representa o tempo) e μ é a variável relacionada à frequência dada em ciclos por segundo.

A Figura 20 apresenta uma interpretação simplificada da TF por meio de um esquemático.

Figura 20 – Interpretação da transformada de Fourier.



Fonte: Adaptado de [61].

Uma implementação de um dos métodos de Fourier, a transformada rápida de Fourier, pode ser dita como o mais importante algoritmo numérico da era atual, bem como a transformada discreta mais importante [62]. Entende-se a FFT como um algoritmo otimizado da implementação da Transformada de Discreta de Fourier (TDF), a qual é utilizada para representar um sinal discreto e não-periódico como uma superposição de senoides complexas. Em essência, a TDF é uma forma amostrada da TF que é uma função contínua no tempo. A TDF transforma um conjunto de números $\{f_n\}$, que consiste em M amostras de um sinal contínuo $f(t)$, em outro conjunto, $\{F_m\}$, de M valores discretos complexos segundo a Equação 25 [63].

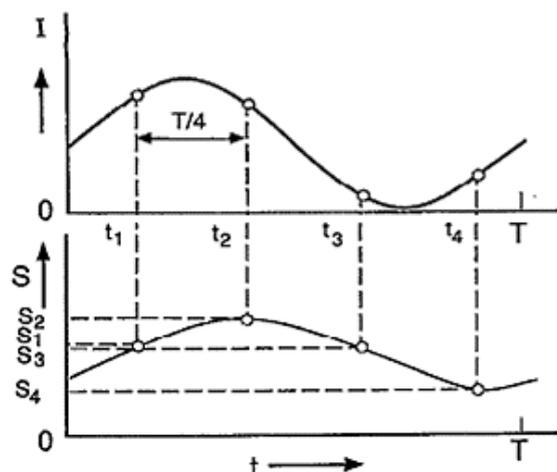
$$\{F_m\} = \sum_{n=0}^{M-1} f_n e^{-\frac{j2\pi mn}{M}}, M = 0, 1, \dots, M - 1. \quad (25)$$

Assim, a análise de Fourier, quando aplicada à uma sequência de imagens (a exemplo dos termogramas), facilita a extração de múltiplas imagens de fase e magnitude correspondentes à cada harmônica do espectro de Fourier. No domínio da frequência, características importantes das imagens podem ser destacadas e observadas mais claramente.

2.6 ANÁLISE DE QUATRO PONTOS POR CICLO DE MODULAÇÃO

O 4-SPSM calcula a distribuição de fase de quatro imagens termográficas, I_1 a I_4 , com valores de fase de referência de 0 , $\pi/2$, π , e $3\pi/2$, correspondendo a um deslocamento de fase de 90° [9]. Este método extrai as amplitudes e fases dos resultados da medição considerando um padrão senoidal da resposta temporal térmica. As imagens de fase são especialmente importantes porque melhoram a sensibilidade de detecção e minimizam o número de erros de detecção de defeitos devido às discrepâncias de emissividade da superfície [9]. A Figura 21 ilustra os princípios da análise da técnica de 4 pontos aplicada à resposta térmica S a um dado sinal de intensidade I .

Figura 21 – Princípio de fase da termografia sensitiva.



Fonte: Adaptado de [64].

O objetivo específico do 4-SPSM é determinar a distribuição de fase a partir da escolha de quatro imagens termográficas, $I_1(x, y)$ a $I_4(x, y)$, que são equidistantes $\pi/2$

entre si, onde $I_i(x, y)$ é a intensidade do i -ésimo padrão ($i = 1, 2, 3, 4$). $I_a(x, y)$ e $I_m(x, y)$ representam a intensidade média e a modulação da intensidade, respectivamente. Os quatro conjuntos de intensidades podem ser descritos matematicamente pelas Equações 26, 27, 28 e 29.

$$I_1(x, y) = I_a(x, y) + I_m(x, y)\cos(\varphi(x, y)), \quad (26)$$

$$I_2(x, y) = I_a(x, y) + I_m(x, y)\cos\left(\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right), \quad (27)$$

$$I_3(x, y) = I_a(x, y) + I_m(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \pi), \quad (28)$$

$$I_4(x, y) = I_a(x, y) + I_m(x, y)\cos\left(\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right). \quad (29)$$

As Equações 30 e 31 resultam em uma aproximação do valor da transformada de Fourier quando se considera que quatro pontos equidistantes por ciclo de modulação da resposta temporal térmica estacionária (de cada pixel) são conhecidos com fases exatas e em amplitudes dadas pelos sinais de onda senoidal. Assim, é possível visualizar imagens de amplitude e fase da célula fotovoltaica com contraste satisfatório e delimitação dos defeitos. Pelas relações trigonométricas entre as funções seno e cosseno, pode-se reescrever as Equações 26 a 29 e por manipulação algébrica encontrar a equação para o ângulo de fase $\varphi(x, y)$ calculado pelo 4-SPSM e expresso pela Equação 30.

$$\varphi(x, y) = \arctan\left[\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)}\right]. \quad (30)$$

Do método 4-SPSM resulta também o cálculo da amplitude de modulação $A(x, y)$ matematicamente descrita pela Equação 31.

$$A(x, y) = \frac{1}{2}\sqrt{(I_1(x, y) - I_3(x, y))^2 + (I_2(x, y) - I_4(x, y))^2}. \quad (31)$$

2.7 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A análise de componentes principais é uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, em um conjunto menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte das informações do conjunto original [26, 65]. Os componentes principais são definidos como combinações lineares de variáveis aleatórias que possuem propriedades especiais em termos de variância [66]. Este método gera uma redução da dimensão dos dados, que pode eliminar a correlação entre as amostras, realizar a compactação de dados das amostras e eliminar a redundância [67].

Os algoritmos PCA são de especial interesse para a detecção de defeitos em células fotovoltaicas, pois são capazes de reduzir grandes quantidades de dados das sequências termográficas a um conjunto de matrizes denominadas de componentes principais. A diferença na variabilidade dos pixels pode ser usada para destacar regiões de interesse na célula, o que pode auxiliar na detecção de defeitos. Vários trabalhos têm aplicado algoritmos PCA para processar vídeos radiométricos [11, 13, 65, 66].

Dada uma matriz $A(n \times m)$ referente a uma determinada imagem, sejam X_1, X_2, \dots, X_p as variáveis associadas a cada pixel da imagem. Para calcular as componentes principais é necessário, em primeiro lugar, calcular os seus valores médios $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p$ e variâncias $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_p^2$, respectivamente. Essas variáveis não são independentes e, portanto, possuem covariância entre a i -ésima e a k -ésima variável definida por σ_{ik} para $i \neq k = 1, 2, \dots, p$, formando a matriz de covariâncias σ .

Em seguida, podem ser determinados os pares de autovalores (λ) e autovetores (e) da matriz de covariâncias $(\lambda_1, e_1), (\lambda_2, e_2), \dots, (\lambda_p, e_p)$, onde $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ também estão associados à matriz de covariância. Assim, o i -ésimo componente principal pode ser calculado pela Equação 32:

$$Z_i = e_i'X = e_{i1}X_1 + e_{i2}X_2 + \dots + e_{ip}X_p. \quad (32)$$

A contribuição (C_k) de cada componente principal (Z_i) é expressa em porcentagem e pode ser calculada para a k -ésima componente principal por meio da Equação 33:

$$C_k = \frac{\text{var}(Z_i)}{\sum_{i=1}^p \text{var}(Z_i)} \times 100. \quad (33)$$

A componente principal de maior relevância costuma ser o primeiro componente principal em que há uma maior variância e, portanto, apresenta o máximo de variabilidade dos dados. O componente que possui a segunda maior relevância é aquele que apresenta a segunda maior variância, e assim sucessivamente.

2.8 FUNÇÃO GAUSSIANA BIDIMENSIONAL ELÍPTICA

A forma geral da função gaussiana bidimensional elíptica é dada pela seguinte Equação 34:

$$f(x, y) = A \exp \left[-\frac{(x-x_o)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\beta(x-x_o)(y-y_o)}{\sigma_x\sigma_y} - \frac{(y-y_o)^2}{2\sigma_y^2} \right]. \quad (34)$$

Em que: A é o pico de amplitude, x_o e y_o são as coordenadas do pixel do centro da distribuição; σ_x e σ_y são a dispersão dos eixos maior e menor da distribuição; e β é uma medida da diferença de ângulo de posição entre os eixos principais da distribuição e as coordenadas (x, y) [68]. A Equação 35 representa um modelo simplificado e satisfatório para ajustar imagens que possuem um padrão circular uniforme como nas imagens de células saudáveis. Uma equação mais simples onde $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ e $\beta = 0$ pode melhorar muito o processo de ajuste. Essa simplificação restringe o modelo a um padrão circular e pode interessar a algumas aplicações específicas.

$$f(x, y) = A \exp \left[\frac{-(x-x_o)^2 - (y-y_o)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (35)$$

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado um levantamento bibliográfico de trabalhos que abordam ensaios de termografia ativa modulada na análise de defeito (naturezas, profundidades e formas) em células fotovoltaicas e em outros materiais. Dentre as técnicas de processamento digital de imagem utilizadas pelos autores no tratamento dos dados térmicos, despontam como as mais difundidas a transformada rápida de Fourier, análise de componentes principais e análise de deslocamento de fase pela técnica (e seus derivados) dos quatro pontos por ciclo de modulação.

Busse, Wu e Karpen (1992) apresentaram um método de geração de imagens por ondas térmicas que combina as vantagens da modulação de baixa frequência (fornecendo informações do ângulo de fase e uma faixa de profundidade máxima, entre 0,4 mm e 0,6 mm) e varredura rápida. O objetivo por trás do uso da termografia modulada pelos autores é de obter uma imagem de ângulo de fase estratificando o deslocamento de fase em relação a uma determinada referência. Nos experimentos o aquecimento da amostra foi feito pela lâmpada de um projetor (15 V, 150 W) imersa em água para bloquear a parte infravermelha de seu espectro de emissão e não confundir o detector infravermelho. A frequência de modulação da lâmpada foi de 0,9 Hz. A técnica de análise utilizada no tratamento dos dados térmicos é a dos quatro pontos por ciclo de modulação, pois a função de referência e o sinal são do tipo senoidal. Esse trabalho representou uma base importante para os trabalhos científicos que vieram nos anos seguintes e um dos achados importantes foi a constatação de que o princípio termográfico discutido é aplicável a ondas térmicas que são geradas não apenas por absorção de radiação óptica, mas também, por exemplo, por aquecimento indutivo ou resistivo ou por vibrações mecânicas.

Breitenstein, Warta e Langenkamp (2010), em seu livro *Lock-In Thermography: Basics and use for Evaluating Electronic Devices and Materials*, uma das principais referências na área de termografia ativa modulada, exploram os fundamentos, princípios de funcionamento e aplicações práticas da termografia modulada. O foco principal desta obra está na sua aplicação na avaliação de dispositivos eletrônicos e materiais, dentre eles

as células fotovoltaicas. Dentre as principais contribuições do livro, destacam-se: técnicas de aquisição e processamento de dados térmicos dos ensaios de LIT; aplicações práticas em dispositivos eletrônicos, células fotovoltaicas, LEDs, entre tantos outros; localização e análise de defeitos em diversos materiais. Vários artigos científicos derivados das pesquisas realizadas na construção do livro foram publicados pelos autores fornecendo uma importante base técnica para estudos posteriores.

Montanini (2010) explorou em seu estudo as termografias pulsada e modulada na avaliação quantitativa de defeitos (inseridos artificialmente) de subsuperfície em uma amostra de acrílico. A transformada de Fourier unidimensional foi utilizada para a tratativa das imagens térmicas no domínio da frequência. Com isso Montanini conseguiu encontrar a profundidade de defeitos no material com uma incerteza padrão combinada de cerca de 5% para materiais com espessuras de até 3,6 mm. Porém, a metodologia apresentou uma limitação para detectar defeitos mais profundos. O autor atribui isso ao fato de a frequência de modulação ser muito baixa para produção do fluxo de calor necessário para detectar esses defeitos mais profundos no acrílico. Outro ponto crítico percebido no trabalho foi o de que, segundo a afirmação do próprio autor, defeitos reais, como delaminações e rachaduras em compósitos reforçados com fibras, encolhimento e inclusões em fundidos são diferentes dos artificiais e, para esses, não foram feitos testes.

Breitenstein (2013) descreve, em seu trabalho, os fundamentos das investigações de termografia modulada em células fotovoltaicas e revisa a aplicação desta técnica de imagem para a caracterização das células que são baseadas em pastilhas de silício. São discutidas as diferenças entre variantes da termografia ao operar a célula com e sem iluminação (DLIT *versus* ILIT). Nesse aspecto, ele verificou que para uma investigação local detalhada das correntes de fuga nas imagens, tanto sob polarização direta quanto reversa, a aplicação da DLIT é mais útil, pois usando a DLIT todos os tipos de *shunts* (locais em que a corrente é localmente aumentada) podem ser visualizados e suas propriedades eletrônicas podem ser investigadas. Por outro lado, a ILIT fornece algumas possibilidades únicas, como a investigação de *shunts* em células não metalizadas, imagens de eficiência local e imagens do fator de multiplicação de avalanche local sob polarização reversa. Breitenstein explicita a diferenciação entre *shunts* ôhmicos e não ôhmicos destacando que, os *shunts* não ôhmicos são geralmente induzidos por recombinação e são causados por acúmulos locais de centros de recombinação.

No trabalho de Hu (2013) células fotovoltaicas de silício multicristalino (mc-Si) com diferentes tipos de *shunts* foram analisadas por termografia ativa modulada no escuro

(DLIT). Hu encontrou vários tipos de *shunts* não lineares nas amostras sendo que a maioria deles só pode ser detectada em imagens de baixa polarização direta com a DLIT. Entretanto, o aspecto inovador da pesquisa está na observação de *shunts* não lineares que são apenas visíveis ou tem sinal muito mais forte sob condições de baixa polarização reversa do que a condição de polarização direta equivalente. Um resultado importante do estudo diz respeito à descoberta de uma corrente de fuga fraca em torno das bordas tanto de uma célula normal como em células com *shunts* para uma polarização direta de 0,5 V. Isto indica que a borda é um dos principais caminhos de recombinação sob a condição de operação da célula. Outro aspecto do estudo foi a aplicação de uma corrente induzida por feixe de luz (CIFL) em um material com *shunt* induzido. O mapeamento CIFL com comprimento de onda longo revelou a resposta de corrente degradada devido à baixa qualidade do *wafers*. Foi constatado a partir dos ensaios que alguns locais de pré-quebra foram encontrados na amostra com *shunt* induzido e eram visíveis apenas sob a condição de polarização reversa na DLIT.

Halwachs (2014) em sua tese propõe o desenvolvimento de um sistema de termografia ativa modulada no escuro e suas aplicações na caracterização de módulos fotovoltaicos de diversas tecnologias (mono e poli c-Si, CdTe, a-Si, CIS). Ensaios de eletroluminescência e de termografia convencional também foram realizados no intuito de compará-los entre si. A metodologia proposta neste trabalho utiliza a transformada de Fourier para obtenção de resultados de amplitude e fase para cada pixel da superfície dos módulos na imagem com relação à aplicação de pulsos de aquecimento. O autor constatou, durante os experimentos, que uma janela de tempo de no mínimo 45 minutos é necessária para que a temperatura média do módulo seja considerada estável. A partir dos resultados obtidos foi verificado que as medições termográficas feitas pela parte traseira dos módulos podem ser feitas a frequências de modulação mais altas do que pela parte frontal, o que leva a melhores resoluções espaciais. Foi notado também que uma vez que o aquecimento do módulo se estabiliza (em cerca de 45 minutos), 5 minutos adicionais podem ser suficientes para coletar as medições em regime permanente, respeitando-se, entretanto, a taxa de aquisição de imagens (*frame rate*) da câmera.

Shrestha, Park e Kim (2016) apresentaram, em seu trabalho, um arranjo experimental para detecção de tamanhos e profundidades de defeitos introduzidos artificialmente na subsuperfície de uma amostra de aço inoxidável por meio de imagens térmicas obtidas por termografia modulada. Duas lâmpadas halógenas de 1 kW cada foram usadas como fonte de excitação térmica periódica senoidal neste trabalho, com a

necessidade de um amplificador para sincronizar os sinais de entrada e saída. Além disso, o estudo avaliou o impacto da frequência de excitação na detecção dos defeitos. A análise experimental foi realizada em várias frequências de excitação, de 0,01 Hz a 0,18 Hz, baseando a escolha dessas frequências no comprimento de difusão térmica do sinal. Vários métodos de mudança de fase foram avaliados (2-SPSM, 3-SPSM, 4-SPSM e 5-SPSM) para obter o contraste de fase entre as regiões defeituosas e sadias resultando em uma investigação qualitativa e quantitativa dos defeitos. O contraste de fase com deslocamento de fase em quatro etapas (4-SPSM) a uma frequência ideal de 0,01 Hz demonstrou excelentes resultados na detecção de defeitos, enquanto o método 2-SPSM gerou bons resultados para a frequência de 0,28 Hz.

Shrestha e Kim (2017) investigaram as possibilidades de avaliar a espessura não uniforme de um revestimento usando o método de imageamento térmico com medição da variação temporal da temperatura da superfície da amostra. Para isso, um modelo de elementos finitos térmicos transitórios foi criado. No trabalho, eles propõem uma análise comparativa entre a termografia pulsada e a termografia modulada com base na precisão de cada ensaio na determinação da espessura prevista para o revestimento considerado. Nos ensaios experimentais um aquecimento de pulso quadrado único é feito para o procedimento de termografia pulsada e um aquecimento senoidal em diferentes frequências de modulação para a termografia modulada, ambos por emissão de luz, usados para estimular a amostra. A transformada de Fourier foi a técnica utilizada para a obtenção do ângulo de fase, o qual foi utilizado para ser correlacionado com a espessura do revestimento. O método demonstrou sucesso para medir as camadas superiores não uniformes variando de 0,1 mm a 0,6 mm; dentro de uma precisão de 0,0003–0,0023 mm para a termografia pulsada e 0,0003–0,0067 mm para a termografia modulada.

O trabalho de Bo e outros (2018) também é baseado na tecnologia de termografia ativa modulada voltada à detecção de defeitos de delaminação em aerofólios de aeronaves compostos de plástico reforçado com fibra de carbono (PRFC). As sequências de imagens térmicas da amostra são processadas pelos métodos da transformada de Fourier e análise de componentes principais. A diferença de fase entre as áreas defeituosas e saudáveis são estudadas juntamente com a influência do diâmetro e profundidade do defeito, bem como a frequência do fluxo de calor. O trabalho destaca que a principal desvantagem da termografia modulada está ligada a diferentes defeitos de profundidade pelo fato de os defeitos possuírem diferentes frequências de modulação ótimas.

He, Du e Huang (2018) propuseram, em seu artigo, um sistema de detecção com visualização, detecção rápida, avaliação sutil de falhas e detecção quantitativa de células e módulos fotovoltaicos. O trabalho foi desenvolvido através da termografia ativa por indução eletromagnética (TIE). O TIE consegue oferecer um melhor efeito de aquecimento e, assim, rápido aumento da temperatura que é um efeito positivo para distinguir a radiação térmica de defeitos em células e módulos fotovoltaicos. Os autores também estabeleceram uma comparação entre o TIE e outros métodos de detecção existentes no que se refere à construção do sistema TIE e no uso dos algoritmos FFT, PCA e ICA para lidar com a sequência de imagens termográficas. Os resultados experimentais apontaram que o TIE tem boa sensibilidade de detecção e resolução de defeitos. A sequência de termografia é processada sob dois modos de excitação: controlada de pulso e aquecimento modulado. O modo de aquecimento modulado ocorre por meio de um aquecedor de indução de alta potência usado para aquecer periodicamente a célula fotovoltaica a 0,25 Hz e com um o ciclo de trabalho (do inglês *duty cycle*) definido em 50%. Defeitos como pontos quentes, microfissuras, grades quebradas e impurezas de superfície de células e módulos fotovoltaicos são visualizados com clareza. Foi constatado que, na imagem de amplitude, a característica de defeito da quinta componente de frequência é a melhor e a frequência correspondente foi 0,625 Hz. Nas imagens de fase, a característica de defeito da 13ª componente de frequência é a melhor e a frequência correspondente foi 1,875 Hz.

A partir dos trabalhos supracitados, foi apresentado um panorama dos principais estudos relacionados ao tema central deste trabalho. A partir das contribuições evidenciadas por esses estudos, é notável a relevância da ILIT e DLIT na detecção e caracterização de defeitos em diversos tipos de materiais. Em destaque, estão os trabalhos que utilizam pulsos retangulares como sinal elétrico de excitação de entrada nos ensaios, o que caracteriza uma metodologia convencional entre os estudos de LIT. Assim, o presente trabalho propõe um procedimento experimental de DLIT cujo caráter inovador está na excitação de células fotovoltaicas por sinal de corrente elétrica senoidal, o que até então não foi encontrado na literatura. A modificação proposta tem o intuito de ampliar a faixa de pontos operacionais da célula durante o ensaio comparativamente aos ensaios realizados utilizando modulação por pulsos e, com isso, avaliar o impacto na detecção de defeitos. Na Tabela 1 está um comparativo entre os trabalhos apresentados e o proposto nesta dissertação.

Tabela 1 – Contribuições percentuais das componentes principais.

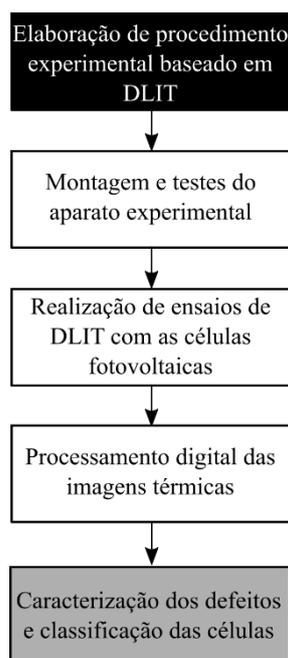
Referência	Principais contribuições	Técnicas de análise
Busse, Wu e Karpen (1992)	Apresentação de método de geração de imagens por LIT.	4-SPSM.
Breitenstein, Warta e Langenkamp (2010)	Técnicas de aquisição e processamento de dados térmicos dos ensaios de LIT na avaliação de defeitos de dispositivos eletrônicos e células fotovoltaicas; excitação por pulsos retangulares.	TF.
Montanini (2010)	Detecção de defeitos em amostra de acrílico através do uso de termografias pulsada e modulada; análise de profundidade de defeitos.	TF unidimensional.
Breitenstein (2013)	Diferenciação entre a DLIT (detecção de <i>shunts</i> sob polarização direta e reversa de células fotovoltaicas) e ILIT (investigação de <i>shunts</i> em células não metalizadas).	Artigo de revisão.
Hu (2013)	Detecção de <i>shunts</i> não lineares em condições de baixa polarização direta e reversa de células fotovoltaicas; aplicação de corrente induzida por feixe de luz em um material com <i>shunt</i> induzido na detecção de pré-quebra.	TF.
Halwachs (2014)	Uso da DLIT na caracterização de módulos fotovoltaicos (mono e poli c-Si, CdTe, a-Si, CIS); uso de excitação por PWM.	TF.
Shrestha, Park e Kim (2016)	Detecção de defeitos em amostras de aço inoxidável por LIT; análise da relação entre a frequência de excitação e a detecção de defeitos.	2-SPSM, 3-SPSM, 4-SPSM e 5-SPSM.
Shrestha e Kim (2017)	Análise comparativa entre termografia ativa pulsada e modulada na avaliação da espessura de revestimento; uso de pulso retangular único e aquecimento senoidal em diferentes frequências de modulação.	TF.
Bo et al. (2018)	Análise de diâmetro e profundidade de defeitos de delaminação em aerofólios por termografia ativa modulada.	TF e PCA.
He, Du e Huang (2018)	Detecção e avaliação de falhas em células e módulos fotovoltaicos utilizando termografia ativa por indução eletromagnética; uso de excitação por PWM.	TF, PCA e análise de componentes independentes (ICA).
Esta dissertação (2023)	Detecção e caracterização de defeitos em células fotovoltaicas por DLIT; uso de excitação por corrente elétrica senoidal.	TF, PCA, 4-SPSM.

Fonte: autoria própria.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada a fim de viabilizar a detecção de defeitos nas células fotovoltaicas por meio do arranjo experimental proposto e construído, bem como das técnicas de processamento de imagem é detalhada nas seções seguintes. Foram consideradas as etapas de elaboração e construção do arranjo experimental utilizado para a aquisição das imagens termográficas por DLIT, criação do banco de imagens térmicas por meio da execução dos ensaios de DLIT, desenvolvimento de algoritmos capazes de segmentar as amostras da base de dados, subsequente obtenção das imagens resultantes das técnicas de PDI e o desenvolvimento do algoritmo para classificação das células quanto à presença de defeitos. Na Figura 22 pode ser consultado o fluxograma com as etapas do desenvolvimento da metodologia desde a elaboração do procedimento experimental proposto à caracterização e classificação das células fotovoltaicas quanto aos defeitos existentes.

Figura 22 – Fluxograma da metodologia adotada.



Fonte: autoria própria.

Ao longo das seções seguintes, cada etapa metodológica da Figura 22 será descrita em detalhes.

4.1 MATERIAIS E CONSTRUÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL

Células fotovoltaicas modelo SunPower™ C60 monocristalinas de 3,4 Wp e sem encapsulamento, três células saudáveis e duas células defeituosas, com dimensões de 12,5 × 12,5 cm² cada uma foram utilizadas nos ensaios de DLIT para a obtenção das imagens térmicas. As células serão identificadas, ao longo do texto, como célula saudável 01, célula saudável 02, célula saudável 03, célula defeituosa 01 e célula defeituosa 02.

As células defeituosas apresentam alguns defeitos que não podem ser identificados por inspeção visual simples. Os principais defeitos são regiões de desgaste na superfície do semicondutor, trincas de diferentes dimensões e profundidades, regiões de soldagem inadequada dos terminais metálicos externos à superfície da célula e manchas na superfície são evidenciados através da técnica de eletroluminescência cujas imagens eletroluminescentes são apresentadas no capítulo 5.

Na Figura 23 são apresentadas fotografias de três das células fotovoltaicas utilizadas nos ensaios experimentais sendo duas delas defeituosas, Figura 23(a) referente à célula defeituosa 01 e Figura 23(b) referente à célula defeituosa 02, e uma saudável, Figura 23(c) referente à célula saudável 03.

É possível detectar, na Figura 23(a), por inspeção visual, algumas regiões de desgaste na superfície do semicondutor e duas trincas diagonais (uma delas é a maior e mais centralizada e a outra menor e próxima ao canto inferior direito), porém nem todos os defeitos significativos são visíveis por inspeção visual, bem como ocorre com o defeito principal da célula da Figura 23(b) que será explicitado no capítulo 5.

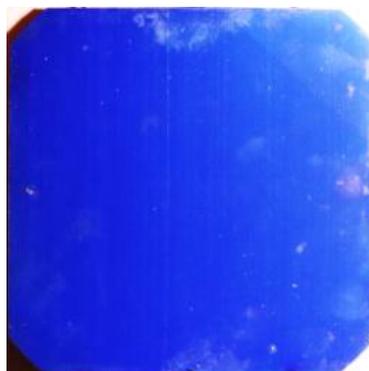
Testes iniciais com as células e uma fonte de tensão DC aplicada a seus terminais são realizados com o objetivo de avaliar os pares tensão-corrente para a operação em polarização direta das células. Em seguida, para tornar possível a realização dos ensaios de LIT é necessária a montagem e realização de testes com o circuito amplificador de potência responsável por amplificar a potência do sinal da saída do gerador de função (Agilent 33250A) a ser entregue à célula. As formas de onda de tensão e corrente elétrica na célula são visualizadas com auxílio do osciloscópio Keysight modelo EDUX1002G. Os testes com o circuito são feitos, inicialmente, com um resistor como carga e, a partir

do momento que se observa o circuito funcional, com a resposta amplificada esperada, o circuito é testado com a célula FV.

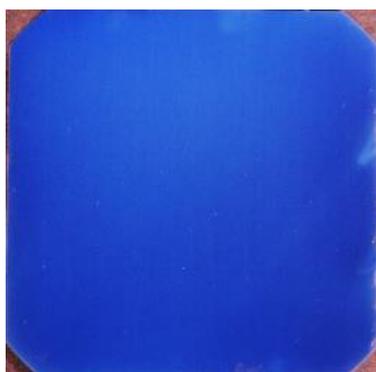
Figura 23 – Fotografia aproximada da (a) célula defeituosa 01, (b) célula defeituosa 02 e célula saudável 03 (c) aproximada e (d) com vista mais ampla.



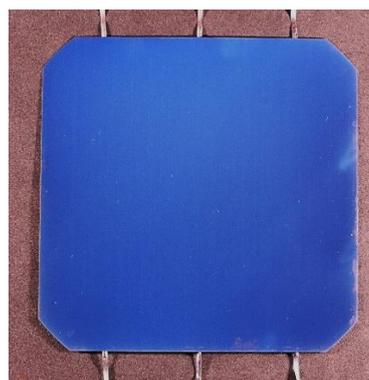
(a)



(b)



(c)



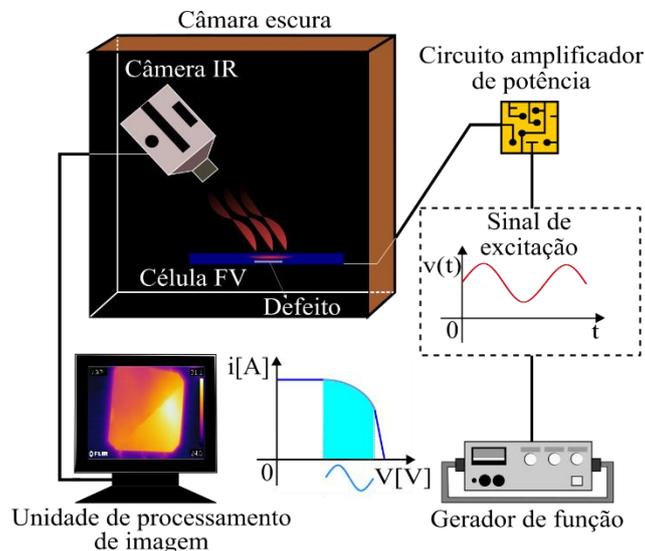
(d)

Fonte: autoria própria.

Posteriormente, o *setup* experimental do ensaio de DLIT é montado. Uma câmara escura confeccionada com o propósito de ser utilizada na realização de ensaios de eletroluminescência e termografia possibilita os ensaios no escuro. A célula a ser inspecionada é posicionada no centro da base inferior da câmara escura. Alguns centímetros acima da célula, encontra-se a base que serve de suporte para as câmeras e é onde o termovisor deve ser colocado (com a lente encaixada no orifício à esquerda do suporte). A distância entre a lente do termovisor e a superfície da célula FV se mantém em aproximadamente 43 cm, sendo a distância focal mínima da câmara de 40 cm. Além disso, o posicionamento da célula garante que a mesma esteja inteiramente dentro do campo de visão da câmara ($25^\circ \times 19^\circ$).

Na Figura 24 é ilustrado o esquema do arranjo experimental da aplicação da DLIT às células fotovoltaicas.

Figura 24 – Esquema da aplicação da DLIT explicitando a faixa de pontos operacionais do sinal de tensão elétrica senoidal utilizado na excitação de uma célula fotovoltaica como amostra.



Fonte: autoria própria.

Os cabos que conectam à célula no interior da câmara escura chegam até a célula por uma estrutura da lateral da câmara que possui um orifício de túnel extintor de luz para evitar penetração da luz ambiente durante os ensaios, por onde também passa o cabo que conecta o termovisor à unidade de processamento na parte externa. Os cabos que conectam à célula, na outra extremidade, conectam-se à saída do circuito amplificador de potência que está conectado, na sua entrada, à saída do gerador de função, ambos alocados na parte externa da câmara. Os parâmetros do sinal do gerador de função são então configurados de acordo com os níveis de amplitude, *offset* e frequência desejados.

Após a montagem do arranjo experimental, como descrito, a porta da câmara escura é fechada e é liberada a execução do ensaio com a energização da célula. A gravação do vídeo radiométrico durante os ensaios é feita por meio de uma interface que permite a transmissão para a unidade de processamento da tela e funcionalidades do termovisor. Por meio dessa interface, são feitos os comandos para iniciar, parar e salvar a gravação.

Para avaliar melhor o potencial do método proposto nesta pesquisa, também é realizado um procedimento experimental adicional por meio de testes usando uma metodologia clássica. Trata-se da aplicação de pulsos de calor periódicos na superfície da célula fotovoltaica por meio de um sinal elétrico PWM injetado aos terminais da célula.

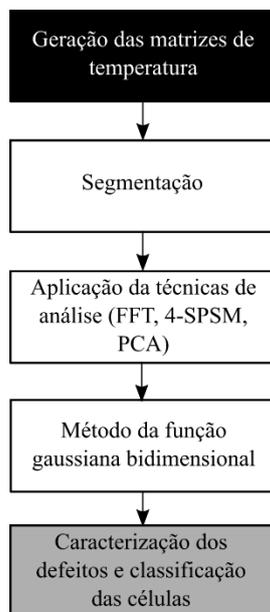
Para tanto, aproveita-se o mesmo arranjo experimental apenas com a substituição do gerador de função e circuito amplificador pelo microcontrolador ATmega2560 (*hardware* escolhido para gerar o sinal PWM).

4.2 PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Nesta seção é descrito o processo de geração das matrizes de temperaturas a partir das imagens térmicas das células fotovoltaicas, bem como é apresentada uma visão geral dos algoritmos para segmentação, análise das imagens e classificação das células quanto à existência de defeitos. Os algoritmos foram implementados através do *software* MATLAB® e foram validados posteriormente através das comparações com as imagens de eletroluminescência obtidas das mesmas células.

Na Figura 25 pode ser consultado o fluxograma com as etapas do desenvolvimento do procedimento computacional. A partir da geração das matrizes de temperatura, é possível executar as rotinas de segmentação e aplicação das demais técnicas de análise das imagens térmicas até que seja possível fazer a caracterização e classificação das células fotovoltaicas quanto aos defeitos existentes.

Figura 25 – Fluxograma das etapas do procedimento computacional completo.



Fonte: autoria própria.

4.2.1 GERAÇÃO DAS MATRIZES DE TEMPERATURA

Os ensaios de LIT resultam em uma sequência de imagens térmicas registradas pela câmera termográfica no formato de vídeo, cuja extensão “.seq” permite o armazenamento de dados em um valor codificado. Este valor representa o que o sensor da câmera detecta no que se refere à irradiância que atinge o sensor. O fabricante do termovisor disponibiliza algumas ferramentas para trabalhar com as imagens termográficas, sendo uma delas o *FLIR Atlas Software Development Kit*, ou simplesmente FLIR SDK. Através dessa ferramenta é possível desenvolver aplicações específicas para solucionar as demandas dos usuários, possibilitando que determinadas ações sejam realizadas automaticamente. Com o uso do SDK é possível desenvolver aplicações que permitem: a extração das matrizes de temperaturas das imagens térmicas digitais das células fotovoltaicas; a configuração inicial da câmera termográfica; a aquisição de imagens térmicas; a conversão dos dados da imagem em valores de temperatura e a extração das temperaturas na forma de matrizes que representam a área inspecionada.

Para facilitar a interpretação da distribuição de temperaturas nessas matrizes, pode ser feita a conversão da matriz de temperaturas em uma imagem em escala de cinza e, em seguida, atribuir uma paleta de cores para obter uma imagem colorida explicitando as diferenças de contraste. As especificidades dos métodos no SDK podem variar de acordo com o modelo específico da câmera termográfica e a versão do SDK que está sendo manipulada.

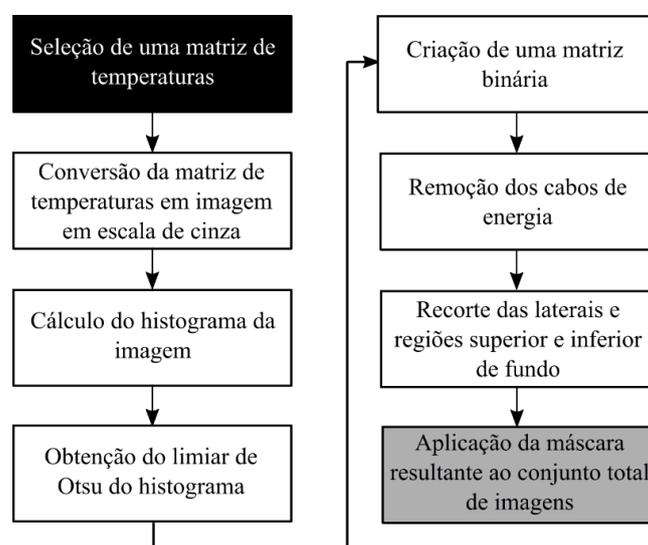
4.2.2 ROTINA DE SEGMENTAÇÃO

A rotina de segmentação desenvolvida serve para manter na imagem unicamente a célula fotovoltaica, removendo os demais componentes: fundo da imagem, cabos, etc. Os chanfros das quinas foram mantidos em virtude de o processamento requerer matrizes quadradas, e por não prejudicarem os resultados.

O algoritmo de segmentação é composto por sub-rotinas com fins específicos no tratamento matricial. O método de limiarização global de Otsu [59] foi escolhido para auxiliar no processo de segmentação. A matriz resultante da segmentação torna-se, portanto, apta a ser processada pelas rotinas de aplicação das técnicas de análise seguintes e de correção de distorção.

O detalhamento de cada etapa do algoritmo é apresentado no fluxograma da Figura 26. Inicialmente é feita a conversão da matriz de temperaturas em uma imagem em tons de cinza, e é calculado o histograma da imagem, que tipicamente possui contraste bem delimitado entre a região da célula e o fundo, possibilitando a aplicação do limiar global de Otsu. Obtido o limiar, aplica-se o processo de binarização à imagem para resultar em uma máscara. Subsequentemente, removem-se os cabos na imagem, que devido ao efeito Joule, aquecem-se e destacam-se do fundo da imagem. Finalmente, o processo de segmentação é concluído com o corte das regiões laterais que contêm apenas fundo da imagem, obtendo-se a máscara final.

Figura 26 – Fluxograma da rotina de segmentação das células fotovoltaicas.



Fonte: autoria própria.

4.2.3 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE

Nos tópicos desta seção são descritos os procedimentos metodológicos de implementação dos algoritmos das técnicas utilizadas na análise dos dados térmicos. Sejam essas técnicas: a transformada rápida de Fourier, técnica dos quatro pontos por ciclo de modulação, análise de componentes principais e função gaussiana bidimensional.

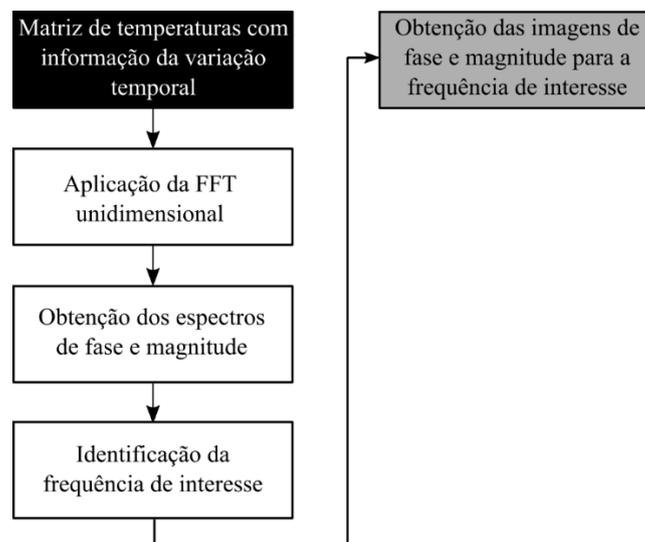
4.2.3.1 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A abordagem utilizada nesta etapa do presente trabalho considera a aplicação da FFT unidimensional, computada sobre as colunas de forma individual. Neste caso, a FFT unidimensional é computada para todas as colunas da matriz de temperaturas que contêm as informações de variação temporal de temperatura de cada pixel da célula fotovoltaica.

Para a implementação desta técnica, inicialmente, considera-se a informação do espectro de magnitude para identificação da frequência para a qual ocorre maior contribuição, ou seja, cujo valor de magnitude é máximo, a menos da média que se associa ao valor DC. Como o espectro resultante é simétrico no seu ponto médio, apenas a segunda metade do espectro é considerada nesta análise. Geralmente, ocorre a coincidência entre a frequência relevante e a frequência fundamental do espectro de Fourier. Logo, para a frequência fundamental, bem como para a segunda e a terceira harmônicas, são obtidas as imagens de fase e magnitude da célula representando a conclusão da aplicação da FFT às imagens térmicas.

A seguir, apresenta-se, na Figura 27, o detalhamento de cada etapa do algoritmo da FFT implementado.

Figura 27 – Fluxograma da aplicação da FFT aos dados térmicos.



Fonte: autoria própria.

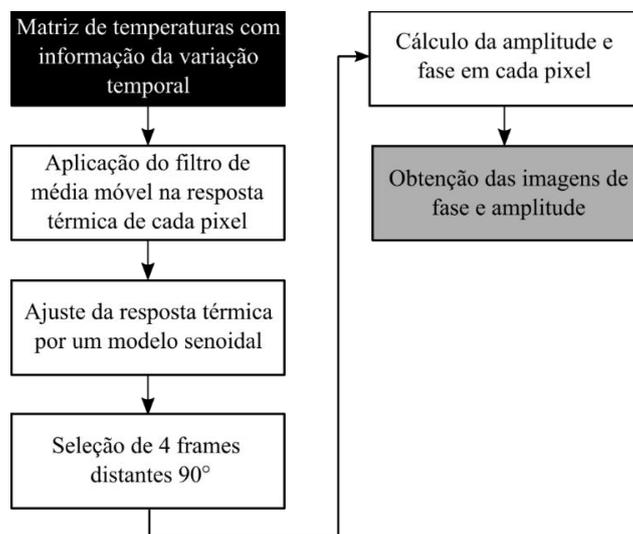
4.2.3.2 QUATRO PONTOS POR CICLO DE MODULAÇÃO

O desenvolvimento do método de análise dos quatro pontos por ciclo de modulação também parte da matriz de temperaturas que contém as informações de variação temporal de temperatura de cada pixel da célula fotovoltaica. Entretanto, antes da aplicação da técnica propriamente dita, um filtro de média móvel é aplicado no intuito de suavizar os dados de resposta dos vetores de temperatura que representam a resposta térmica no domínio do tempo para cada pixel. O próximo passo consiste em obter, de um modelo senoidal no tempo pelo critério de mínimos quadrados, uma curva que melhor se ajuste à variação térmica registrada uma vez que a célula fotovoltaica já tenha entrado na

operação em regime permanente. O ajuste é feito para o último ciclo térmico da medição. Dessa maneira, é possível, finalmente, aplicar a técnica dos 4 pontos por ciclo de modulação selecionando quatro frames distantes $\pi/2$ entre si e, a partir deles, calcular os valores de amplitude e fase para cada pixel. Assim, é possível obter as imagens de fase e amplitude da célula referentes à aplicação da técnica em discussão.

Na Figura 28, o fluxograma apresentado detalha cada etapa do algoritmo da técnica de quatro pontos por ciclo de modulação.

Figura 28 – Fluxograma da aplicação da análise de quatro pontos por ciclo de modulação aos dados térmicos.



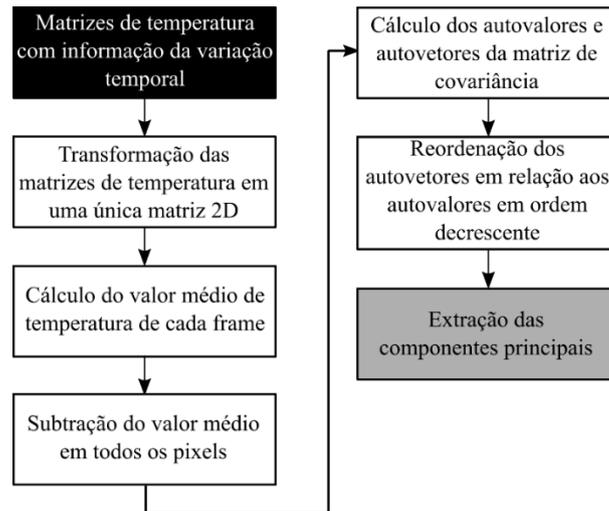
Fonte: autoria própria.

4.2.3.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Assim como nas técnicas anteriormente descritas, a aplicação da PCA necessita da matriz de temperaturas com as informações de variação temporal. A PCA é feita sobre essa matriz e retorna os coeficientes das componentes principais da matriz. Em geral, as linhas da matriz correspondem às observações e as colunas às variáveis. Sendo assim, cada coluna de coeficiente contém coeficientes para um componente principal e as colunas estão em ordem decrescente de variância do componente. O fluxograma que descreve as etapas centrais da aplicação da PCA é apresentado na Figura 29.

A aplicação da PCA realizada considera, portanto, a determinação dos pares de autovalores e autovetores da matriz de covariâncias seguindo a metodologia de decomposição do valor singular em ordem decrescente.

Figura 29 – Fluxograma da aplicação da análise de componentes principais aos dados térmicos.



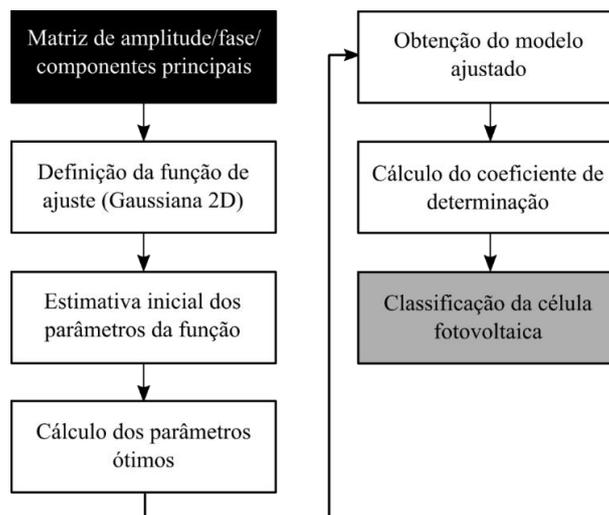
Fonte: autoria própria.

4.2.3.4 FUNÇÃO GAUSSIANA BIDIMENSIONAL

A classificação final das células fotovoltaicas quanto à presença de defeitos e de forma objetiva é obtida pela implementação do método da função gaussiana bidimensional. Este método recebe como entrada as matrizes resultantes da aplicação das técnicas anteriores, seja uma matriz de amplitude, fase ou de componentes principais. De posse dessas informações, torna-se necessário a definição da função gaussiana bidimensional. Essa função é definida de acordo com a Equação 34 da seção 2.9.

Na Figura 30, apresenta-se o fluxograma com as etapas deste algoritmo.

Figura 30 – Fluxograma da aplicação do método gaussiano bidimensional aos dados térmicos.



Fonte: autoria própria.

Com a função definida é possível encontrar os parâmetros ótimos que ajustem melhor o modelo gaussiano à distribuição de dados original. Calcula-se, então, o coeficiente de determinação (R^2) que tem o papel de relacionar o modelo obtido com os dados da matriz original e, assim, baseado em uma métrica numérica, possibilitar a proposição de um diagnóstico objetivo da célula quanto à sua integridade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados alcançados por meio do desenvolvimento da metodologia exposta no capítulo anterior. Tais resultados abrangem construção e testes realizados com o arranjo experimental dos ensaios de DLIT, o desempenho do algoritmo de segmentação das imagens térmicas das células fotovoltaicas submetidas aos ensaios de termografia ativa modulada, processamento das imagens térmicas através da aplicação das técnicas FFT, PCA e 4-SPSM e classificação das células quanto à existência de defeitos baseado no método da função gaussiana bidimensional. Ademais, é feita uma análise comparativa entre o método tradicional com utilização de um sinal PWM e o método proposto neste trabalho adicionalmente à uma avaliação da reprodutibilidade dos experimentos através de uma análise estatística.

Logo, propõe-se uma análise qualitativa das células, por meio da caracterização visual dos defeitos existentes, e quantitativa, através do diagnóstico por métrica quantificadora. Células saudáveis foram utilizadas nos ensaios e na análise de PDI a fim de se obter um parâmetro de comparação quanto à condição das células defeituosas.

5.1 CONSTRUÇÃO E TESTES DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS DE DLIT

A elaboração, construção e testes do arranjo experimental para ensaios de DLIT é uma etapa fundamental para a geração da base de dados térmicos. O intuito é que os ensaios termográficos realizados com o arranjo experimental montado permitam obter dados suficientes para serem utilizados na validação dos algoritmos desenvolvidos, ou seja, até que seja possível obter conclusões bem fundamentadas a partir dos resultados alcançados. Com isso, contabilizou-se, pelo menos, 47 horas de ensaios (não estando incluso o tempo de preparação do arranjo experimental e demais testes complementares),

equivalente a cerca de 50 experimentos com duração de 55 minutos cada um visando garantir o alcance do regime permanente da resposta térmica das células em consonância com o informado em [27]. Dos experimentos realizados, 25 foram feitos com a célula defeituosa 01, 11 com a célula defeituosa 02, e com as células saudáveis 01, 02 e 03 foram realizados 05, 04 e 05 ensaios, respectivamente.

Na Figura 31 apresenta-se uma fotografia do arranjo experimental montado em laboratório tal como foi descrito no capítulo 4.

Figura 31 – Fotografia da parte interna da câmara escura usada no experimento mostrando a câmara IR e o posicionamento da célula fotovoltaica.



Fonte: autoria própria.

Para realizar os ensaios é necessário conhecer primeiro a emissividade das células fotovoltaicas e configurar este valor na câmara IR. A emissividade pode ser determinada experimentalmente de acordo com o procedimento indicado pelo fabricante da câmara [44]. O primeiro passo para determinar a emissividade refere-se à determinação da temperatura aparente refletida e foi feito de acordo com o método do refletor padronizado, em [27], sendo encontrado o valor de 24,4°C. Em seguida, o valor da temperatura aparente refletida é configurado na câmara para poder prosseguir com a determinação

experimental da emissividade, realizada usando a célula FV aquecida. É colocada em contato com parte da superfície da célula solar, um material de emissividade conhecida (fita preta, cuja emissividade tabelada é 0,97). Desse modo, a emissividade da fita é configurada no termovisor e sua temperatura medida. Finalmente, centralizando o ponto de medição do termovisor (*center spot*) na superfície da célula imediatamente ao lado da fita, a emissividade é ajustada manualmente na câmera até obter-se a temperatura que foi medida na fita. O valor da emissividade da célula fotovoltaica encontrado foi de 0,74. A temperatura ambiente na sala de realização dos ensaios se manteve em torno de 24°C devido ao sistema local de refrigeração de ar ser mantido em funcionamento contínuo.

Um gerador de funções é empregado para gerar o sinal elétrico modulado (senoidal), cujos parâmetros elétricos estejam dentro da faixa de condução da célula fotovoltaica. Em cada teste realizado, com duração de 55 minutos, é definida uma combinação de valores para os três parâmetros elétricos configurados no gerador de função (amplitude, nível de *offset* e frequência) para o sinal de excitação da célula conforme detalhado na Tabela 2. Os pares amplitude e nível de *offset* foram definidos a partir de testes experimentais com aplicação de uma tensão DC e medição da corrente na célula, feitos com as células fotovoltaicas objetos de estudo deste trabalho. O critério para definição dos pares é manter a corrente senoidal na célula tal que os limites máximo e mínimo da sua forma de onda mantenham a célula no modo de polarização direta e a corrente de curto-circuito não seja ultrapassada. Além disso, o limite de corrente máxima permitido pelo circuito amplificador de potência projetado, 5 A, deve ser respeitado para evitar danos ao circuito e comprometimento dos experimentos.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros do sinal de excitação da célula.

Identificador	Parâmetros do sinal de excitação	
	Amplitude	Nível de <i>offset</i>
Valor máximo	1,200 V	1,650 V
Valor médio	0,975 V	1,300 V
Valor mínimo	0,750 V	0,950 V

Fonte: autoria própria.

Desse modo, para a realização dos ensaios, a combinação entre os parâmetros do sinal do gerador é feita de forma que o valor máximo medido para a corrente na célula seja de 4 A (que ocorre para uma amplitude de 0,975 V e *offset* de 1,65 V do sinal de

tensão aplicado). A câmara escura tem o papel de eliminar a interferência indesejada de fontes externas e associar a resposta térmica da célula apenas ao sinal elétrico aplicado.

Destaca-se, ainda, que o ângulo de inclinação do termovisor foi de aproximadamente 45° , de modo a evitar a interferência que o reflexo da lente da câmera poderia gerar nas imagens térmicas. O termovisor empregado é do modelo FLIR T420, com resolução de 320×240 pixels e sensibilidade térmica de $20 \text{ mK}/^\circ\text{C}$. As imagens térmicas das células foram registradas pelo termovisor no formato de vídeo radiométrico a uma taxa de 30 fps (*frames* por segundo). Este conjunto de imagens térmicas constituiu o banco de dados necessário à posterior aplicação dos algoritmos de análise implementados.

Os valores de frequência para cada combinação dos parâmetros da Tabela 2 variaram de 6 mHz a 100 mHz, como será apresentado nos resultados desta seção.

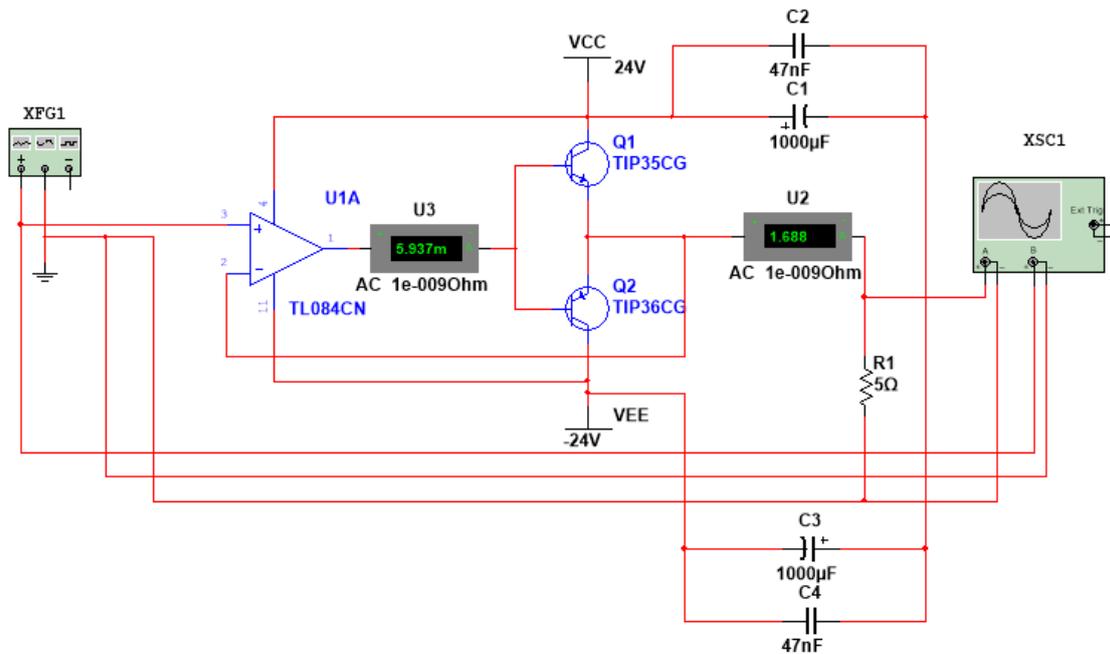
Além disso, é necessário um circuito amplificador de potência intermediando a conexão entre a saída do gerador e os terminais da célula para que seja possível obter uma compatibilidade entre a potência de saída do gerador e a potência necessária para aquecer a célula. A aplicação de tensão elétrica gera um sinal de corrente elétrica na célula com um padrão senoidal, que é uma característica importante e inovadora deste estudo quando comparado aos testes tradicionais de termografia modulada que utilizam, principalmente, um sinal de modulação por largura de pulso (do inglês *pulse width modulation*, PWM). Os sinais de tensão e corrente são visualizados e monitorados usando um osciloscópio.

Na Figura 32 consta o diagrama esquemático do circuito *buffer push-pull* simulado com uso do *software* Multisim. Para visualizar as formas de onda na saída do circuito dentro do ambiente de simulação utilizou-se uma carga linear (resistor de 5Ω) na saída do circuito onde seria conectada a célula FV. Elementos capacitores foram incluídos ao circuito para garantir a filtragem dos ruídos de alta frequência no sinal de saída.

Na Figura 33 é apresentada a montagem do circuito *buffer push-pull* em bancada e realização dos testes com o circuito e, inicialmente, com a mesma carga resistiva utilizada na simulação da Figura 28. Embora os sinais modulados necessários para excitar a célula sejam inteiramente positivos, optou-se por realizar a montagem do circuito amplificador de potência classe B convencional. É possível verificar na tela do osciloscópio as formas de onda da tensão e corrente na carga. O ruído presente no sinal de baixa amplitude e inteiramente positivo aplicado à carga é posteriormente minimizado com os ajustes dos capacitores de filtragem no circuito.

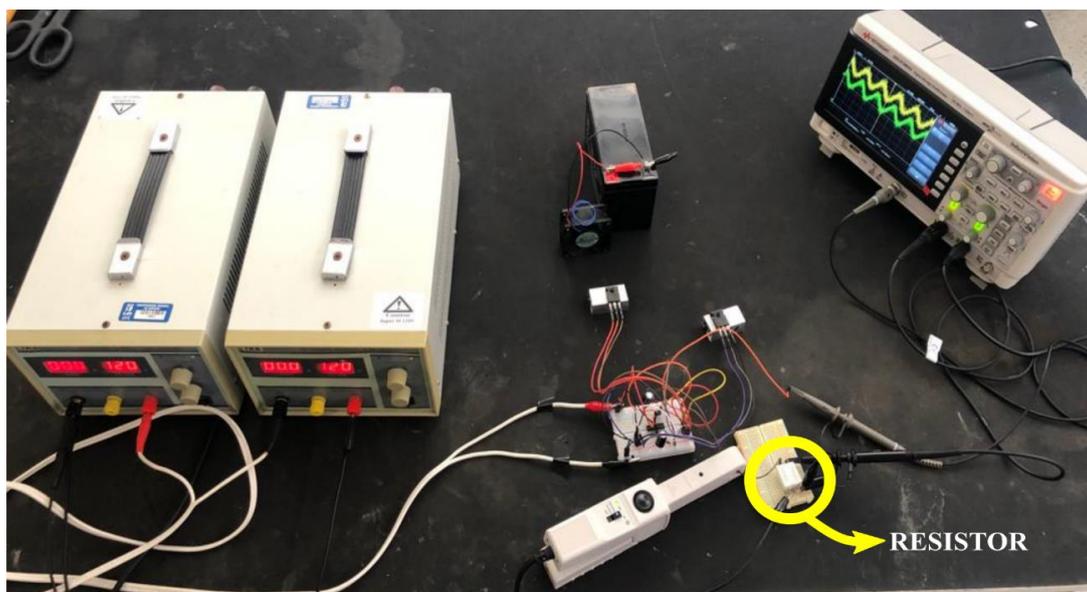
A Figura 34 contém a mesma montagem da Figura 33 a menos da substituição do resistor pela célula fotovoltaica, a qual encontra-se coberta por um material opaco para impedir a interferência da luz ambiente sobre a célula e impacto nas medições. A célula FV está, portanto, conectada à saída do circuito amplificador.

Figura 32 – Diagrama esquemático do circuito *buffer push-pull*.



Fonte: autoria própria.

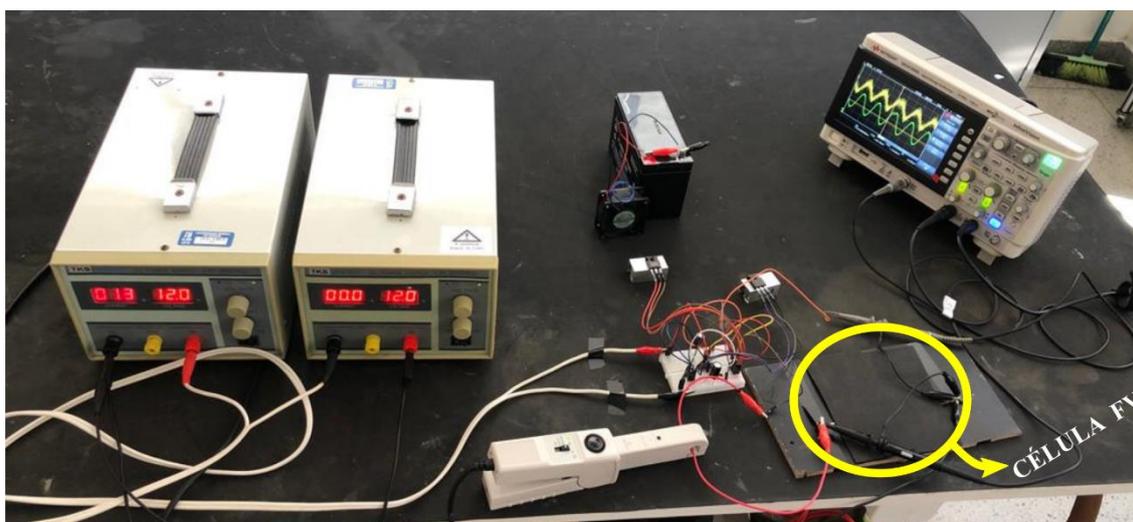
Figura 33 – Testes em bancada com o circuito *buffer push-pull* e utilizando-se uma carga resistiva de 5 Ω.



Fonte: autoria própria.

Todos os ensaios foram realizados em consonância com as principais normas técnicas [73-77]. É recomendado em [75-77] que, em qualquer caso, o desempenho dos módulos fotovoltaicos que apresentam pontos quentes significativos deva ser investigado. Esses pontos quentes podem indicar um problema elétrico. A célula fotovoltaica defeituosa apresentou alguns pontos quentes incomuns quando aquecida, como esperado para sua condição defeituosa.

Figura 34 – Testes em bancada com o circuito *buffer push-pull* e utilizando-se a célula fotovoltaica como carga.



Fonte: autoria própria.

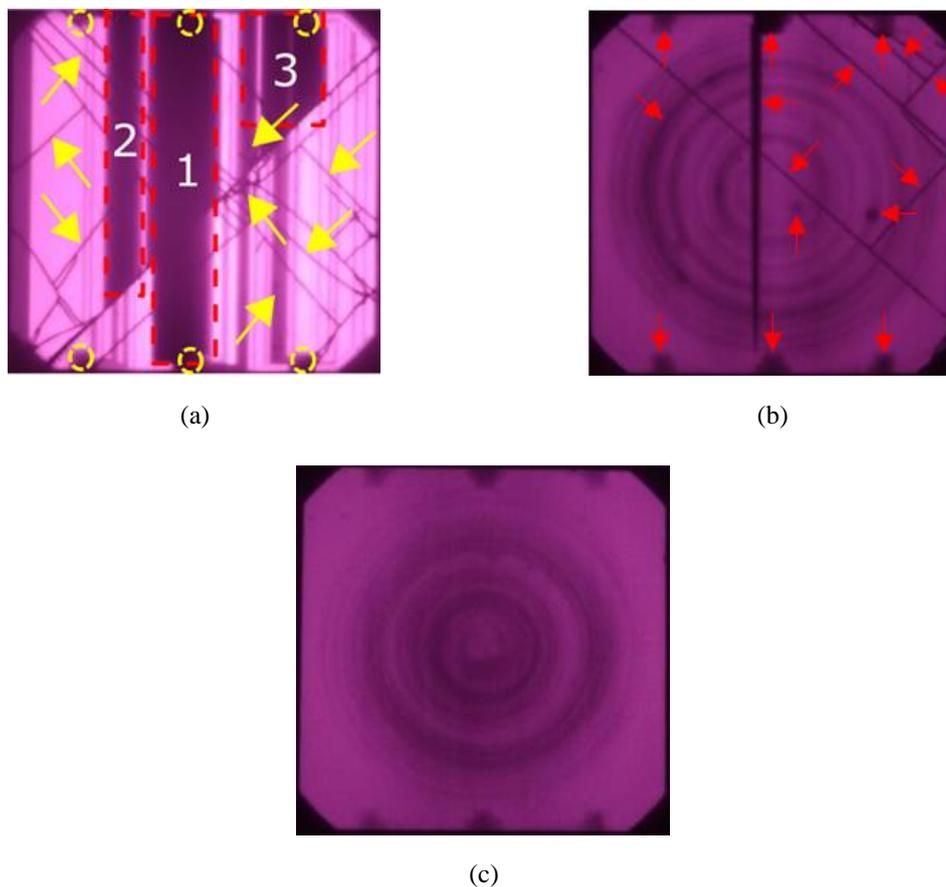
5.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS TÉRMICAS

O processamento digital de imagens compreendeu todo o procedimento computacional desenvolvido com as imagens térmicas que compõem a base de dados utilizada nesta pesquisa e que foram geradas de acordo com as etapas descritas no Capítulo 4. Todas as imagens térmicas da base de dados possuem tamanho 320x240 pixels. No entanto, após serem submetidas às rotinas de segmentação do PDI, as imagens tiveram seu tamanho reduzido para 200x200 pixels. Além do filtro de média móvel utilizado na implementação de uma das técnicas de processamento de imagem deste trabalho, nenhuma outra etapa de pré-processamento, tal como realce, restauração ou processos morfológicos foi feita.

5.2.1 LEVANTAMENTO DA BASE DE DADOS

A fim de se obter imagens que contenham uma identificação clara dos defeitos das células FV e validar, como referência, a interpretação das imagens resultantes do procedimento de DLIT, são realizados, inicialmente, ensaios de eletroluminescência com as células FV. As imagens eletroluminescentes obtidas são mostradas na Figura 35. Nas imagens eletroluminescentes possuem maior brilho as regiões em que há corrente elétrica nas junções PN. Isso significa que as regiões escuras nas amostras da Figura 35 marcadas com setas indicativas (dentro das bordas da célula) representam defeitos que se tornam mais claros com o aumento da corrente elétrica.

Figura 35 – Imagens eletroluminescentes da (a) célula defeituosa 01, (b) célula defeituosa 02 e (c) célula saudável 03.



Fonte: autoria própria.

As pequenas regiões escurecidas nas porções superior e inferior da célula defeituosa 01, Figura 35(a), pertencem à zona que foi afetada pelo calor do processo de soldagem dos terminais. Outras regiões escurecidas de proporções ainda menores,

distribuídas por toda a extensão da célula FV, podem estar relacionadas ao acondicionamento inadequado do dispositivo. Como as células fotovoltaicas utilizadas nesta pesquisa não possuem encapsulamento, elas se tornam suscetíveis à influência das condições ambientais. Além disso, nota-se que existem, ainda, várias fissuras diagonais, em particular no caso da célula defeituosa 01, destacando-se uma fissura principal maior cujas extremidades coincidem com os cantos superior direito e inferior esquerdo. Nota-se, também, um gradiente circular concêntrico e central na célula defeituosa 02 e célula saudável 01 relacionado às resistências de contato entre a célula e a metalização caracterizando um outro defeito que é possivelmente atribuído ao processo de fabricação da célula, relativamente ao *wafer*.

No entanto, as regiões da célula mais comprometidas, em proporção e inatividade, são as porções escurecidas, como relatado anteriormente. Essas regiões são identificadas por 1, 2 e 3 na célula FV da Figura 35(a). É importante notar que as trincas nas diagonais secundárias não causam interrupções de corrente, embora possam refletir uma redução na geração de eletricidade e, possivelmente, redução das taxas de recombinação dos elétrons. No caso da Figura 35(b), referente à célula defeituosa 02, alguns defeitos similares são perceptíveis, a exemplo das regiões escurecidas e pontuais nas porções superior e inferior da célula e do gradiente circular concêntrico. Além disso, observa-se que há, ainda, algumas fissuras em diagonal e uma fissura linear vertical importante com proporção e inatividade significativamente maiores do que as outras fissuras. Ressalta-se que, como no caso da célula defeituosa 01, as fissuras em diagonal, assim como as linhas circulares concêntricas, não geram interrupções de corrente.

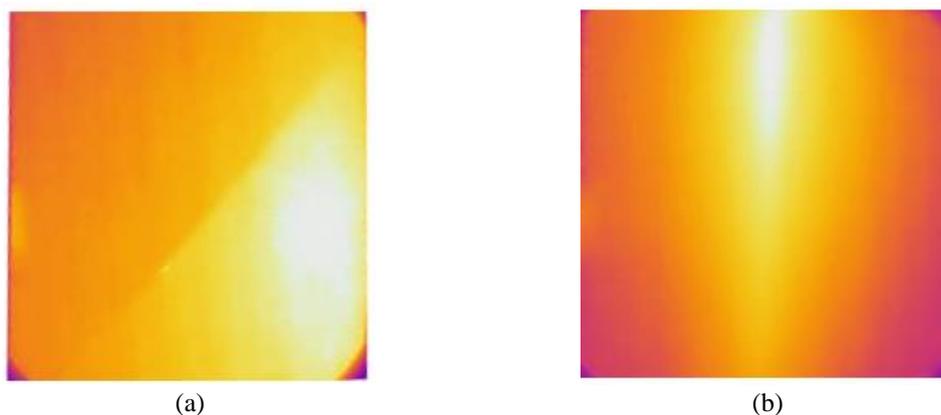
É perceptível que, embora a célula mostrada na Figura 35(c), seja classificada como saudável, ela não pode ser considerada totalmente isenta de falhas. Significa que não é possível eliminar, como se vê na imagem eletroluminescente, a não uniformidade proveniente do processo de fabricação do dispositivo e dos pontos de soldagem dos terminais metálicos. Apesar disso, as outras falhas nas duas outras células FV classificadas como defeituosas são as que têm maior impacto no desempenho da operação dessas não sendo observáveis na célula saudável 01.

Na Figura 36 são apresentados os registros de duas imagens térmicas obtidas durante ensaios de DLIT de duas células FV defeituosas. As imagens da Figura 36 foram geradas diretamente pela câmera IR e não foram submetidas a nenhum processamento prévio. É possível observar nas duas imagens a diferença de radiação infravermelha emitida em diferentes regiões de cada célula que, conseqüentemente, indica maior

temperatura nas regiões mais iluminadas também conhecidas como pontos quentes ou *hot spots*. A isso atribui-se o fato de que em torno das regiões de defeito ocorre um aumento de resistência e, portanto, uma maior dissipação de calor. Alguns outros defeitos existentes em ambas as células não podem ser vistos apenas pela observação das duas imagens térmicas da Figura 36, como foram detalhados pelas imagens de eletroluminescência.

Pode-se constatar, portanto, que a existência de defeitos na célula fotovoltaica afeta a transferência de calor na superfície da célula e isso provoca uma modificação na distribuição de temperatura com relação ao padrão que haveria caso os defeitos não existissem. Levando-se em consideração a Lei de Stephen-Boltzman, a radiação infravermelha emitida pela célula ao ser aquecida muda e provoca uma distorção na imagem térmica registrada pela câmera IR. Desse modo, é possível identificar defeitos e avaliar a condição das células em estudo.

Figura 36 – Imagens térmicas de duas células fotovoltaicas defeituosas (a) 01 e (b) 02.

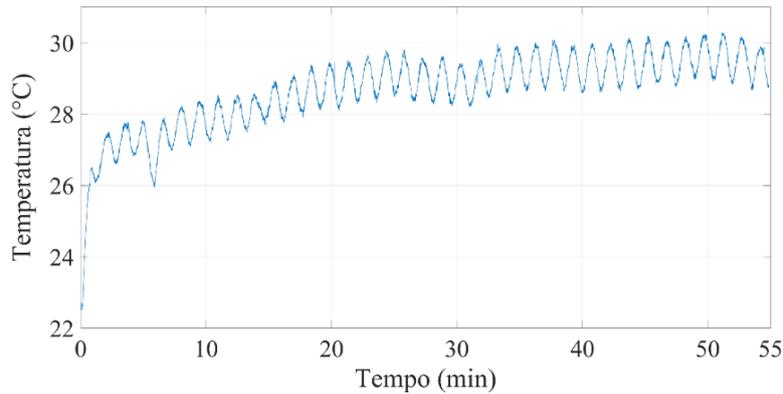


Fonte: autoria própria.

Na Figura 37 e na Figura 38 observa-se a resposta térmica de um pixel selecionado na área da célula defeituosa 01 submetida a um teste de DLIT. O pixel da Figura 37 está localizado em uma região saudável da célula, enquanto o pixel da Figura 38 está próximo da fissura diagonal que caracteriza um dos defeitos mais importantes da célula.

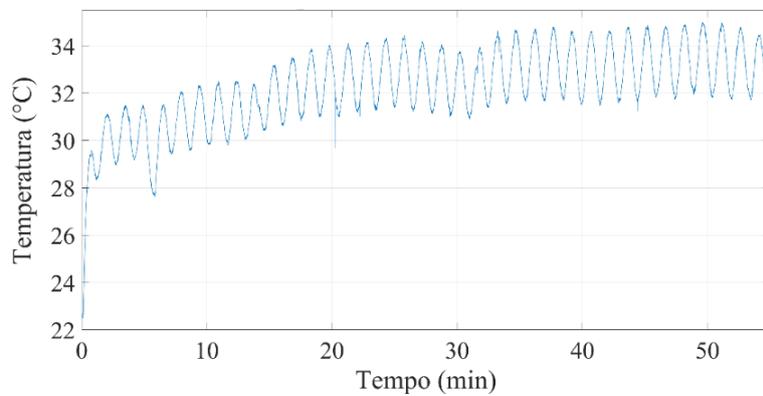
A operação da célula FV em regime permanente periódico mostra que a resposta térmica na Figura 37 possui uma amplitude térmica menor do que a resposta na Figura 38 e, similarmente, os valores de temperatura lidos nos mesmos instantes de tempo são menores na Figura 37. Isso confirma a expectativa da existência de pontos quentes nas regiões defeituosas da célula.

Figura 37 – Resposta térmica temporal para um pixel na região saudável da célula defeituosa 01.



Fonte: autoria própria.

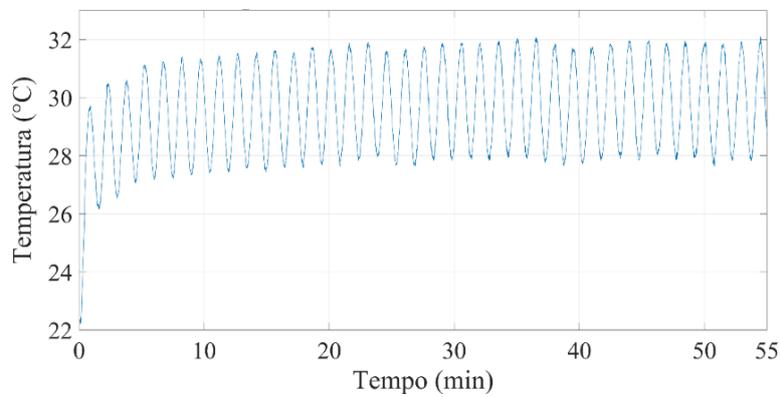
Figura 38 – Resposta térmica temporal para um pixel nas proximidades de um defeito da célula defeituosa 01.



Fonte: autoria própria.

Além disso, apresenta-se, para efeito de comparação, na Figura 39, a resposta térmica para um pixel selecionado na superfície da célula saudável 01 ao ser submetida a um teste de DLIT.

Figura 39 – Resposta térmica temporal para um pixel na superfície da célula saudável 03.



Fonte: autoria própria.

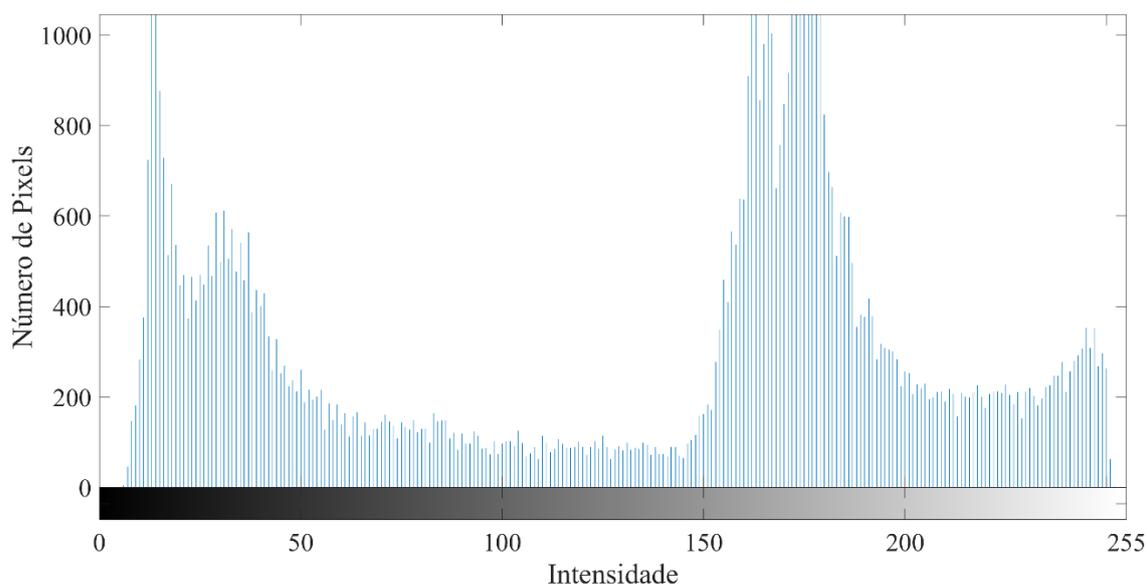
Neste último caso, o pixel escolhido tem a mesma posição na imagem que o pixel da Figura 37 e observa-se, pela Figura 39, uma variação térmica com um padrão oscilatório no regime permanente periódico melhor comportado em relação aos anteriores, ou seja, quase não há variação entre os limites superior e inferior dos ciclos térmicos sucessivos.

5.2.2 ROTINA DE SEGMENTAÇÃO

A imagens térmicas das células geradas pela câmera IR não são fornecidas como apresentado na Figura 36 com a região da célula perfeitamente delimitada. Em vez disso, as imagens térmicas contêm informações que não são úteis para a análise proposta, como o fundo da imagem, região capturada do espaço em que está posicionada a célula, e, eventualmente, cabos de energia. Sendo assim, se faz necessária a segmentação das imagens térmicas visando eliminar essas regiões que não trazem informações úteis ao processamento e, conseqüentemente, reduzindo o custo computacional posterior pela redução da quantidade de dados a serem processados. As imagens capturas pela câmera possuem resolução padrão de 320x240 pixels, porém os pixels não correspondem em sua totalidade à imagem térmica da célula FV.

Na Figura 40 se observa o histograma da imagem da célula em tons de cinza obtida durante o procedimento de segmentação.

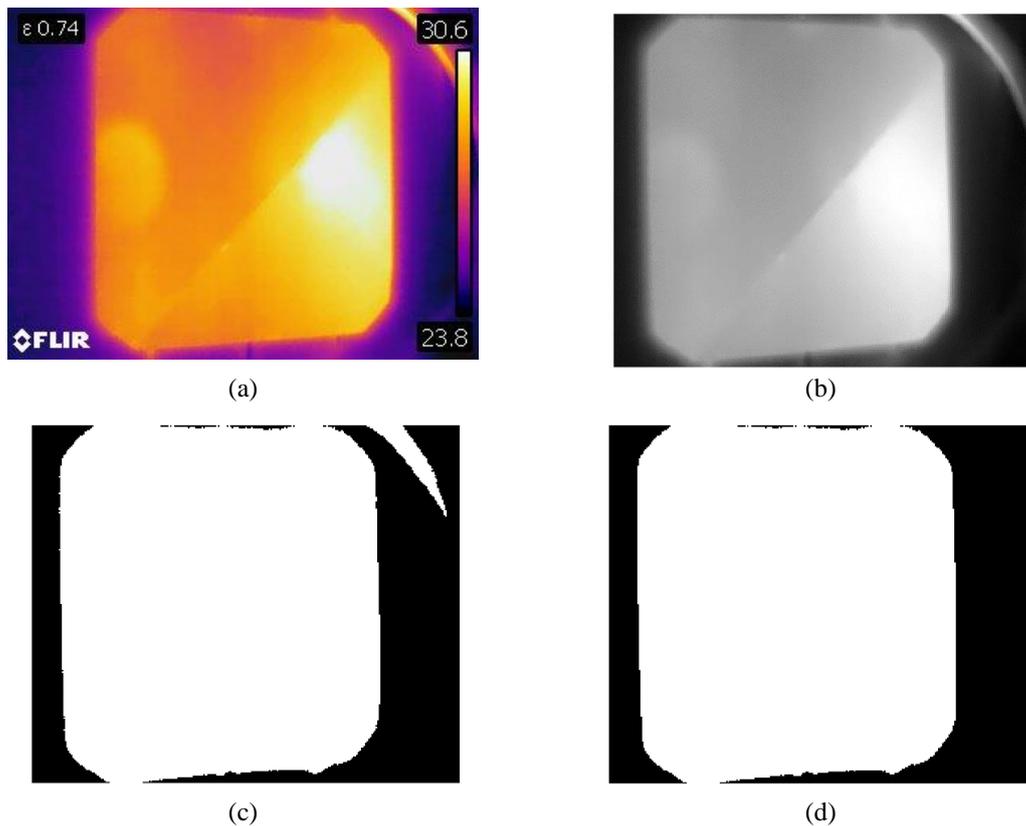
Figura 40 – Histograma da imagem da célula fotovoltaica em tons de cinza.



Fonte: autoria própria.

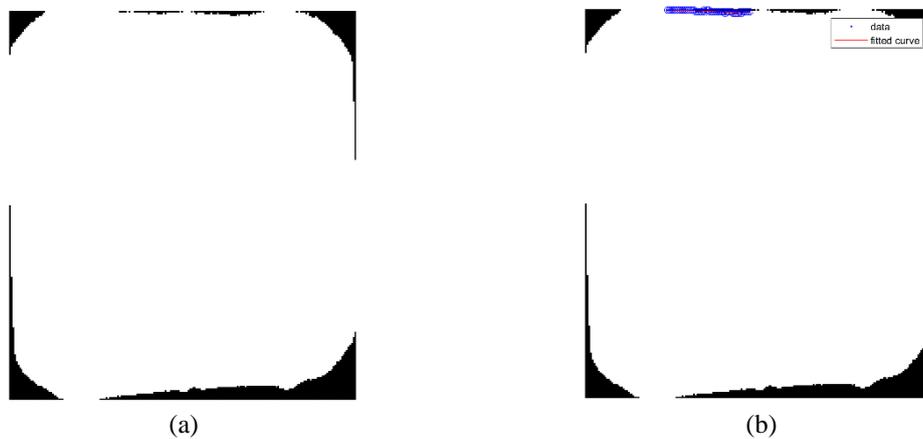
O histograma é utilizado para a aplicação do limiar global de Otsu tal qual foi descrito no Capítulo 4. As imagens resultantes de cada etapa da rotina de segmentação utilizada estão apresentadas na Figura 41 e Figura 42 desde a obtenção das imagens térmicas à máscara final resultante da segmentação.

Figura 41 – Etapas do algoritmo de segmentação: (a) Imagem térmica; (b) Conversão para tons de cinza; (c) Binarização da imagem; (d) Remoção dos cabos.



Fonte: autoria própria.

Figura 42 – Etapas do algoritmo de segmentação (continuação): (a) Remoção das laterais contendo fundo da imagem; (b) Corte superior; (c) Corte inferior; (d) Máscara final.

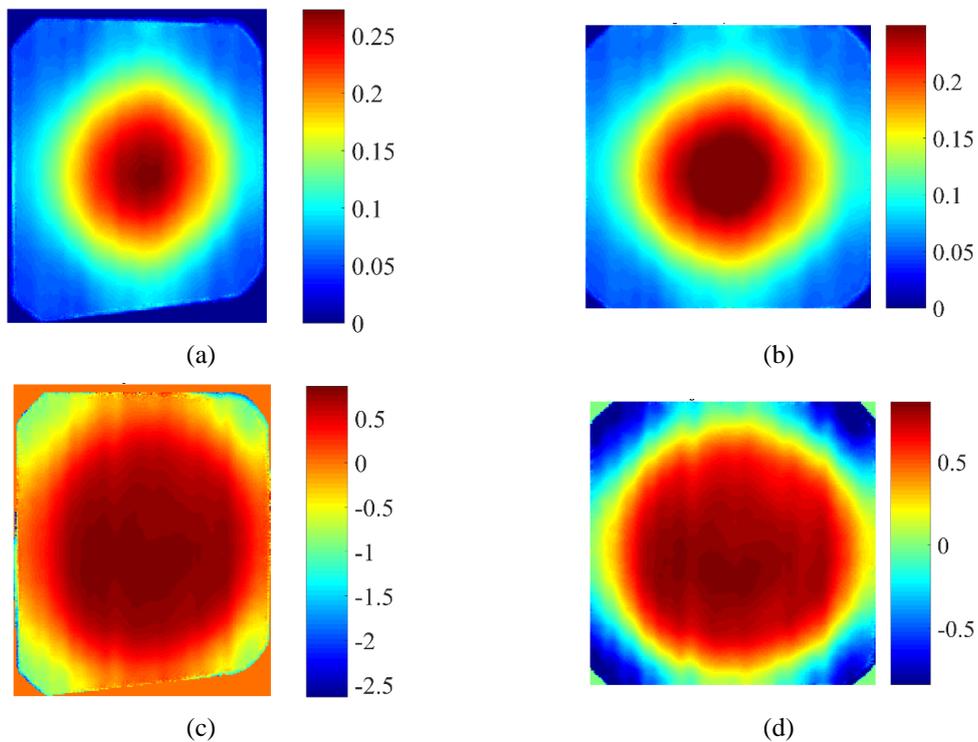




Fonte: autoria própria.

O fundo com valor zero atribuído, anula a contribuição dessa região. Posteriormente, a máscara final é utilizada em todas as imagens térmicas do vídeo radiométrico previamente ao processamento feito pelas demais técnicas de PDI. Na Figura 43 são mostradas imagens segmentadas antes e após a correção de distorção realizada para compensar o desalinhamento causado pelo posicionamento da câmera IR.

Figura 43 – Correção de distorção. Imagens de amplitude (a) distorcida e (b) alinhada e imagens de fase (c) distorcida e (d) alinhada.



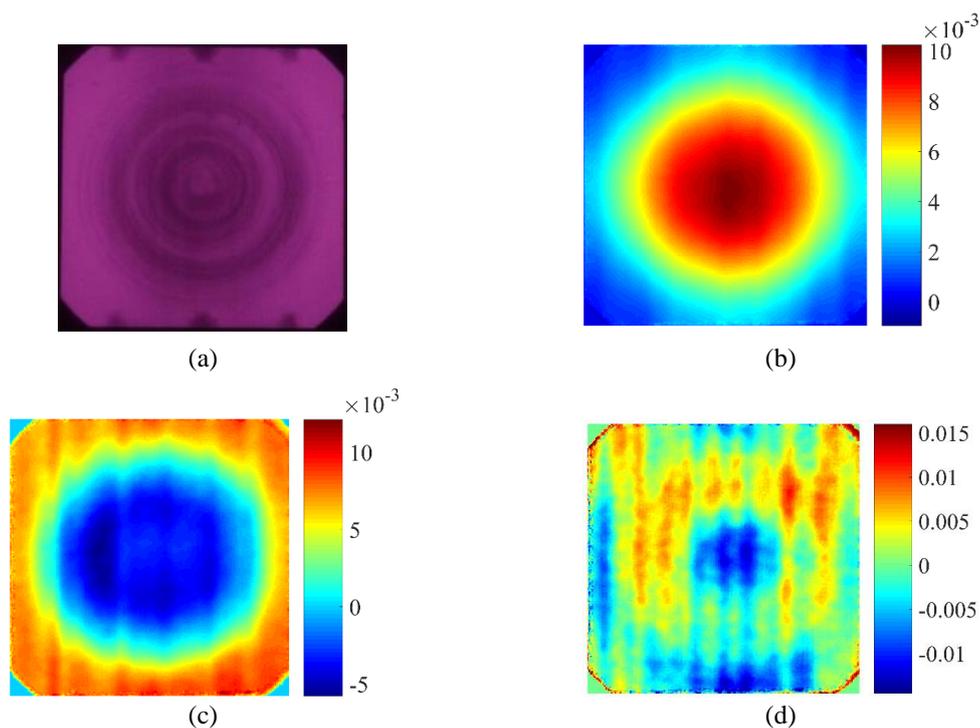
Fonte: autoria própria.

5.2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS DEFEITOS NAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

5.2.3.1 CARACTERIZAÇÃO POR PCA

Na Figura 44 são mostradas as imagens da primeira, segunda e terceira componentes principais, (b) a (d) respectivamente, para o teste realizado com a célula saudável 01 na frequência de 50 mHz e com os valores de amplitude e *offset* do sinal de excitação de 750 mV e 1,3 V, respectivamente. Os padrões observados nessas imagens (padrão circular concêntrico e listras verticais) estão relacionados apenas às imperfeições de seu processo de fabricação, conforme mencionado anteriormente. São esses padrões que identificam, nas imagens processadas a partir dos ensaios de DLIT a condição saudável da célula investigada.

Figura 44 – Imagens de (a) eletroluminescência, (b) primeira, (c) segunda e (d) terceira componentes principais para uma frequência de 50 mHz relativo ao ensaio usando a célula saudável 01.



Fonte: autoria própria.

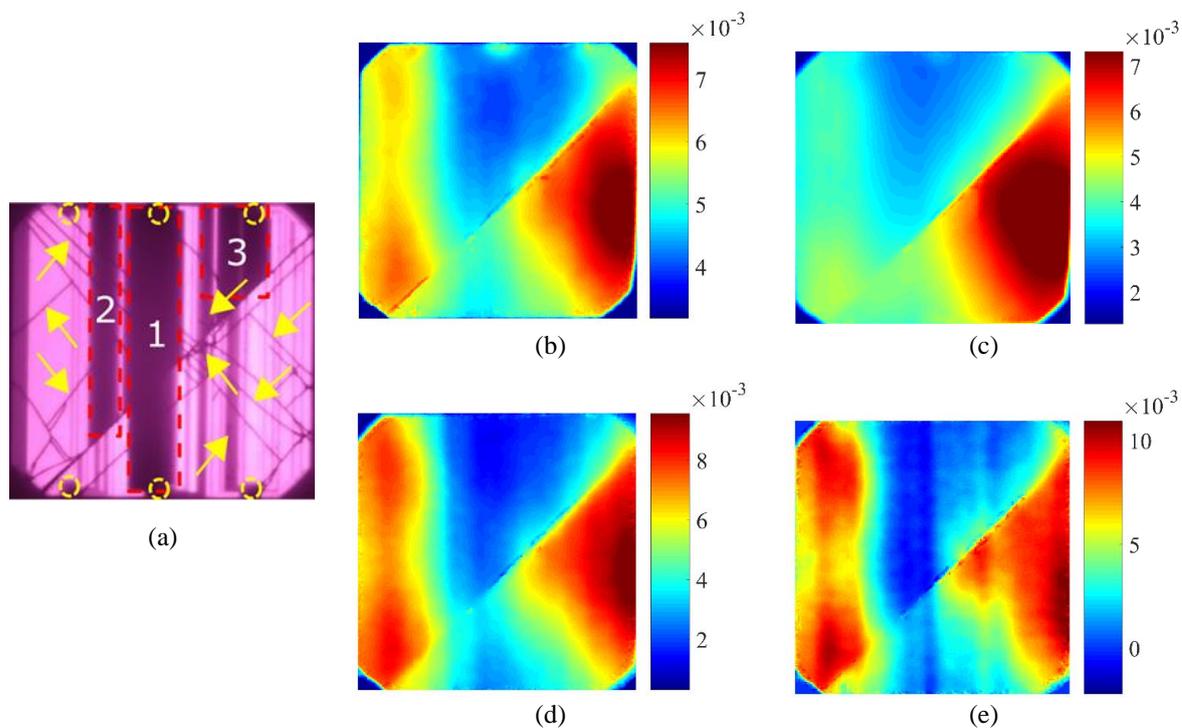
Na Figura 45 são apresentadas as imagens da primeira componente principal para a célula defeituosa 01 excitada em diferentes frequências de modulação: 6 mHz, 11 mHz, 50 mHz e 100 mHz, (b) a (e) respectivamente. Na Figura 46 tem-se as imagens equivalentes para a célula defeituosa 02 ensaiada nas mesmas frequências. A primeira

componente contém a maior quantidade de informações sobre as imagens térmicas originais.

Em termos de caracterização das dimensões reais dos defeitos mais importantes da célula defeituosa 01 (porções 1, 2 e 3 identificadas na Figura 35), as imagens para as frequências de 50 mHz e 100 mHz, Figura 45(d) e (e), são as mais expressivas. Porém, pode-se observar que há, na parte central da célula, uma sobreposição de fontes de calor menos intensas pelas mais intensas em seu entorno, diminuindo a certeza quanto à real extensão dos defeitos. Em relação à rachadura diagonal mais crítica da célula defeituosa 01, ela é destacada em todas as imagens.

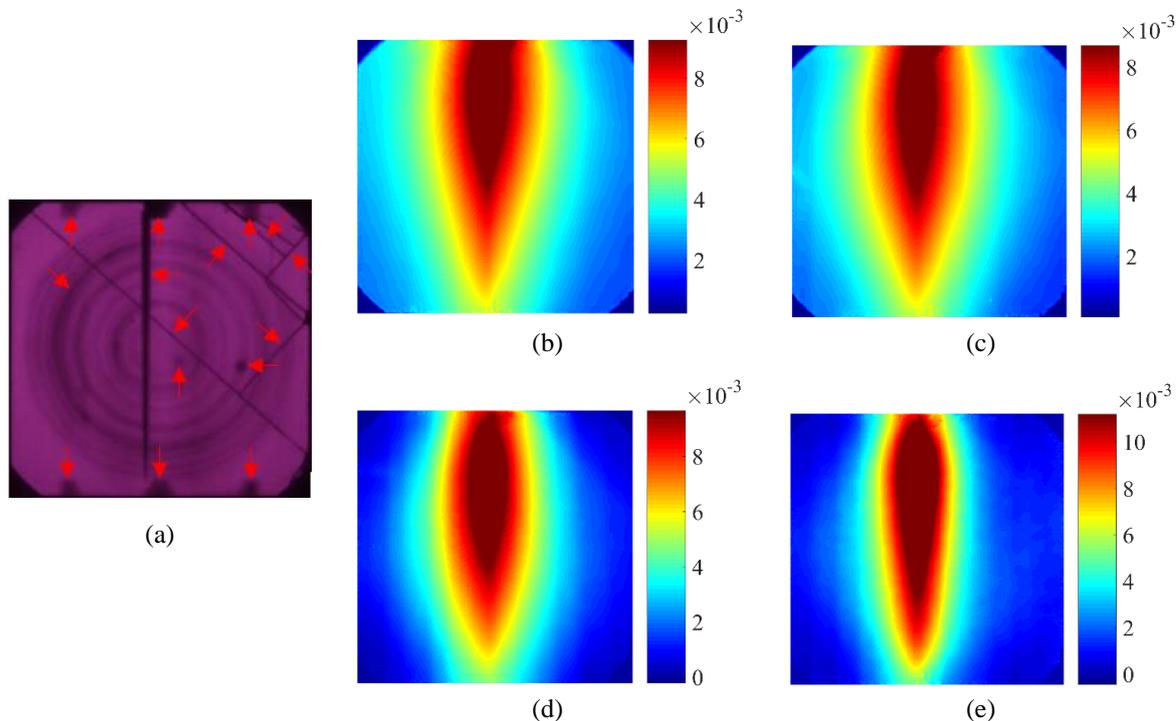
Nota-se também que as demais trincas diagonais, na Figura 45, por não resultarem em interrupção de corrente (e, portanto, não sendo consideradas como defeito crítico), não são caracterizadas nas imagens das componentes principais, pois permitem uma distribuição de temperatura superficial mais uniforme nessas regiões da célula. Com relação à célula defeituosa 02, os mesmos problemas de caracterização foram percebidos. As dimensões reais do defeito mais crítico da célula (fissura vertical centralizada) não estão precisas e comprometem a interpretação da extensão real desse defeito.

Figura 45 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da primeira componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.



Fonte: autoria própria.

Figura 46 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da primeira componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.

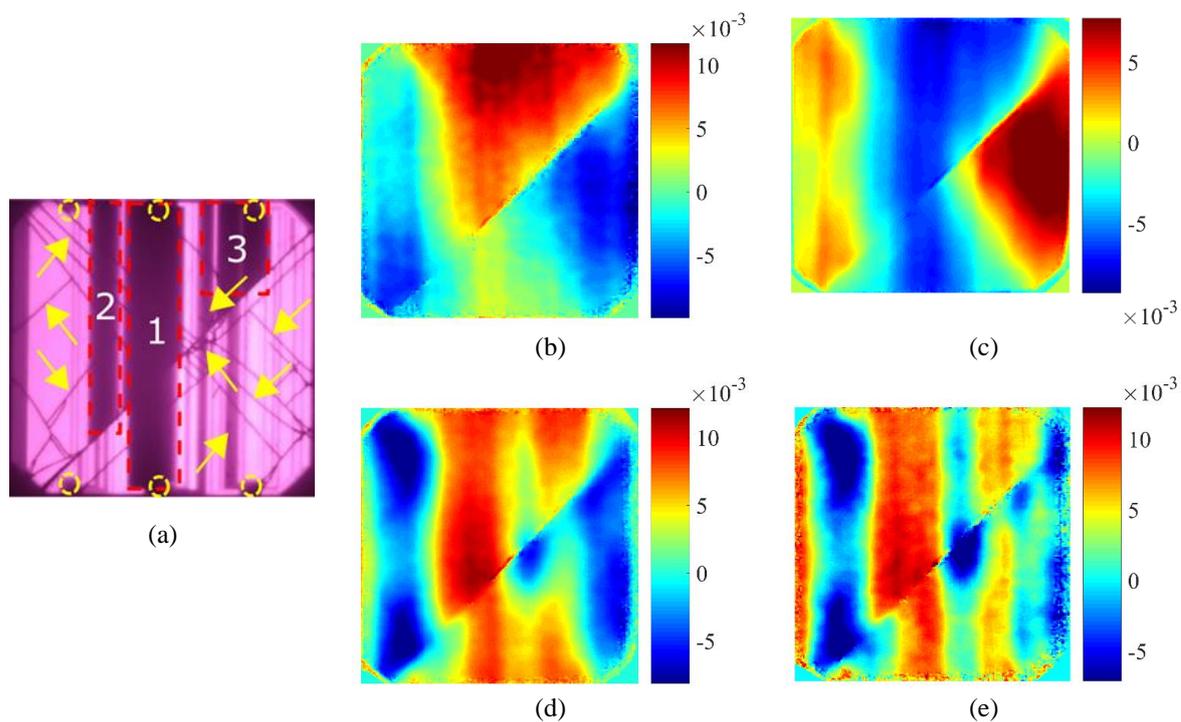


Fonte: autoria própria.

Na Figura 47 e na Figura 48 são apresentadas as imagens da segunda componente principal das células quando são excitadas pelo sinal modulado com frequências de 6 mHz, 11 mHz, 50 mHz e 100 mHz, (b) a (e), respectivamente. No caso da Figura 47 e da Figura 48, é possível perceber pelas imagens uma tendência de melhor detalhamento e caracterização do defeito principal em relação às imagens da primeira componente, mas todas ainda são substancialmente inconclusivas.

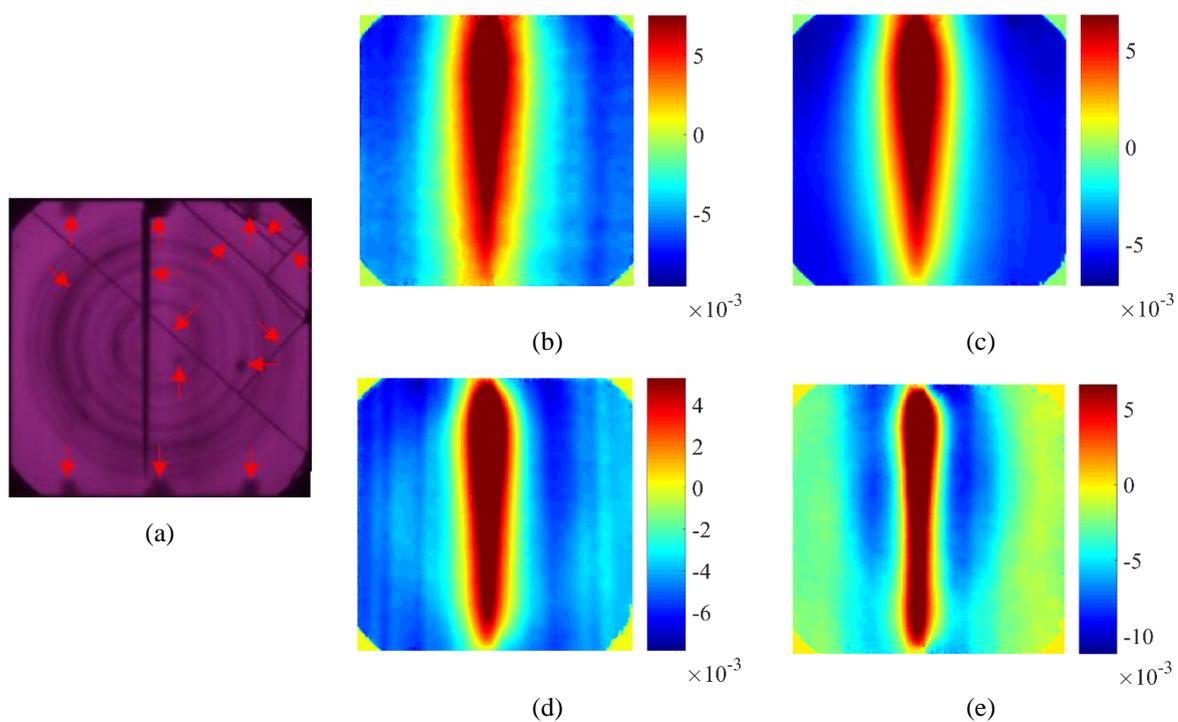
Para a terceira componente principal (Figura 49 e Figura 50), os resultados mostram um padrão de listras verticais proeminentes e paralelas que não haviam sido perceptíveis nas imagens das componentes anteriores. Duas possíveis causas são atribuídas a esse novo padrão: o efeito de aquecimento da metalização localizada completamente na parte traseira da célula FV constituída de trilhas verticais e paralelas ou, ainda, outra consequência do processo de fabricação. Em relação às demais componentes principais, os resultados apresentaram padrões bastante aleatórios e ruidosos, por isso, as imagens relacionadas a essas componentes foram omitidas.

Figura 47 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da segunda componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.



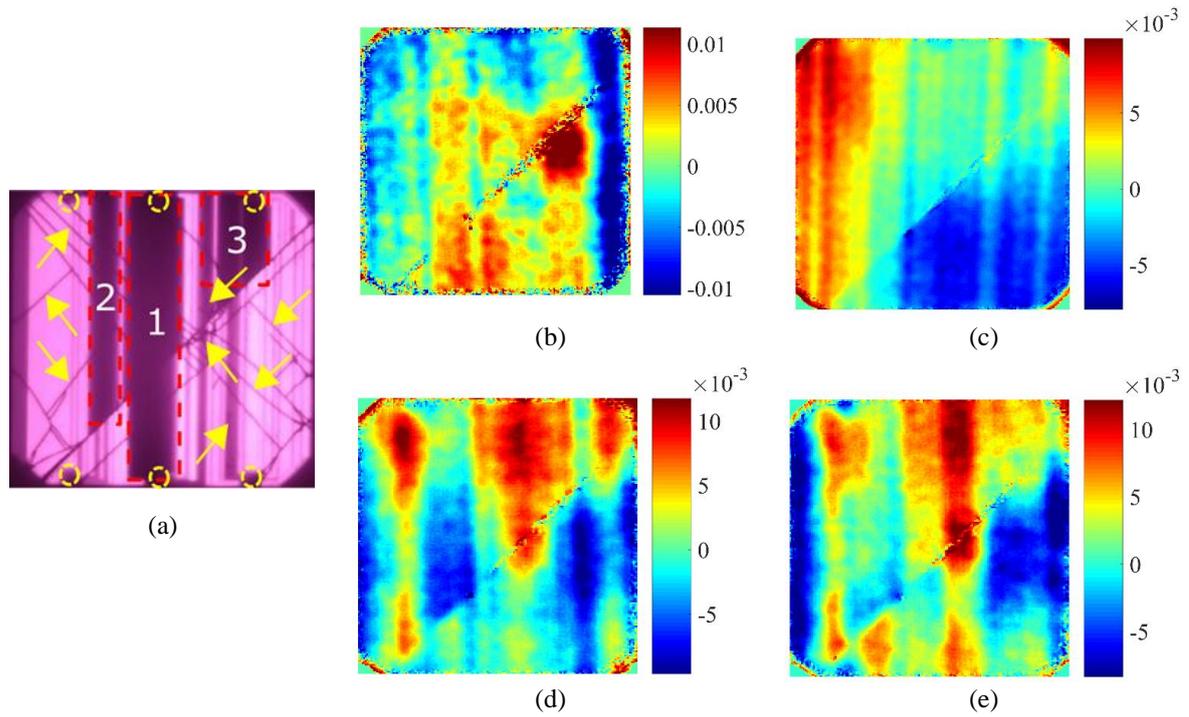
Fonte: autoria própria.

Figura 48 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da segunda componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.



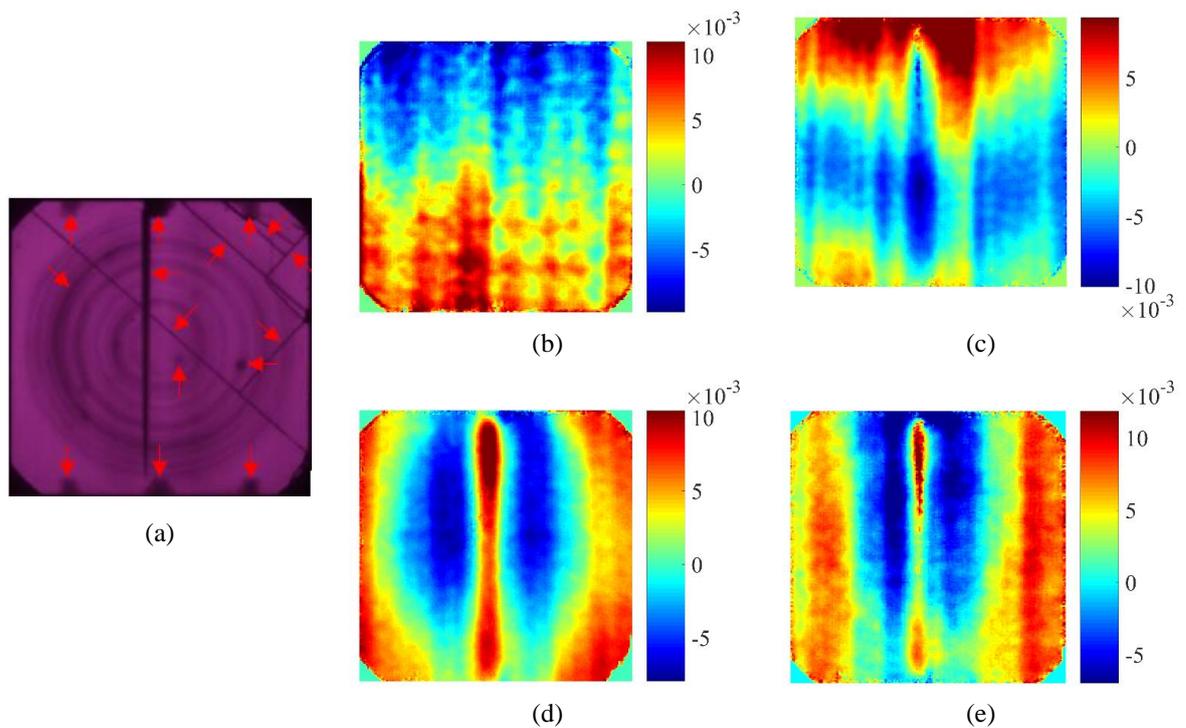
Fonte: autoria própria.

Figura 49 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da terceira componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.



Fonte: autoria própria.

Figura 50 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens da terceira componente principal dos testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.



Fonte: autoria própria.

Os resultados que foram sendo obtidos para as células defeituosas demonstram que as imagens para as frequências de 50 mHz e 100 mHz fornecem mais detalhes sobre a extensão real dos principais defeitos, indicando valores de frequência otimizados dentre todos os valores ensaiados e, portanto, em vários ensaios que se seguem são adotadas essas frequências de modulação.

Na Tabela 3 são apresentadas, após aplicação da PCA ao processamento da sequência de imagens térmicas para a célula defeituosa 02, ensaiada à uma frequência de modulação de 50 mHz, as contribuições das sete primeiras componentes principais. É possível comprovar através dos valores percentuais das contribuições que as duas primeiras componentes contêm as maiores contribuições em relação às demais, como destacado visualmente nas imagens das componentes principais anteriormente apresentadas.

Ademais, a fissura em diagonal da célula defeituosa 01, sendo este o defeito previamente identificado como o defeito de maior profundidade dentre os demais da célula, manteve o destaque na imagem para a terceira componente em todas as frequências. No caso da célula defeituosa 02, a porção superior da fissura vertical persistiu em relevância comparativamente à sua porção média central e inferior. Essas últimas observações levam a crer que as imagens dessas componentes podem ser um parâmetro importante de avaliação da profundidade dos defeitos das células fotovoltaicas analisadas.

Tabela 3 – Contribuições percentuais das componentes principais.

Componente	Frequência de modulação ($f_{lock-in}$)			
	6 mHz	11 mHz	50 mHz	100 mHz
	Contribuição (%)			
1 C	75,68	94,54	85,12	97,46
2 C	23,25	4,99	10,59	1,94
3 C	0,93	0,10	1,97	0,30
4 C	0,03	0,04	0,14	0,10
5 C	0,02	0,03	0,08	0,02
6 C	0,01	0,01	0,07	0,00
7 C	0,00	0,01	0,03	0,00

Fonte: autoria própria.

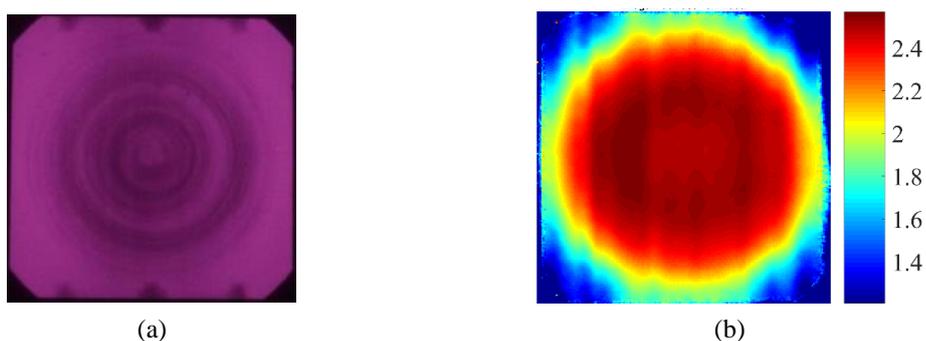
5.2.3.2 CARACTERIZAÇÃO POR 4-SPSM

Outra técnica de processamento de imagens aplicada à sequência de imagens térmicas é o método de quatro pontos por ciclo de modulação, que resulta na obtenção de duas imagens para cada teste realizado: uma imagem de amplitude e uma imagem de fase.

A partir da imagem de fase, é medido o contraste de fase com base na diferença do ângulo de fase entre as regiões defeituosas e saudáveis da própria célula de forma que todos os pontos que estejam “em fase” entre si apresentem o mesmo brilho. A imagem de amplitude, por outro lado, demonstra a variação máxima de temperatura absoluta em cada pixel.

Com relação às imagens de fase obtidas no teste com a célula saudável 01 na frequência de 50 mHz, é possível observar, na Figura 51, que imperfeições relacionadas ao processo de fabricação não afetam criticamente a distribuição de fase em sua superfície, produzindo uma diferença de fase entre os pixels significativamente menor do que a observada nas imagens de fase da célula defeituosa 01 (vide Figura 52). Nesse caso, pode-se inferir que o aquecimento da superfície devido à excitação da corrente elétrica ocorre de forma mais uniforme, como esperado para a sua condição.

Figura 51 – Imagens de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e (b) fase obtida da aplicação da 4-SPSM para o teste realizado com 50 mHz usando a célula saudável 01.

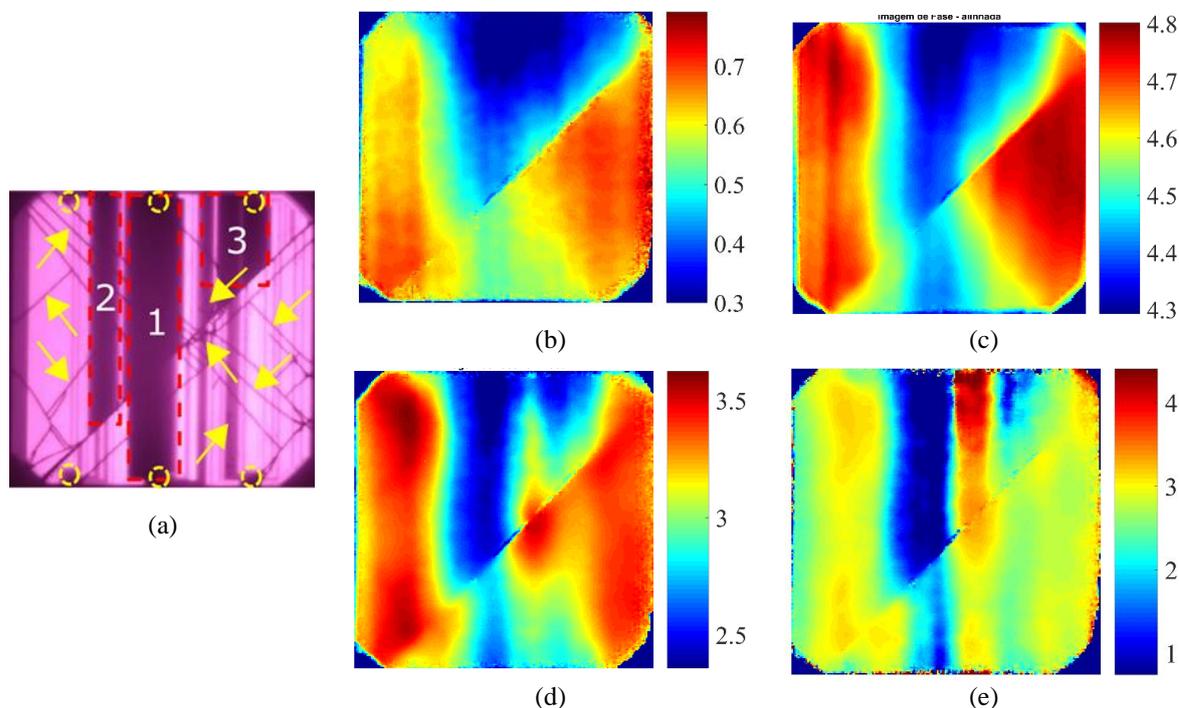


Fonte: autoria própria.

A caracterização do defeito nas imagens de fase da célula defeituosa 01 mostrou-se melhor e com maior grau de confiabilidade quanto às dimensões originais e localização dos principais defeitos, conforme apresentado na Figura 52. Essa caracterização baseia-se em uma comparação visual entre as imagens eletroluminescentes e as provenientes dos ensaios de termografia, não havendo sido feito um cálculo exato de área de região de defeito nas imagens. O contraste de fase, principalmente das imagens relacionadas às frequências de 50 mHz e 100 mHz, fornece uma visão mais clara da extensão das regiões 1, 2 e 3, e permite inferir melhor a delimitação das porções defeituosas. Não se percebe mudanças visuais bruscas nos pontos onde há presença de fontes de calor mais fracas no entorno das regiões defeituosas. A imagem de fase para a frequência de 6 mHz é a que menos contribui para a caracterização do defeito principal após a aplicação do 4-SPSM.

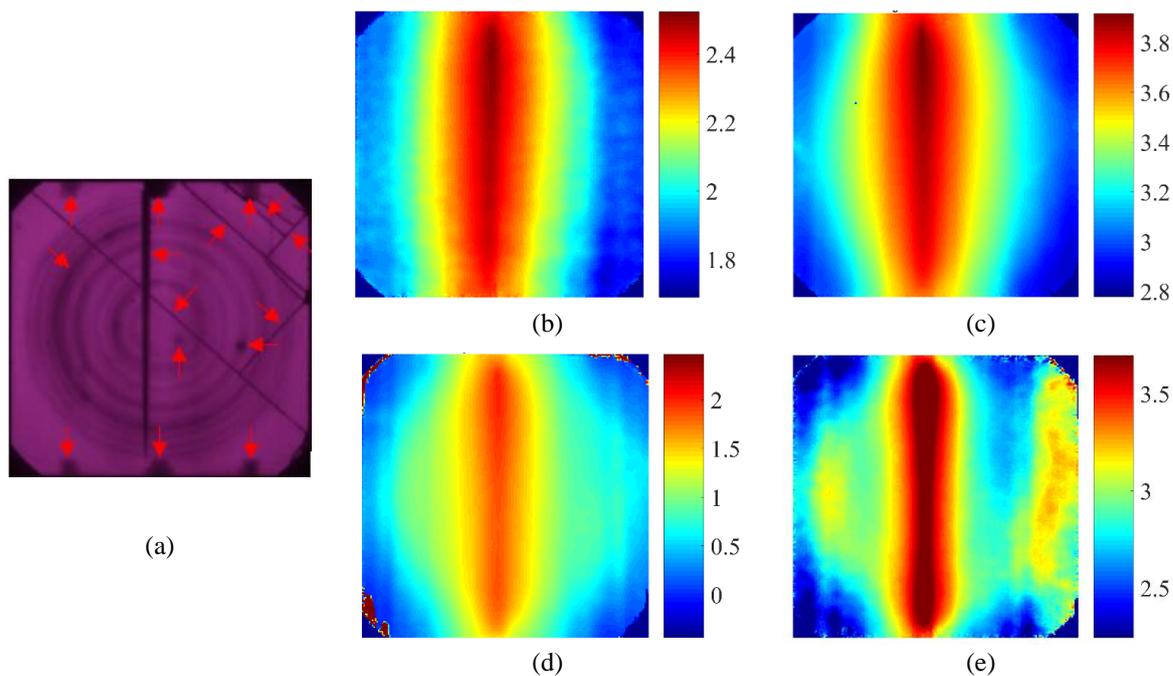
Na Figura 53 são apresentadas as imagens de fase da célula defeituosa 02 geradas a partir do processamento pela 4-SPSM.

Figura 52 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase obtidas da aplicação da 4-SPSM para os testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.



Fonte: autoria própria.

Figura 53 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase obtidas da aplicação da 4-SPSM para os testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.

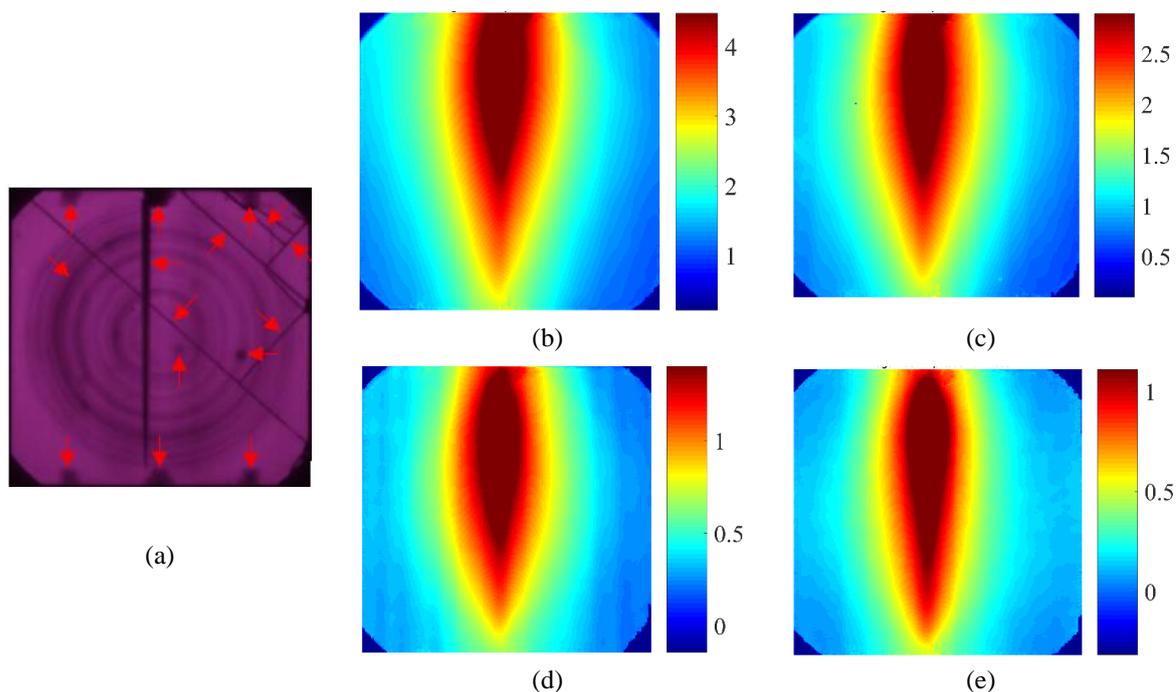


Fonte: autoria própria.

No caso da imagem de amplitude, que consiste nas variações máximas de amplitude térmica observáveis na resposta térmica temporal de cada pixel em estado permanente periódico, a caracterização obtida é muito próxima àquela obtida nas imagens da primeira componente principal mostrando a sobreposição das fontes de calor menos intensas pelas mais intensas da vizinhança. Na Figura 54, as imagens de amplitude para a célula defeituosa 02, se comparadas com as imagens da Figura 46, comprovam essa realidade. Além disso, é possível atestar pelas imagens de amplitude que a medida que a frequência é reduzida, a tendência é que amplitudes térmicas maiores ocorram na superfície da célula. Isto porque o tempo de aquecimento e resfriamento durante o ciclo térmico da célula é maior para frequências menores.

Pela falta de detalhamento percebida nas imagens de amplitude em relação às imagens de fase, as imagens de amplitude células não serão consideradas, com exceção da célula defeituosa 01, Figura 54, que ilustra o caso.

Figura 54 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de amplitude obtidas da aplicação da 4-SPSM para os testes realizados com (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.



Fonte: autoria própria.

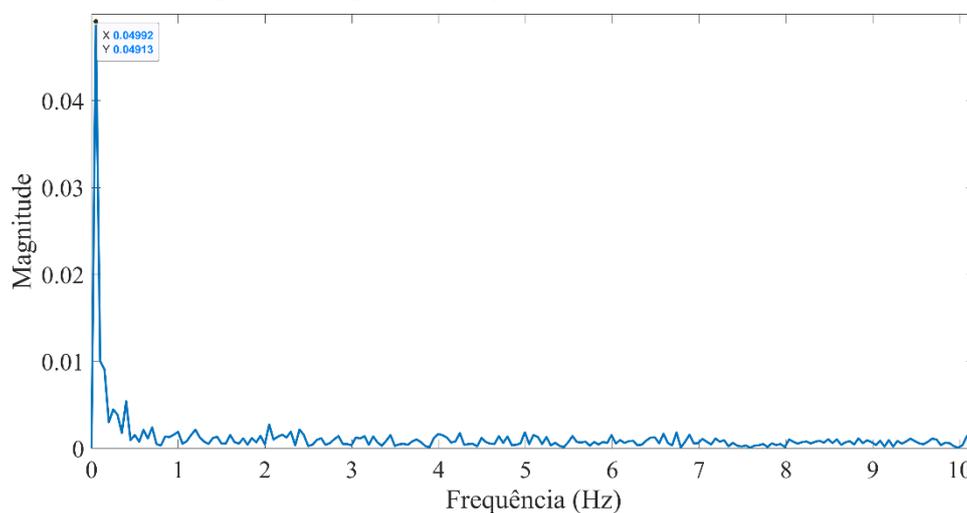
5.2.3.3 CARACTERIZAÇÃO POR FFT

Relativamente à FFT, é esperado que a sua aplicação em termografia modulada torne o contraste notavelmente melhorado pelo cálculo do diagrama de magnitude e fase.

Além disso, segundo [26], o algoritmo de reconstrução de imagem baseado em FFT pode eliminar a influência do aquecimento desigual e a mudança de emissividade da superfície das células fotovoltaicas. A técnica de Fourier é um procedimento bastante popular e quando utilizado tem a vantagem de não necessitar de sincronização entre a amostragem de dados e a modulação do sinal, como afirma Breinteinstein [10].

Na Figura 55 é apresentado o espectro unilateral de Fourier para um ensaio cuja frequência de modulação utilizada foi de 50 mHz utilizando a célula defeituosa 01. No espectro, que não contempla o nível DC, está em destaque a frequência para a qual a contribuição é máxima, sendo esta 49,92 mHz, e como esperado é muito próximo à frequência de modulação do sinal de entrada.

Figura 55 – Espectro de magnitude unilateral de Fourier.

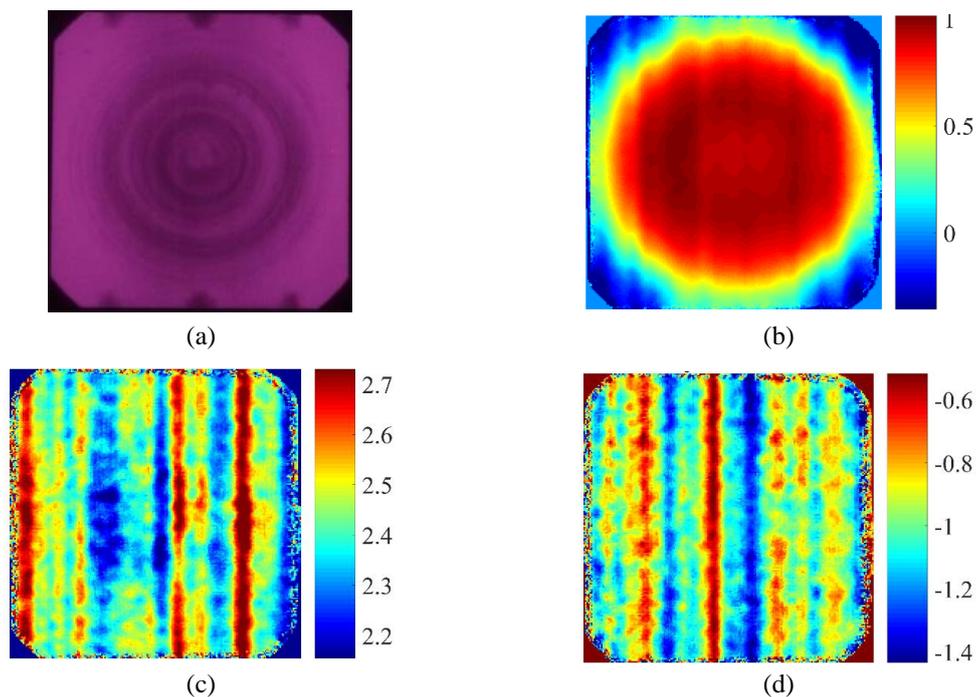


Fonte: autoria própria.

Na Figura 56 estão contidas as imagens de fase obtidas dos testes de DLIT com a célula saudável 01 utilizando a frequência de modulação de 50 mHz. Na Figura 56 (b) tem-se a imagem referente à frequência fundamental do espectro de Fourier e, em (c) e (d) são mostradas as imagens da segunda e terceira harmônicas, respectivamente.

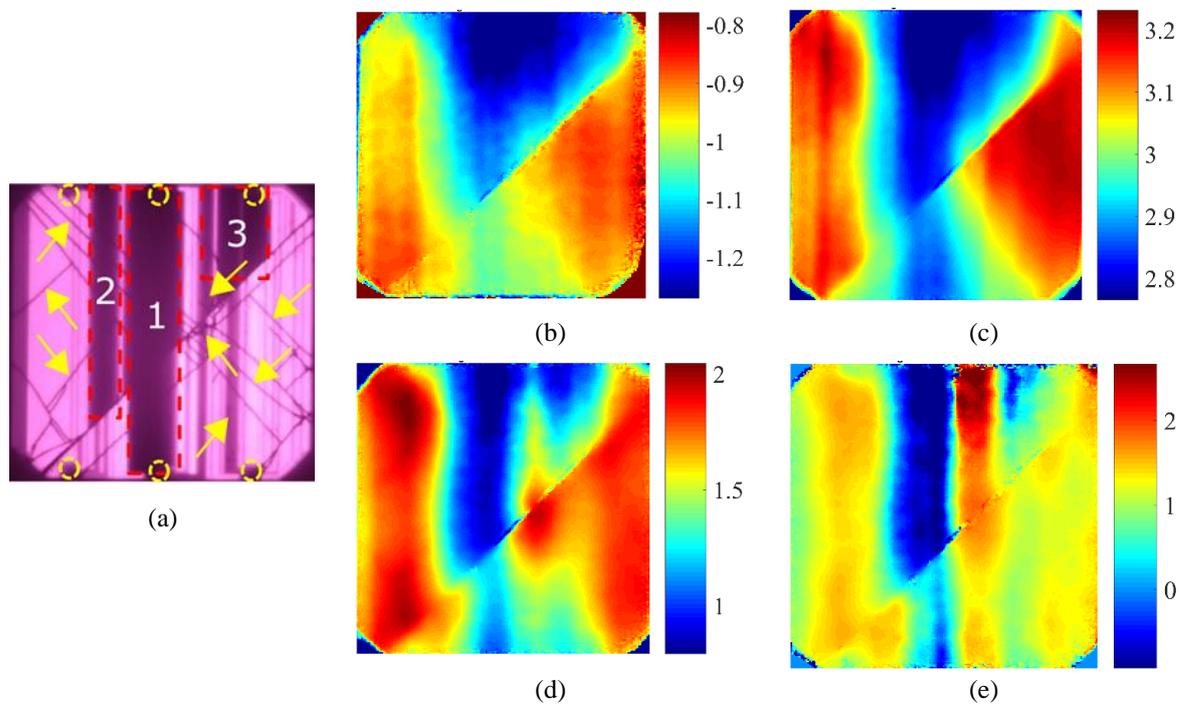
Na Figura 57 e na Figura 59 as imagens de fase correspondentes à frequência fundamental e segunda harmônica do espectro de Fourier são apresentadas com a célula defeituosa 01 submetida a diferentes frequências de modulação do sinal de excitação externo. Analogamente, as imagens da Figura 58 e da Figura 60 contêm as mesmas informações, no entanto relativas aos ensaios com a célula defeituosa 02.

Figura 56 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase obtidas da aplicação da FFT aos testes realizados com a (b) frequência fundamental e a (c) segunda e (d) terceira harmônicas utilizando uma frequência de modulação de 50 mHz com a célula saudável 01.



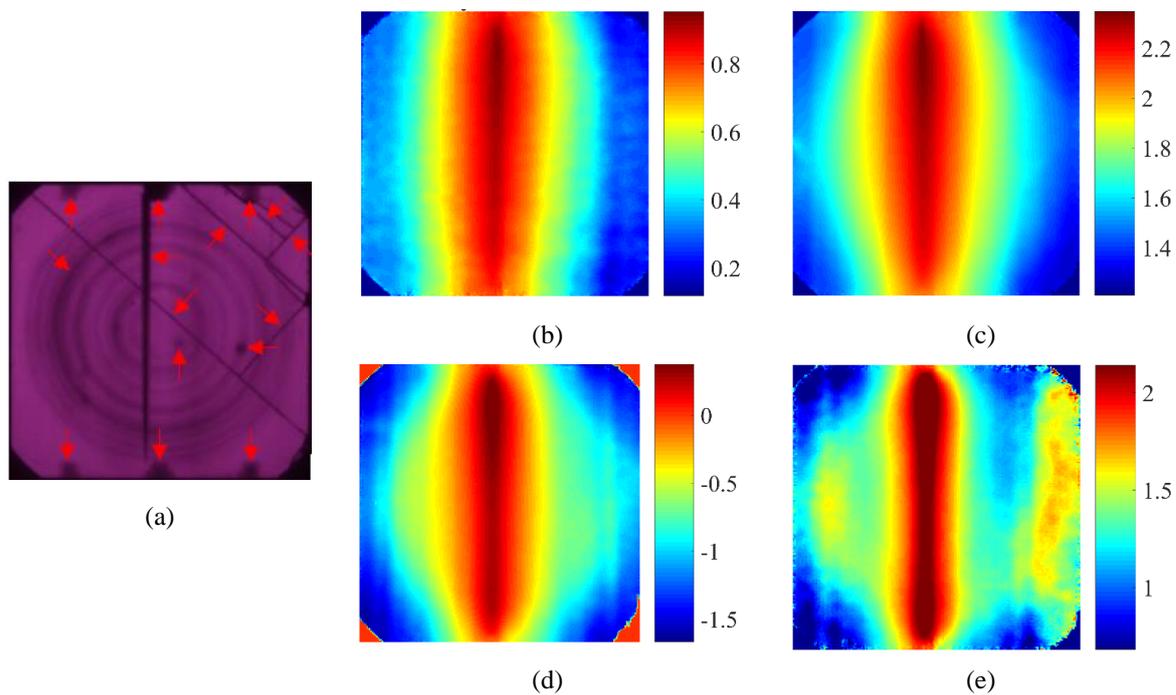
Fonte: autoria própria.

Figura 57 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase para a frequência fundamental obtidas da aplicação da FFT para os testes realizados com a frequência de modulação de (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando o célula defeituosa 01.



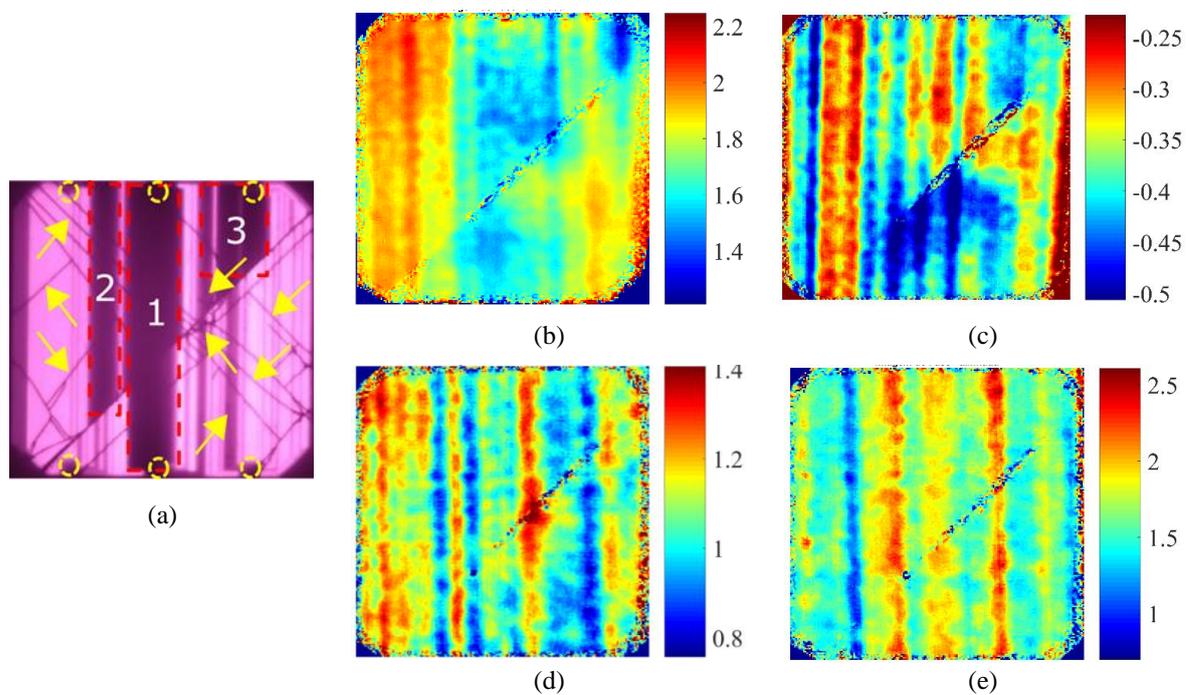
Fonte: autoria própria.

Figura 58 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase para a frequência fundamental obtidas da aplicação da FFT para os testes realizados com a frequência de modulação de (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando o célula defeituosa 02.



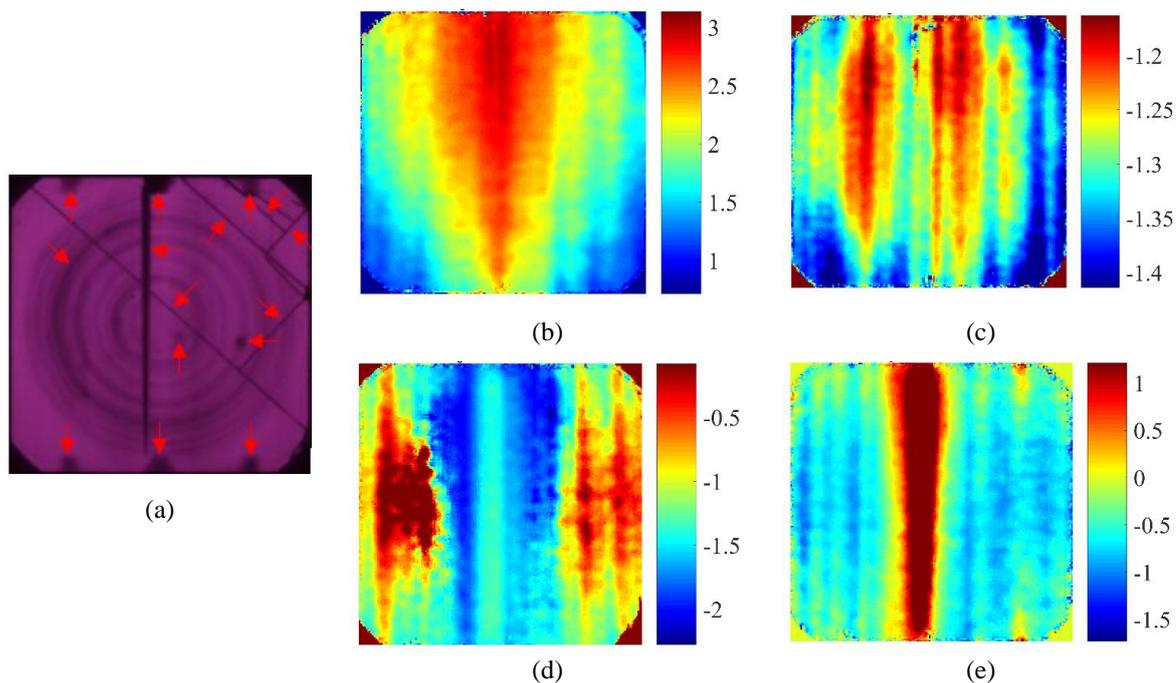
Fonte: autoria própria.

Figura 59 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase para a segunda harmônica do espectro de Fourier obtidas da aplicação da FFT para os testes realizados com a frequência de modulação de (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz ou (e) 100 mHz para a célula defeituosa 01.



Fonte: autoria própria.

Figura 60 – Imagem de (a) eletroluminescência (imagem de referência) e imagens de fase para a segunda harmônica do espectro de Fourier obtidas da aplicação da FFT para os testes realizados com a frequência de modulação de (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz ou (e) 100 mHz para a célula defeituosa 02.



Fonte: autoria própria.

Para a segunda harmônica, as imagens de fase resultantes não apresentam melhora, como também as demais harmônicas de ordem superior, no que diz respeito à visualização dos principais defeitos. Entretanto, nota-se também a nitidez do padrão de listras verticais, que também foi observado nas imagens da terceira componente principal pelo método PCA.

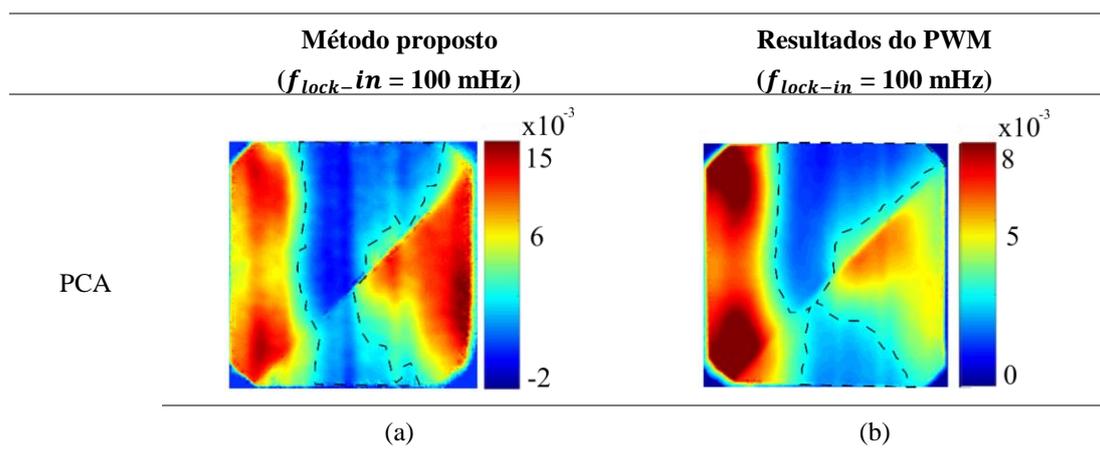
Os resultados obtidos da técnica FFT são semelhantes aos obtidos aplicando a técnica dos quatro pontos por ciclo de modulação à mesma sequência de imagens térmicas, tanto para células saudáveis quanto para as células defeituosas. É possível notar a similaridade das imagens de fase derivadas do espectro de fase de Fourier, que considera a componente de frequência fundamental, e as imagens de fase via 4-SPSM. Essa similaridade é esperada haja visto que os dois métodos resultam em uma distribuição de fase na superfície da célula FV e as diferenças de fase entre os pixels, para ambos os casos, são muito próximas, pois as técnicas consideram o mesmo vídeo radiométrico. Nas imagens de fase também é possível observar que, em regiões com fontes de calor mais intensas (regiões onde o defeito se concentra e seus arredores), a fase tende a assumir os valores mais baixos em comparação com as regiões mais saudáveis da célula.

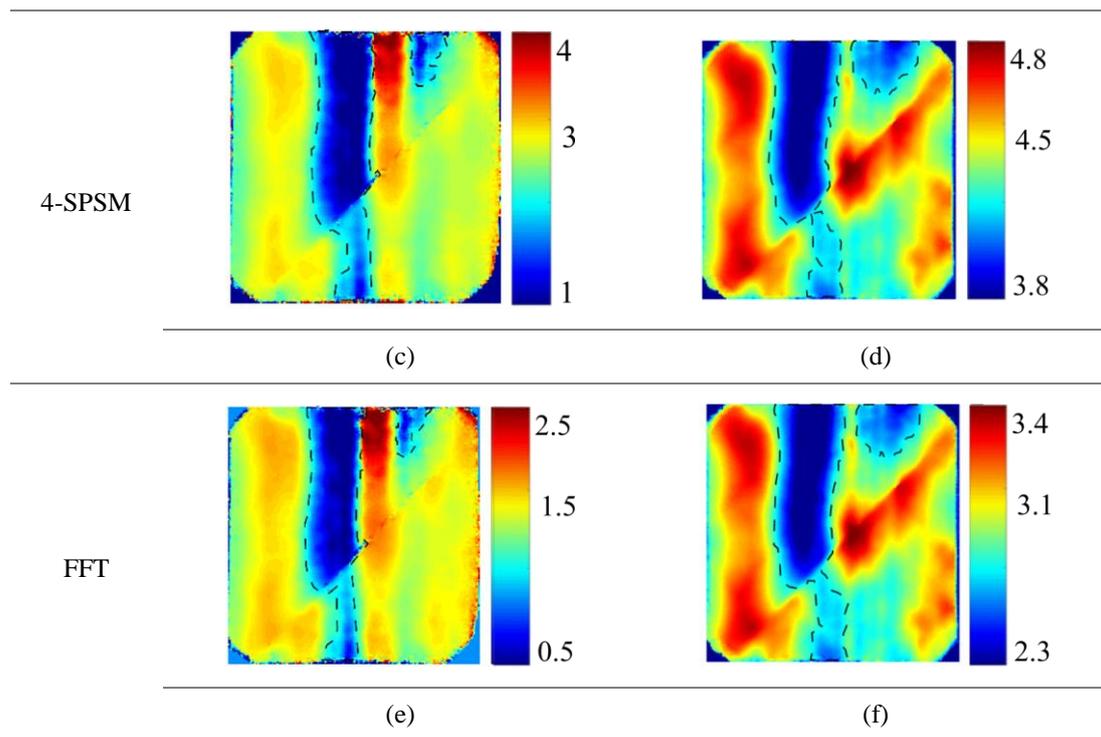
5.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO PROPOSTO USANDO UMA CORRENTE ELÉTRICA SENOIDAL VERDADEIRA E A TÉCNICA USANDO UM SINAL PWM

O objetivo da comparação proposta nesta seção é gerar o efeito de um sinal de onda senoidal discreto através da variação do ciclo de trabalho de um trem de pulsos para fornecer valores de tensão senoidal equivalente mais altos ou mais baixos. Em relação aos testes com PWM, o gerador de função é substituído por um microcontrolador ATmega2560, devidamente configurado para gerar pulsos com ciclo de trabalho variável resultando em um comportamento de forma de onda senoidal. A frequência adotada nesta etapa é 100 mHz. Um circuito divisor de tensão é adotado para diminuir o valor da tensão aplicada à célula fotovoltaica, mantendo os valores máximos de tensão e corrente na mesma faixa de testes anteriores a serem comparados: 1,3 V e 2,8 A.

Na Tabela 4 (c) e (e) são mostradas as imagens de fase obtidas pela aplicação dos algoritmos de 4-SPSM e FFT à sequência de imagens térmicas da célula defeituosa 01 pelo método proposto e na Tabela 4 (d) e (f) as imagens de fase, via 4-SPSM e FFT respectivamente, da realização do teste com PWM. As imagens identificadas por (a) e (b) na Tabela 4 referem-se às imagens da primeira componente principal para o método proposto e teste com PWM, respectivamente.

Tabela 4 – Comparação entre imagens obtidas pelo método proposto e pelo teste com sinal PWM com frequência de excitação de 100 mHz em ambos; as técnicas utilizadas foram (a) e (d) PCA (primeira componente principal); (b) e (e) 4-SPSM; e (c) e (f) FFT.





Fonte: autoria própria.

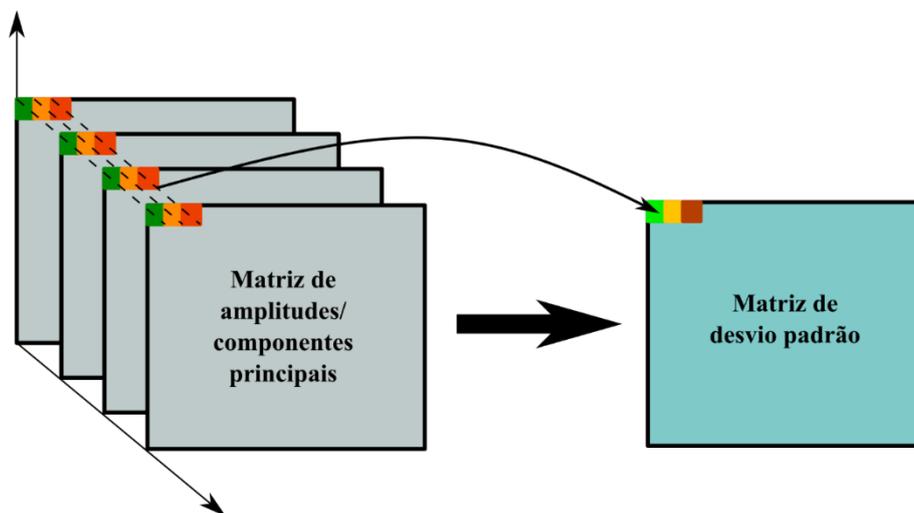
Ao analisar as imagens, é possível identificar a região defeituosa, embora existam algumas diferenças sutis. A partir das imagens de fase via 4-SPSM e as imagens de fase via FFT, para a mesma frequência de modulação (100 mHz), é possível verificar uma melhor resolução com operação mais suave, clara e contínua em termos de delimitação dos defeitos revelados da célula defeituosa 01 usando o método proposto. Essa constatação não descarta o potencial da técnica PWM, mas reforça a eficácia e as vantagens do método proposto nesta pesquisa por meio de uma análise qualitativa das imagens que indica o método proposto com maior grau de fidelidade às reais extensões dos defeitos.

5.2.5 AVALIAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DOS ENSAIOS DE DLIT

Para avaliar o grau de reprodutibilidade dos ensaios é proposta uma análise estatística baseada em repetidos ensaios de DLIT (04 repetições) reproduzidos com uma mesma célula, sendo mantidas as mesmas configurações do arranjo experimental, parâmetros elétricos do gerador de função e temperatura ambiente média durante os ensaios. As imagens térmicas foram registradas em cada experimento, processadas pelas três técnicas de análise debatidas nesta seção e, posteriormente, feito um estudo estatístico baseado na avaliação do desvio padrão observado entre os valores de amplitude e das

componentes principais obtidos para cada pixel das imagens resultantes. A Figura 61 apresenta, de forma ilustrativa, a aplicação dessa rotina estatística.

Figura 61 – Verificação do grau de reprodutibilidade experimental por análise estatística.



Fonte: autoria própria.

Para essa análise, em particular, as imagens de fase não são adequadas, pois, nesta metodologia a sua contribuição está na observância na imagem de fase da distribuição espacial de fase (portanto nas diferenças de fase entre os pixels da imagem) e não nos valores absolutos de fase em cada ponto. Os resultados da análise estatística que apresentam maior desvio padrão são apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6.

Tabela 5 – Desvio padrão da sequência de medições consecutivas com a célula saudável 01.

Célula saudável 01					
	PCA (1ª C)	PCA (2ª C)	PCA (3ª C)	FFT (Mag)	4-SPSM (Amp)
Desvio padrão máximo	0,0006	0,0029	0,011	0,0224	0,0500

Fonte: autoria própria.

Tabela 6 – Desvio padrão da sequência de medições consecutivas com a célula defeituosa 01.

Célula defeituosa 01					
	PCA (1ª C)	PCA (2ª C)	PCA (3ª C)	FFT (Mag)	4-SPSM (Amp)
Desvio padrão máximo	0,0035	0,0107	0,0120	0,1614	0,1716

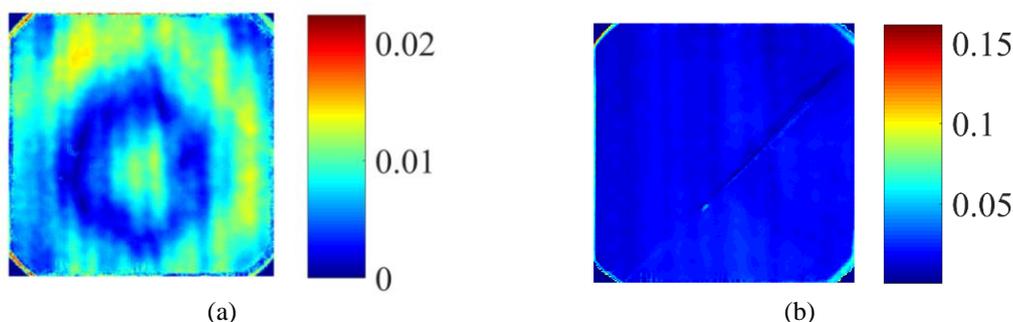
Fonte: autoria própria.

É possível verificar, a partir dos valores de desvio padrão das tabelas acima que o método de ensaio proposto é reprodutível. Em outras palavras, tem-se que as respostas

térmicas das células durante os ensaios de LIT realizados dentro das mesmas condições experimentais são muito próximas umas das outras, como esperado. Sendo assim, qualquer usuário que estiver de posse das instruções técnicas de condução dos ensaios e do material necessário, poderá executar os experimentos citados neste trabalho e obter praticamente os mesmos resultados relatados.

As imagens de desvio padrão obtidas das imagens de magnitude via FFT são apresentadas na Figura 62. Nessa perspectiva, a célula saudável, Figura 62(a), apresenta destaque pelo fato do desvio padrão na medição de temperaturas se concentrar mais nas regiões próximas às bordas e no extremo central da célula a menos de um anel no entorno deste centro que possui o desvio padrão aproximadamente nulo.

Figura 62 – Imagens de desvio padrão de duas células fotovoltaicas, sendo uma (a) saudável e a outra (b) defeituosa.



Fonte: autoria própria.

5.2.6 ANÁLISE DO CUSTO COMPUTACIONAL

Uma forma de avaliar o custo computacional de um algoritmo é avaliando o tempo de execução desse algoritmo para processar determinada rotina, além do uso de memória, por exemplo. Os dados de entrada, a complexidade do algoritmo e as limitações do *hardware* podem afetar diretamente o custo computacional de um algoritmo. No desenvolvimento das implementações das técnicas de PDI adotadas neste trabalho, foi dedicado esforço no sentido de diminuir os tempos de processamento dos algoritmos tornando mais rápidos os processamentos dos dados térmicos.

Em termos do custo computacional do processamento digital das imagens térmicas realizado pelas três técnicas escolhidas, é possível informar, com base nos tempos de processamento de cada técnica, que a aquela que possui maior custo computacional é a 4-SPSM, seguida da PCA e FFT, nesta ordem. Os dados da Tabela 7, onde são mostrados os tempos de processamento médios para um ensaio conduzido com

a célula defeituosa 01 a uma frequência de modulação de 6 mHz (menor frequência considerada dentre os ensaios e condição de maior custo computacional), comprovam essa última inferência. Os processamentos foram feitos em computador cujo processador é o Intel(R) Xeon(R), CPU E3-1240 v3 a 3.40GHz, 32 GB de memória RAM instalada e sistema operacional Windows 10 Pro de 64 bits. Para os outros ensaios realizados, o tempo de processamento foi verificado e se manteve próximo aos tempos médios da Tabela 7.

Tabela 7 – Tempo médio de processamento das técnicas de PDI para um ensaio de LIT realizado a 6 mHz ($f_{lock-in}$).

Técnica de PDI	Tempo médio de processamento (segundos)
4-SPSM	1800
PCA	145
FFT	19

Fonte: autoria própria.

5.2.7 CLASSIFICAÇÃO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: MÉTODO DA FUNÇÃO GAUSSIANA BIDIMENSIONAL

No decorrer do desenvolvimento desta pesquisa, percebeu-se que a função Gaussiana 2D elíptica geral dada pela Equação 34 não era ideal para este processo de classificação, pois o ajuste iterativo dos seis parâmetros A , x_o , y_o , σ_x , σ_y e β do modelo permitiu que algumas células defeituosas atingissem valores razoavelmente altos de R^2 comprometendo sua correta classificação. Em vez disso, verificou-se que a Equação 35 representa um modelo mais adequado para as imagens consideradas, por isso ela foi usada para calcular os parâmetros estatísticos e os valores de R^2 . Como resultado, as células defeituosas e saudáveis foram claramente classificadas.

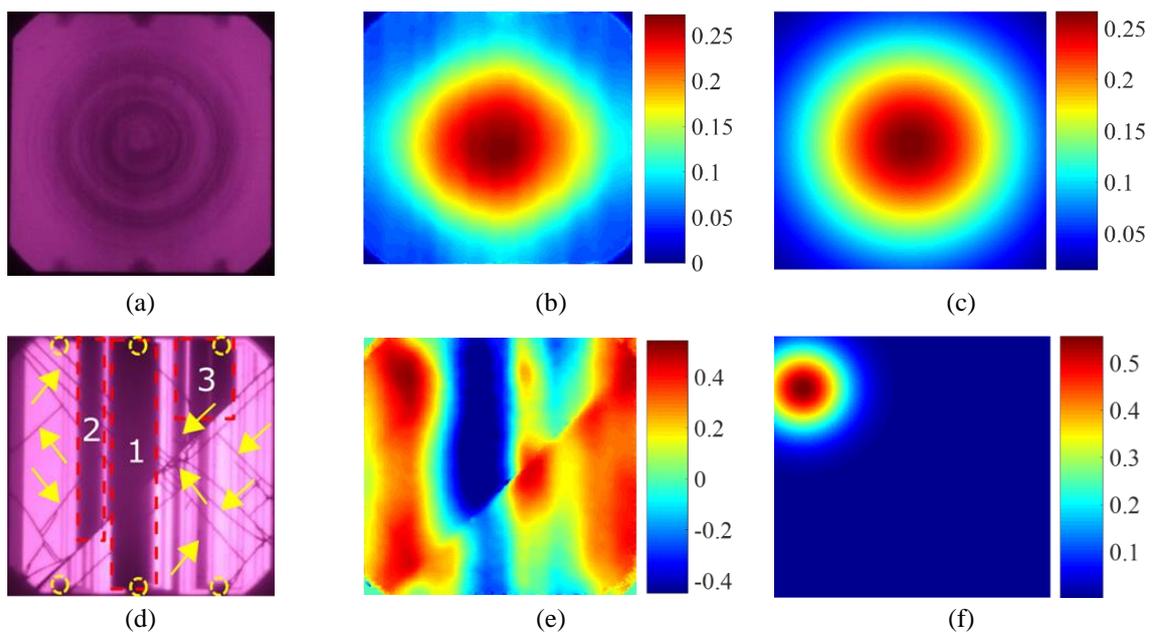
Como nenhuma normalização foi aplicada aos dados termográficos e resultantes das técnicas PCA e FFT, diferentes valores de estimativa inicial dos parâmetros da função gaussiana foram escolhidos para cada imagem para melhorar a convergência do R^2 . Foi definido um número máximo de iterações ($N = 1200$) e diz-se que a convergência foi alcançada quando a soma dos resíduos for menor que 10^{-8} .

Algumas informações sobre os testes de DLIT realizados (parâmetros ajustados no gerador de função e o valor de pico de corrente medido nas células FV) constam na

Tabela 8 (vide Apêndice A), bem como os valores calculados para o coeficiente de determinação. O objetivo foi manter os valores máximos de corrente medidos em torno de 50% da corrente nominal de curto-circuito das células, que é de 3,14 A respeitando-se as limitações do circuito amplificador de potência e nível máximo de corrente na célula. Apesar disso, a frequência escolhida para esse primeiro conjunto dos experimentos foi definida em 50 mHz, conforme indicado em [28], uma das frequências mais expressivas em termos de caracterização das dimensões reais dos defeitos mais importantes da célula fotovoltaica.

Na Tabela 8 (ver Apêndice A), observa-se os valores de R^2 que correlacionam as imagens originais (imagens de magnitude, fase e componentes principais) com o modelo gaussiano 2D ajustado. Esses valores de R^2 revelam que a imagem de magnitude da FFT considerando a frequência fundamental de seu espectro e as imagens da primeira componente principal são os melhores casos para ajustar um modelo 2D e obter altos valores de R^2 (próximo de 1) para as células saudáveis, o que é esperado, pois essas células contêm padrões circulares concêntricos bem comportados – ver Figura 63 (b) e (c). Em muitos casos, quanto maior a ordem da imagem da componente principal, mais aleatório e não circular se torna o padrão das imagens, conforme mostrado na Figura 44.

Figura 63 – Célula saudável 01: (a) imagem eletroluminescente, (b) imagem de magnitude da FFT; (c) modelo gaussiano; célula defeituosa 01: (d) imagem eletroluminescente, (e) imagem de magnitude da FFT; (f) modelo gaussiano;

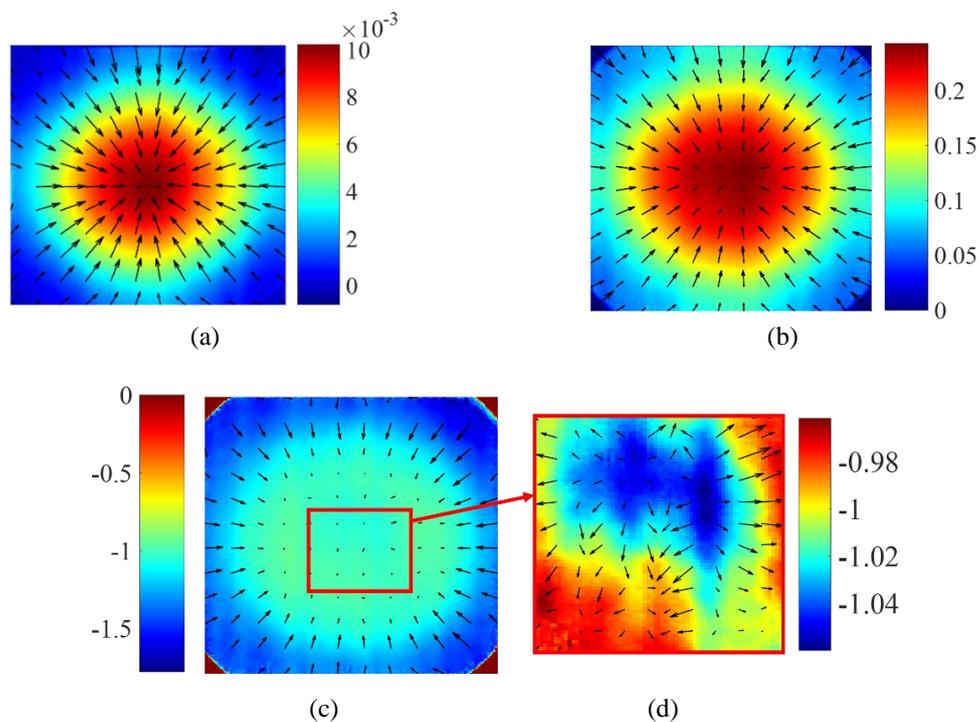


Fonte: autoria própria.

A primeira componente principal geralmente é a mais relevante porque tem o maior valor de variância e captura mais variabilidade de dados. As componentes principais consecutivas têm menos relevância. Por isso, nessas situações, é comum notar R^2 menor em relação à primeira componente. Assim, o R^2 calculado é mais próximo de 0 para as células defeituosas e às vezes até negativo por causa dos padrões aleatórios e distintos de uma geometria circular causada pela existência de defeitos – Figura 63 (e) e (f). Embora as imagens de fase sejam melhores para caracterizar visualmente os defeitos nas células FV, por causa do método gaussiano 2D elas apresentam valores de R^2 incoerentes para os casos isentos de defeitos, o que leva à identificação incorreta das células. O mesmo é notado para as imagens da segunda e terceira componentes.

Os gráficos de gradiente na Figura 64 reforçam que as imagens de primeira componente principal (PCA) e magnitude (FFT), (a) e (b) respectivamente, exibem um claro comportamento de distribuição gaussiana, com valores aumentando em direção ao centro e diminuindo em direção às bordas da célula FV. No entanto, o comportamento observado na imagem de fase não é tão simples. Essa diferença de comportamento suporta a explicação dos resultados insuficientes obtidos ao usar as imagens de fase de células saudáveis.

Figura 64 – Gráficos do gradiente nas imagens da célula saudável 02: (a) primeira componente principal, (b) magnitude – FFT, (c) fase e (d) detalhamento da fase



Fonte: autoria própria.

Os resultados de um segundo conjunto de testes de LIT são mostrados na Tabela 9 e na Tabela 8, ver Apêndice A, em que foram consideradas diferentes frequências de sinal de entrada para uma combinação fixa de amplitude e valores de deslocamento dentro da faixa de operação de polarização direta das células. As baixas frequências escolhidas são adequadas para os testes de LIT para produzir perfis de aquecimento senoidais na superfície da célula viáveis para aplicar as técnicas de processamento de imagem. Frequências mais altas não são adequadas nessas situações devido à baixa inércia térmica das células. Assim, foi possível avaliar o impacto das variações de frequência nas imagens formadas e, conseqüentemente, no R^2 comparando-as com um modelo gaussiano 2D.

O R^2 para as imagens de magnitude e primeira componente na Tabela 9 (ver Apêndice A) mostra que mesmo com a variação de frequência elas permaneceram próximas de 1 (entre 0,904 e 0,973 no caso da magnitude FFT; entre 0,948 e 0,977 no caso da 1ª componente principal) e isso é completamente plausível, pois está relacionado a uma célula saudável. Para a célula defeituosa 01, na Tabela 10, todos os valores de R^2 ficaram próximos ou bem abaixo de 0 em uma faixa entre - 32,620 e 0,040.

A variabilidade observada nas imagens de fase e componentes após a aplicação de diferentes combinações de valores de amplitude e deslocamento dentro da faixa de operação de polarização direta das células em uma frequência de entrada fixa foi muito pequena. Portanto, o R^2 calculado não apresentou mudanças significativas de uma combinação para outra e assumiu os valores esperados.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho é proposta uma metodologia baseada em ensaios não destrutivos de termografia ativa modulada aplicada a células fotovoltaicas. Algumas técnicas tradicionais de processamento digital de imagens, de análise em frequência, deslocamento de fase e variância foram utilizadas como ferramentas para tratativa das imagens térmicas. Os ensaios de DLIT realizados com as células fotovoltaicas associados ao processamento de imagens térmicas obteve êxito na tarefa de detectar e caracterizar os defeitos das células fotovoltaicas. A partir das imagens das componentes principais e imagens de fase e amplitude das células fotovoltaicas com múltiplas falhas utilizadas neste estudo, foi possível distinguir regiões defeituosas daquelas saudáveis com uma caracterização satisfatória dos defeitos. Além disso, o sistema integrado de classificação em cascata baseado na distribuição gaussiana bidimensional associado ao método proposto também obteve sucesso na sua aplicação. Este último, através de rotinas simples e computacionalmente eficazes possibilitou a verificação da presença de defeitos nas células de forma objetiva.

É possível concluir que a nova metodologia proposta apresenta resultados bastante promissores e eficazes, mesmo se comparada com os resultados de outras metodologias convencionais na literatura, como a que utiliza PWM. Aliado a isso, foi comprovado o grau de reprodutibilidade dos ensaios com um desvio padrão máximo de apenas 5% para a célula saudável avaliada e 17% para a célula defeituosa entre as medições. Assim, pode-se constatar que o procedimento experimental proposto fornece evidências de que pode ser usado de modo confiável como ferramenta de avaliação do estado operacional da célula fotovoltaica.

Ressalta-se que as imagens de fase exibiram diferenças de contraste mais relevantes para as diferentes frequências adotadas se comparadas às imagens de módulo, em especial as imagens de fase para 50 mHz e 100 mHz. Nas imagens da primeira componente principal mostrou-se comum a sobreposição das fontes de calor mais fracas pelas mais fortes, atrapalhando a interpretação dos resultados. Entretanto, este fenômeno

pode ser entendido como uma importante vantagem deste trabalho devido à redução da análise de um conjunto relativamente grande de imagens termográficas a um conjunto restrito e mais compacto de componentes principais ou de imagens de fase e módulo. Esse conjunto compacto de imagens resguarda a informação de defeitos de forma clara, confiável e de fácil e rápida interpretação com base na análise das cores primárias aditivas RGB e no entendimento físico dos processos de transferência de calor.

Os valores de R^2 para uma célula saudável obtidos para as imagens de magnitude e primeira componente principal mostraram que mesmo com a variação de frequência, o valor permanece próximo de 1 (entre 0,904 e 0,973 no caso da magnitude – FFT; entre 0,948 e 0,977 no caso da 1ª componente principal). Para uma das células defeituosas do estudo, todos os valores de R^2 ficaram próximos de 0 ou muito menores, geralmente entre - 32,620 e 0,040. Com relação às imagens de fase, concluiu-se que estas nem sempre exibem o comportamento gaussiano esperado adequado ao método de classificação.

Trabalhos futuros podem ser realizados como continuação desta abordagem considerando o uso de outras técnicas de processamento de imagem que se mostrem potenciais para a visualização dos defeitos e comparáveis às imagens obtidas neste estudo, a exemplo das redes neurais artificiais. Além disso, a replicação do método proposto para uma base de dados mais ampla e utilizando células fotovoltaicas de outros materiais (policristalino ou silício amorfo, por exemplo), com ou sem encapsulamento e apresentando defeitos de naturezas distintas, pode indicar uma possível aplicação da DLIT no processo de controle de qualidade de fabricação dessas células para trabalhos futuros. Outra vertente de continuidade em vista é a análise do comportamento da metodologia proposta para células fotovoltaicas cujos terminais de emissor e base são dispostos em lados opostos da célula e verificar o impacto da utilização dos dados brutos dos vídeos radiométricos comparativamente às matrizes de temperatura. Ademais, pretende-se que, futuramente, a metodologia desenvolvida seja aplicada em testes com módulos fotovoltaicos sem a utilização de câmara escura, o que ampliaria as possibilidades de sua aplicação, principalmente a sistemas fotovoltaicos instalados.

REFERÊNCIAS

1. Solomon, A. A. (2019). **Large scale photovoltaics and the future energy system requirement**. AIMS Energy, 7(5), 600-618.
2. Solar Power Europe. **Global market outlook for solar power 2021-2025**. (2021). Available in: < https://www.infobuildenergia.it/wp-content/uploads/2020/06/SolarPower-Europe_Global-Market-Outlook-forSolar-2021-2025_V3.pdf>. Acesso em: 08 de julho de 2022.
3. Almeida, E. C. V. (2021). **Potentiality of Photovoltaic Energy in the Northeastern Semiarid Region and its Relationship with Sustainable Development**. 83f. Masters dissertation (PPGDR) - State University of Paraíba.
4. Dias, P. R. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares)**. (2015). Dissertação (Mestre em Engenharia) – Engenharia de Minas, metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
5. Pinho, J., Galdino, M. (2014) **Engineering Manual for Photovoltaic Systems**. CEPEL – CRESESB.
6. Olarte, J., Dauvergne, J.L., Herrán, A., Drewett, N.E., Bekaert, E., Zulueta, E., Ferret, R. (2019). **Validation of thermal imaging as a tool for failure mode detection development**. AIMS Energy, 7(5), 646-659.
7. Ciampa, F. et al. (2018) **Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components**. Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 2, p. 609.
8. Shrestha, R., Kim, W. (2017) **Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography – Part I: Simulation**. Infrared Physics Technology, 83, 124–131.
9. Teubner, J., Kruse, I., Scheuerpflug, H., Lutz, C.B., Hauch, J., Camus, C., Brabe, C.J. (2017) **Comparison of Drone-based IR-imaging with Module Resolved Monitoring Power Data**. Energy Procedia, v.124, p.560-566.
10. Breintenstein, O., Langenkamp, M. (2010) **Lock-in Thermography - Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials**. Berlin, Springer.
11. Ibarra-Castanedo, C., Tarpani, J., Maldague, X. (2013) **Nondestructive testing with thermography**. European Journal of Physics. 34.

12. Shrestha, R., Park, J., Kim, W. (2016) **Application of Thermal Wave Imaging and Phase Shifting Method for Defect Detection in Stainless Steel**. *Infrared Physics & Technology* 76 (maio): 676–83. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.04.033>.
13. Da Silva, W. F., Melo, R. A. C., Grosso, M., Pereira, G. R. e Riffel, D. B. (2020) **Active Thermography Data-Processing Algorithm for Nondestructive Testing of Materials**. *IEEE Access*, v. 8, p. 175054-175062. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025329>.
14. Rösch, R., Tanenbaum, D.M., Jorgensen, M., Seeland, M., Bärenklau, M., Hermenau, M., et al. (2012) **Investigation of the degradation mechanisms of a variety of organic photovoltaic devices by combination of imaging techniques - The ISOS-3 inter-laboratory collaboration**. *Energy Environ Sci.*;5(4):6521–40.
15. Pletzer, T.M., van Mülken, J.I., Reißland, S., Breitenstein, O., Knoch, J. (2015) **Influence of cracks on the local current-voltage parameters of silicon solar cells**. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [Internet]. Apr;23(4):428–36. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/pip.2443>
16. Hoppe, H., Bachmann, J., Muhsin, B., Drüe, K.H., Riedel, I., Gobsch, G., et al. (2010) **Quality control of polymer solar modules by lock-in thermography**. *J Appl Phys.*;107(1).
17. Breitenstein, O., Bauer, J., Bothe, K., Hinken, D., Müller, J., Kwapil, W., et al. (2011) **Can luminescence imaging replace lock-in thermography on solar cells?** *IEEE J Photovolt.*;1(2):159–67.
18. Breitenstein, O., Rakotoniaina, J.P., al Rifai, M.H. (2003) **Quantitative Evaluation of Shunts in Solar Cells by Lock-In Thermography**. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Dec;11(8):515–26.
19. Peloso, M.P., Meng, L., Bhatia, C.S. (2015) **Combined thermography and luminescence imaging to characterize the spatial performance of multicrystalline si wafer solar cells**. *IEEE J Photovolt*. 2015 Jan 1;5(1):102–11.
20. Hepp, J., Machui, F., Egelhaaf, H.J., Brabec, C.J., Vetter, A. (2016) **Automatized analysis of IR-images of photovoltaic modules and its use for quality control of solar cells**. *Energy Sci Eng*. Nov 1;4(6):363–71.
21. Asadpour, R., Sulas-Kern, D.B., Johnston, S., Meydbray, J., Alam, M.A. (2020) **Dark lock-in thermography identifies solder bond failure as the root cause of series resistance increase in fielded solar modules**. *IEEE J Photovolt*. 2020 Sep 1;10(5):1409–16.
22. NREL. **Lock-in Thermography Imaging Workstation**. (2012). [Online]. Available: http://www.nrel.gov/pv/pdil/samc_thermography.html

23. Breitenstein, O. (2013) **Illuminated versus dark lock-in thermography investigations of solar cells**. *Int. J. Nanoparticles*. vol. 6. no. 2/3. pp. 81–92.
24. Breitenstein, O., Sturm, S. (2019) **Lock-in thermography for analyzing solar cells and failure analysis in other electronic components**. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 16: 1-15.
<https://doi.org/10.1080/17686733.2018.1563349>
25. Dahlberg, P., Ziegeler, N.J., Nolte, P.W., et al. (2022) **Design and construction of an LED-Based excitation source for lock-in thermography**. *Appl Sci* 12: 2940.
<https://doi.org/10.3390/app12062940>
<https://doi.org/10.3390/app12062940>
26. He, Y., Du, B., Huang, S. (2018). **Noncontact electromagnetic induction excited infrared thermography for photovoltaic cells and modules inspection**. *IEEE transactions on industrial informatics* 14: 5585-5593.
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2822272>
27. Halwachs, M. (2014) **Development of a dark lock-in thermography (DLIT) system and its application for characterizing thin film and crystalline photovoltaic generators** Tese de doutorado.
<https://doi.org/10.34726/hss.2014.24877>
28. Vieira, T.M., Santana, E.C., Souza, L.F.S., Silva, R.O., Ferreira, T. V., Riffel, D.B. (2023) **A novel experimental procedure for lock-in thermography on solar cells**[J]. *AIMS Energy*. 11(3): 503-521. doi: 10.3934/energy.2023026.
29. Sampaio, P. G. V., González, M. O. A. (2017) **Photovoltaic solar energy: conceptual framework**. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 74, p. 590-601. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117303076?via%3Dihub>. Acesso em: 29 abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
30. Parida, Bhubaneswari & Iniyar, S. & Goic, Ranko, (2011). **A review of solar photovoltaic technologies**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 15(3), pages 1625-1636.
<https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v15y2011i3p1625-1636.html>.
31. A. Zahedi. (2006) **Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems**. *Renewable Energy*. Volume 31. Issue 5. Pages 711-718, ISSN 0960-1481.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.007>.
32. Mekhilef, S. & Saidur, R. & Safari, A. (2011). **A review on solar energy use in industries**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 15(4), pages 1777-1790, May.

33. Miles., R.W. (2006) **Photovoltaic solar cells: Choice of materials and production methods**. Vacuum. Volume 80. Issue 10. Pages 1090-1097. ISSN 0042-207X, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2006.01.006>.
34. Miles., R.W., Hynes, K.M., Forbes, I. **Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues**. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**. (2005) Volume 51. Issues 1–3. Pages 1–42. ISSN 0960-8974. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2005.10.002>.
35. Pasin, D. G. (2019). **Resposta espectral e caracterização elétrica de célula solar de tripla junção**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação do INPE em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
36. Goetzberger, A. & Hebling, C. & Schock, Hans-Werner. (2003). **Photovoltaic Materials, History, Status and Outlook**. Materials Science and Engineering: R: Reports. 40. 1-46. 10.1016/S0927-796X(02)00092-X. 3
37. Vasconcelos, P. G. (2015) **Prospecção tecnológica de células fotovoltaicas para energia solar**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
38. Khalil, I.U., Ul Haq, Azhar & Mahmoud, Yousef & Jala, Marium & Aamir, Muhammad & Ahsan, Matiullah & Mahmood, Khalid. (2020). **Comparative Analysis of Photovoltaic Faults and Performance Evaluation of its Detection Techniques**. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2970531.
39. Dagostin, C. S. (2021) **Estimativa da distribuição espectral da radiação solar para conversão fotovoltaica em Porto Alegre**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
40. L. Altoé e D. Oliveira Filho. (2012) **Termografia Infravermelha Aplicada à Inspeção de Edifícios**., Act. Tecn., vol. 7, nº 1, p. 55–59, dez.
41. Mendonça, L. V. (2005) **Artigo Termografia por Infravermelhos**. Engenharia & Vida, v. 16, p. 53–57.
42. Lizák, F.; Kolcun, M. (2008) **Improving Reliability and Decreasing Losses of Electrical System With Infrared Thermography**. Acta Electrotechnica et Informatica, v. 8, n. 1, p. 60–63.
43. Muniz, P. R. Mendes, M. A. (2019) **Termografia infravermelha aplicada à manutenção elétrica: dos fundamentos ao diagnóstico**. Vitória: Edifes. ISBN: 9788582634165.

44. Flir. **User's Manual Flir T4xx Series**. 2022.
45. Wiecek, B. **Review on thermal image processing for passive and active thermography**. (2005) Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference. Shanghai, China, September 1-4.
46. Perin, A. L. **Desenvolvimento de Equipamento para medição de Emissividade**. (2009) Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
47. Bergman, T. L. et al. (2011) **Fundamentals of heat and mass transfer**. [S.l.]: John Wiley & Sons.
48. Meola, C., Boccardi, S., Carlomagno, G. M. (2016) **Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials: Infrared Thermography to Composites**. [S.l.]: Woodhead Publishing.
49. Novo, M. M. M., Bitencourt, C. S., Tiba, P. R. T., Silva, D. G. M., & Pandolfelli, V. C. (2014). **Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade**. Cerâmica, 60(353), 22–33. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000100004>.
50. Park, K. J., Alonso, L. F. T., Nunes, A. S. (1999). **Determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de grãos em regime permanente**. Food Science and Technology, 19(2), 264–269. <https://doi.org/10.1590/S0101-20611999000200020>.
51. Grosso, M. **Análise de defeitos de corrosão em aços revestidos por materiais compósitos**. (2011) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica.
52. M. Abdelhamid, R. Singh and M. Omar. (2014) **Review of Microcrack Detection Techniques for Silicon Solar Cells**. IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 4, no. 1, pp. 514-524, doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2285622.
53. Chatterjee, K. Tuli, S. Pickering, S. G. Almond, D. P. (2011) **A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques**. NDT & E International. Volume 44. Issue 7. Pages 655-667. ISSN 0963-8695. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.06.008>.
54. Qingju, T., Xun, L., Wang, Y. (2012). **Research on the Quantitative Analysis of Subsurface Defects for Nondestructive Testing by Ultrasound Lock-In Thermography**. NDT & E International. 45. 104-110. [10.1016/j.ndteint.2011.09.002](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.09.002).
55. Gonzalez, R. C.; Wood, R. C. **Processamento Digital de Imagens**. 3ª. ed. Pearson, 2010.

56. Queiroz, J., Gomes, H. (2006) **Introdução ao Processamento Digital de Imagens**. RITA. 13. 11-42.
57. Land, E. H. (1983) **Recent Advances in Retinex Theory and some Implications for Cortical Computations: Color Vision and the Natural Image**. Proceedings of the National Academy of Sciences United States of America, v. 80, n. 16, p. 5163-5169.
58. Crowley, J. L., Christensen, H. I. (1995) **Vision as Process: Basic Research on Computer Vision Systems**. Berlin; New York: Springer-Verlag.
59. Otsu, N. **A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.
60. NTI Audio. **Transformação Rápida de Fourier FFT - Noções Básicas**. Disponível em: <https://www.nti-audio.com/pt/suporte/saber-como/transformacao-rapida-de-fourier-fft>. Acesso em: 30/07/2023.
61. Brigham, E. Oran. (1988) **The fast Fourier transform and its applications**. Rio de Janeiro - RJ: Prentice-Hall do Brasil. 463 p. ISBN 0-13-307505-2.
62. Strang, G. (1994) **Wavelets**. American Scientist, v. 82, n. 3, p. 250-255, JSTOR.
63. Macedo, M. S. (2022) **Classificação da Hidrofobicidade em Isoladores Elétricos Utilizando Análise de Frequência e RNA**. Dissertação. UFS. São Cristóvão.
64. Busse, G., D. Wu., W. Karpen, (1992) **Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography**. Journal of Applied Physics, Vol. 71, No. 8, 3962-3965. doi:10.1063/1.351366
65. Hongyu K, Sandanielo VLM, Oliveira Junior GJ (2016) **Principal components analysis: theoretical summary, application and interpretation**. ES Eng Sci 5: 83–90. <https://doi.org/10.18607/ES201653398>
66. N. L. J. (1959). **Review of An Introduction to Multivariate Statistical Analysis; Some Aspects of Multivariate Analysis**, by T. W. Anderson & S. N. Roy. The Incorporated Statistician. Available from: <https://doi.org/10.2307/2986618>
67. Bo, C., Hu, H., Lei, G., Liu, Z., Shao, J. (2018) **Non-destructive Testing of Airfoil Based on Infrared Lock-in Thermography**. IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). Wuyishan. China. 2018. pp. 1623-1628. doi: 10.1109/ICInfA.2018.8812574.
68. Condon, J. J. (1997). **Errors in Elliptical Gaussian Fits**. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 109(732), 166.

69. Hu, Y. (2013) **High-Resolution Lock-in Thermography Investigation on Industrial Multicrystalline Silicon Solar Cells**. IEEE Journal of Photovoltaics. vol. 3. no. 3. pp. 952-956. doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2255733.
70. Breitenstein, O. (2013) **Illuminated versus dark lock-in thermography investigations of solar cells**. Int. J. Nanoparticles 6. <https://doi.org/10.1504/IJNP.2013.054983>.
71. Montanini, R. (2010) **Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography**. Infrared Physics & Technology. Volume 53. Issue 5. Pages 363-371. ISSN 1350-4495. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.07.002>.
72. Sedra, A. S., Smith, K. C. **Microelectronic Circuits**, 6th ed., Oxford, 2009.
73. Brazilian Association of Technical Standards (2021) **NBR—16969:2021, Non-destructive testing —Infrared Thermography—General Principles**. Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/detalhe_nbr.asp?assinc=1&nbr=13128.
74. Brazilian Association of Technical Standards (2013) **NBR - 15572:2013, Non-destructive testing —Thermography—Guide for inspection of electrical and mechanical equipment**. Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/detalhe_nbr.asp?assinc=1&nbr=27135.
75. International Electrotechnical Commission (2018). **IEC 62446-1-Photovoltaic (PV) systems—Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 1: Grid connected systems—Documentation, commissioning tests and inspection**. IEC, Geneva, Switzerland. Disponível em: https://www.gedweb.com.br/aplicacao/usuario/asp/detalhe_nie.asp?assinc=1&nie=106520.
76. International Electrotechnical Commission (2020). **IEC 62446-2-Photovoltaic (PV) systems—Requirements for testing, documentation and maintenance—Part 1: Grid connected systems—Maintenance of PV systems**. IEC, Geneva, Switzerland. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/27382>.
77. International Electrotechnical Commission (2017). **IEC TS 62446-3-Photovoltaic (PV) systems—Requirements for testing, documentation and maintenance-Part 3: Photovoltaic modules and plants—Outdoor infrared thermography**. IEC, Geneva, Switzerland. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/28628>.

APÊNDICE A – TABELAS

Tabela 8 – Coeficiente de determinação R^2 para células fotovoltaicas saudáveis e defeituosas excitadas por sinais modulados com a mesma configuração dos parâmetros amplitude, nível de *offset* e frequência de modulação.

ID da célula FV	Saudável 01	Saudável 02	Saudável 03	Defeituosa 01	Defeituosa 02
Frequência [Hz]	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Amplitude do sinal [V]	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
Nível de offset do sinal [V]	1,650	1,650	1,650	1,650	1,650
Valor máximo da corrente na célula [A]	2,900	2,960	2,870	3,360	3,170
FFT (Magnitude)	0,987	0,983	0,966	-6,184	-2,180
FFT (Fase)	0,714	-26,945	-56,657	-0,880	-2,828
R^2 PCA (1ª Componente)	0,985	0,988	0,978	-4,937	-1,774
PCA (2ª Componente)	-0,240	0,051	-0,111	-0,126	-0,275
PCA (3ª Componente)	0,133	0,192	-0,003	-0,026	-0,140

Fonte: autoria própria.

Tabela 9 – Coeficiente de determinação R^2 para a célula saudável 03 excitada por sinais de mesma amplitude e nível de *offset*, porém diferentes frequências de modulação.

ID da célula FV	Saudável 03	Saudável 03	Saudável 03	Saudável 03	
Frequência [Hz]	0,011	0,025	0,050	0,075	
Amplitude do sinal [V]	0,750	0,750	0,750	0,750	
Nível de offset do sinal [V]	1,300	1,300	1,300	1,300	
Valor máximo da corrente na célula [A]	2,800	2,740	2,790	2,720	
R^2	FFT (Magnitude)	0,904	0,961	0,973	0,966
	FFT (Fase)	0,463	-7,232	-7,738	-1,572
	PCA (1ª Componente)	0,948	0,977	0,974	0,971
	PCA (2ª Componente)	-0,028	-0,093	-0,223	-0,304
	PCA (3ª Componente)	-0,036	-0,002	0,000	-0,022

Fonte: autoria própria.

Tabela 10 – Coeficiente de determinação R^2 para a célula defeituosa 01 excitada por sinais de mesma amplitude e nível de *offset*, porém diferentes frequências de modulação.

ID da célula FV	Defeituosa 01	Defeituosa 01	Defeituosa 01	Defeituosa 01	Defeituosa 01	Defeituosa 01	
Frequência [Hz]	0,006	0,011	0,025	0,050	0,075	0,100	
Amplitude do sinal [V]	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	
Nível de offset do sinal [V]	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300	
Valor máximo da corrente na célula [A]	2,810	3,000	3,140	2,900	3,090	2,986	
R^2	FFT (Magnitude)	-32,620	-12,898	-10,043	-4,461	-4,802	-6,849
	FFT (Fase)	-31,519	0,006	-0,507	-22,126	-2,912	-7,179
	PCA (1ª Componente)	-24,679	-9,509	-7,823	-4,550	-3,811	0,000
	PCA (2ª Componente)	-0,016	-0,039	-0,098	-0,133	-0,135	-0,209
	PCA (3ª Componente)	-0,010	0,000	-0,027	0,000	0,040	-3,637

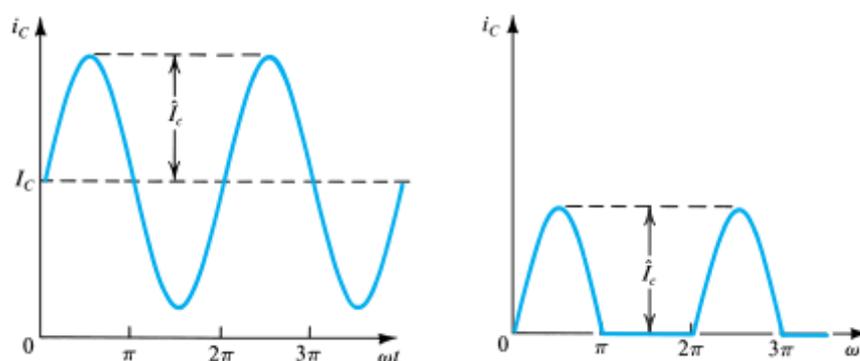
Fonte: autoria própria.

APÊNDICE B – CIRCUITO *BUFFER PUSH-PULL*

Com o intuito de compatibilizar o sinal gerado na saída do gerador de função disponível em laboratório com os parâmetros elétricos das células FV, fez-se necessária a busca por um circuito eletrônico que auxiliasse na amplificação da potência do sinal. Nesse sentido, foi realizado um estudo dos estágios de saída classe A e classe B, frequentemente utilizados em amplificadores de áudio para ganho de corrente.

A classificação dos estágios de saída se dá de acordo com a forma de onda da corrente de coletor dos transistores quando um sinal de entrada é aplicado. Abaixo, a Figura 65 mostra a forma de onda característica dos estágios de classe A e classe B, gráficos à esquerda e à direita, respectivamente.

Figura 65 – Forma de onda da corrente de coletor nos estágios de saída classe A e B.



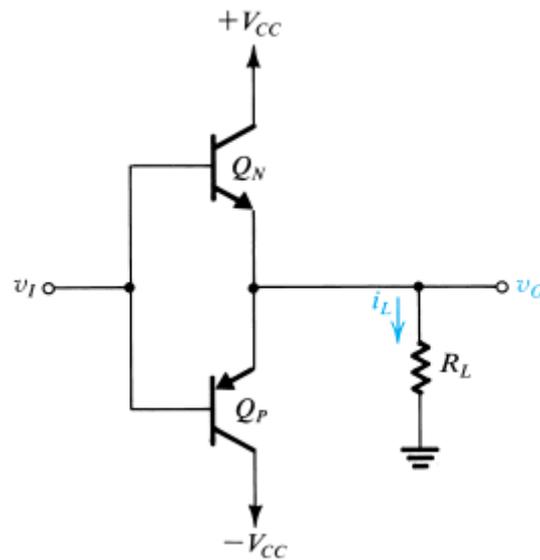
Fonte: [72].

Nota-se que, no circuito classe A o transistor conduz todo o ciclo de corrente de saída i_c . No circuito classe B, um transistor conduz apenas um semiciclo da corrente i_c . Neste último caso, são utilizados dois transistores complementares, um NPN e um PNP, para condução dos semiciclos positivo e negativo do sinal de saída, como ilustrado no circuito da Figura 66.

Quando a tensão de entrada v_i é zero, ambos os transistores ficam cortados e a tensão de saída v_o é nula. Quando a tensão de entrada supera $0,5$ V, o transistor Q_N conduz

e opera como um seguidor de emissor e a tensão de saída é dada por $v_o = v_i - v_{BEN}$, em que v_{BEN} é a tensão base-emissor. Enquanto isso, devido à polarização reversa da junção emissor-base, o transistor Q_P fica cortado. Como o circuito tem simetria, o funcionamento é semelhante quando a entrada supera negativamente 0,5 V: a tensão de saída será dada por $v_o = v_i + v_{BEP}$, com Q_P conduzindo e Q_N cortado. R_L representa a carga do circuito.

Figura 66 – Estágios de saída classe B.

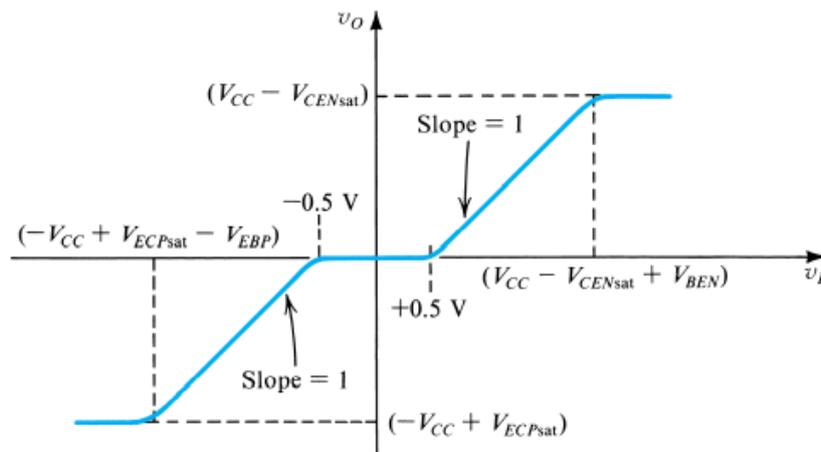


Fonte: [72]

Nota-se que os transistores do circuito classe B são polarizados com corrente nula, conduzindo apenas quando há excitação na entrada. Este circuito é conhecido como “*buffer push-pull*” tendo em vista que, em circuitos de áudio, o transistor Q_N é responsável por “empurrar” o ímã da caixa de som, enquanto o transistor Q_P é responsável por “puxá-lo”.

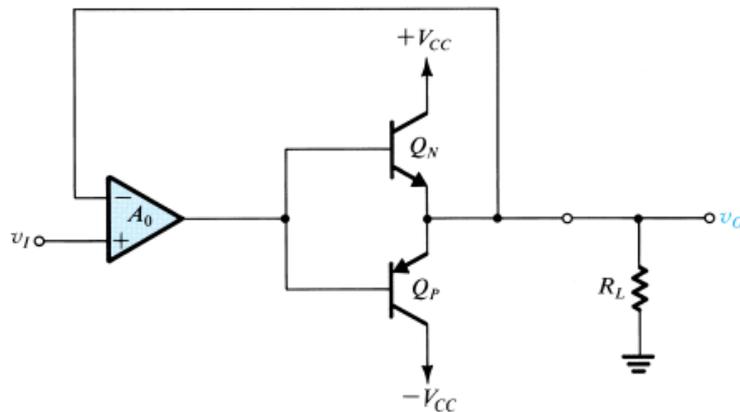
Na Figura 67, tem-se apresentada a característica de transferência do circuito classe B. Devido à necessidade de superar a tensão de $\pm 0,5$ V para condução em algum dos transistores, a tensão de saída é nula para entradas nessa faixa (distorção de *crossover*). Para sinais de amplitude relativamente baixa, o efeito dessa distorção fica muito perceptível. No entanto, essa distorção pode ser reduzida utilizando um amplificador operacional com realimentação negativa (vide Figura 68).

Figura 67 – Característica de transferência do estágio de saída classe B.



Fonte: [72].

Figura 68 – Circuito classe B com amplificador operacional para redução de distorção de *crossover*.



Fonte: [72].

Para circuitos em alta frequência, a solução apresentada traz uma limitação devido ao fenômeno *slew-rate* do amplificador operacional. Quando a frequência do sinal de entrada é muito baixa, essas limitações não se aplicam, e a faixa de distorção de crossover muda de $\pm 0,7$ V para $\pm 0,7/A_0$ V, onde A_0 é o ganho do amplificador operacional.