



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

Técnica para redução do tempo de ensaios de termografia ativa modulada em células fotovoltaicas

Dissertação de Mestrado

Renan Oliveira Silva

São Cristóvão, SE – Brasil

Agosto de 2024

Renan Oliveira Silva

Técnica para redução do tempo de ensaios de termografia ativa modulada em células fotovoltaicas

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

Orientador: Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel

São Cristóvão, SE – Brasil

Agosto de 2024



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

“Técnica para redução do tempo de ensaios de termografia ativa modulada em células fotovoltaicas”

Discente:

Renan Oliveira Silva

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. Edson Barbosa Lisboa (IFS)
Examinador Externo


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


Renan Oliveira Silva
Discente

Cidade Universitária “Prof. José Aloísio de Campos”, 21 de agosto de 2024.

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

Silva, Renan Oliveira
S586t Técnica para a redução do tempo de ensaios de termografia ativa modulada em células fotovoltaicas / Renan Oliveira Silva ; orientador Douglas Bressan Riffel. – São Cristóvão, 2024.
87 f.; il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Sergipe, 2024.

1. Engenharia elétrica. 2. Fourier, Transformada de. 3. Baterias elétricas. I. Riffel, Douglas Bessan orient. II. Título.

CDU 621.3

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, pelo dom da vida e por me dar forças diariamente para seguir em frente nesta jornada. À minha família, em especial à minha mãe Maria e meu pai Renato (*in memoriam*), pelo amor incondicional e por toda dedicação em todos os passos da minha vida. Também agradeço a todo o esforço que eles e meus tios e tias fizeram para me fornecer uma educação de qualidade.

À minha esposa, Tais, por tudo que faz por mim diariamente, seu companheirismo, atenção, compreensão e carinho, sempre me incentivando para seguir em frente. Muito desse trabalho se deve ao esforço que você fez para eu conseguir chegar até aqui. Também agradeço ao meu filho, Otto, por ser minha fonte de alegria e inspiração para voos mais altos.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Douglas Bressan, por me acolher nessa jornada, pelos ensinamentos passados, pela compreensão durante este período e pela atenção, sempre fornecendo o que fosse necessário e me incentivando. Agradeço também aos outros professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica que tive contato e agregaram na minha formação.

Aos meus amigos do Budega, que desde os tempos da graduação são uma fonte de companheirismo e suporte, em especial à Filipe e Lucas, que também ajudaram durante a passagem no mestrado, seja nos estudos ou nas conversas sobre o trabalho. Agradeço também aos colegas do LABENGE, em especial ao Thiago, Ézio, Neto e Luiz, pela parceria ao longo desses anos, sendo fundamentais para este trabalho. Aos colegas de trabalho da COELN - IFS, por todo o incentivo e compreensão para que eu desse este passo na minha formação. E para meus amigos-irmãos, Felipe e Henrique, sempre presentes comigo mesmo com toda a distância, por toda a amizade e conversas ao longo de todos esses anos.

*“O caminho de cada um já está determinado pelos céus
e, por isso mesmo, você é completamente livre
contanto que a sua alma se abra para os céus.
(Monge Takuan)*

Resumo

A termografia ativa modulada (*LIT*) é uma técnica utilizada em ensaios não destrutivos visando a caracterização de defeitos em diversos materiais, entre eles, componentes eletrônicos e células fotovoltaicas. Nesse tipo de termografia, os ensaios são realizados utilizando um sinal periódico que aquece o material por um longo período de tempo, pois a análise é feita quando o material atinge um regime permanente de temperatura. O presente trabalho é proposto um método para redução do tempo de ensaio, baseando-se no transiente térmico de temperatura gerado no aquecimento de células fotovoltaicas para estimar as informações térmicas do material no regime permanente. Dessa forma, após realizado o processamento dos dados, é possível obter imagens que representam o comportamento interno do material semelhantes às obtidas quando feitas no método clássico. No desenvolvimento do método, foram feitas análises do comportamento das células durante o transiente térmico dos ensaios, comparando as imagens geradas nesses períodos de tempo com a imagem de referência obtida no regime permanente, utilizando métricas de similaridade. Além disso, foram variados os parâmetros dos ensaios e técnicas de pré-processamento em busca de um maior entendimento sobre o fenômeno. A utilização do método proposto permitiu a obtenção de imagens que representam bem as características das células estudadas, assim como semelhantes às obtidas utilizando o método clássico, reduzindo o tempo de ensaio em aproximadamente 80%.

Palavras-chave: termografia ativa modulada, transformada rápida de Fourier, índice de similaridade, transiente térmico.

Abstract

Lock-in Thermography is a technique used in non-destructive testing to characterize defects in various materials, including electronic components and photovoltaic cells. In this type of thermography, tests are performed using a periodic signal that heats the photovoltaic cells for a long period of time, since the analysis is performed when the material reaches a steady state temperature. This work proposes a method to reduce test time, based on the thermal transient of temperature generated during heating to estimate the thermal information of the material in steady state. Thus, after data processing, it is possible to obtain images that represent the internal behavior of the material similar to those obtained using the classical method. In developing the method, analyses of the behavior of the cells during the thermal transient of the tests were performed, comparing the images generated during these periods of time with the reference image obtained in steady state, using similarity metrics. In addition, test parameters and preprocessing techniques were varied in search of a better understanding of the phenomenon. The use of the proposed method allowed obtaining images that represent the characteristics of the cells studied, as well as similar to those obtained using the classical method, reducing the test time by approximately 80%.

Keywords: Lock-in thermography, thermal transient, fast Fourier transform, similarity index.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Evolução da utilização da fonte solar fotovoltaica no Brasil.	1
Figura 3.1 – Modelo simples do funcionamento da célula fotovoltaica	11
Figura 3.2 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica utilizando um modelo de diodo único	11
Figura 3.3 – Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica, com a indicação dos parâmetros principais de análise	12
Figura 3.4 – Exemplo de imagem de um ensaio de eletroluminescência	13
Figura 3.5 – Representação do espectro eletromagnético, destacando a região do infravermelho	14
Figura 3.6 – Representação do procedimento de termografia ativa modulada, para obtenção das imagens que representam a técnica	16
Figura 3.7 – Representação do aquecimento de um material em um ensaio por termografia ativa modulada	18
Figura 3.8 – Representação do espectro eletromagnético, destacando a região de luz visível	19
Figura 3.9 – Representação de uma imagem digital utilizando uma grade retangular $M \times N$	20
Figura 3.10 – Exemplos de resultados após o processamento utilizando filtros espaciais. Em (b), a densidade de pixel do ruído adicionado é de 0,05; em (c) a janela da máscara é tamanho 5; o valor da variância para o filtro Gaussiano é de 5.	21
Figura 4.1 – Diagrama de blocos com o método utilizado para desenvolver o trabalho	28
Figura 4.2 – Representação de um esquemático do arranjo experimental definido para os ensaios de termografia ativa modulada	29
Figura 4.3 – Célula fotovoltaica da <i>SunPower</i> , modelo C60 (frente e verso), com suas seis interconexões na parte traseira (três superiores e três inferiores).	30
Figura 4.4 – Câmara escura utilizada para os ensaios <i>DLIT</i>	30
Figura 4.5 – Câmara escura sendo ajustada para realização dos ensaios nas células fotovoltaicas.	31
Figura 4.6 – Suporte desenvolvido para fixação da câmera, buscando padronizar os ensaios.	31
Figura 4.7 – Ilustração da placa de circuito impresso produzida para o circuito amplificador de potência. Vista inferior (a) e vista superior (com os componentes soldados e conexões) (b).	32

Figura 4.8 – Circuito <i>buffer push-pull</i> utilizado nos ensaios. A diferença entre as ondas em (b) ocorreu devido ao ajuste no osciloscópio para poder visualizá-las ao mesmo tempo.	33
Figura 4.9 – Imagens das células utilizadas nos experimentos, sendo elas visíveis em (a), (b) e (c) e por eletroluminescência em (c), (d) e (e)	34
Figura 4.10–Gráfico representando o sinal de excitação da célula em relação a curva I-V. O sinal possui uma tensão de pico a pico V_c (duas vezes o valor de amplitude) e a frequência definida pelo ensaio.	35
Figura 4.11–Medições dos sinais de tensão (em amarelo) e corrente (em verde) em uma célula fotovoltaica de acordo com seu sinal excitação. Em (a), excitação na região da curva quase linear, em (b), na região não linear.	35
Figura 4.12–Gráfico com os valores de temperatura de um ponto (<i>pixel</i>) ao longo dos termogramas.	36
Figura 4.13–Interface para controle da câmera termográfica através do computador	37
Figura 4.14–Segmentação da área da célula utilizando método do limiar de Otsu. (a) Imagem em tons de cinza dos dados radiométricos do ensaio, (b) Máscara para segmentação da célula.	39
Figura 4.15–Exemplo de imagens geradas após o final do processamento com a técnica da <i>FFT</i>	40
Figura 5.1 – Imagens de eletroluminescência das células defeituosas.	46
Figura 5.2 – Imagens de amplitude (a, b e c) e fase (d, e, f) obtidas para a célula saudável, em regime permanente e para as frequências em estudo.	48
Figura 5.3 – Imagens de amplitude (a, b e c) e fase (d, e, f) obtidas para a célula 02 (defeituosa), em regime permanente e para as frequências em estudo.	48
Figura 5.4 – Imagens de amplitude (a, b e c) e fase (d, e, f) obtidas para a célula 03 (defeituosa), em regime permanente e para as frequências em estudo.	49
Figura 5.5 – Representação do problema encontrado de saturação das imagens de fase dos ensaios <i>DLIT</i> e sua resolução.	50
Figura 5.6 – Imagem de um sinal térmico modulado obtido de uma célula indicando região onde houve perda de quadros.	51
Figura 5.7 – Imagens de amplitude (a - d) e fase (e - h) da célula saudável em um ensaio de 11 mHz, em períodos do regime permanente.	52
Figura 5.8 – Gráfico com os valores dos índices de similaridade para cada período do vídeo na frequência de 11 mHz da célula 01, utilizando imagens sem suavização.	53
Figura 5.9 – Representação das imagens de fase com menor similaridade obtidas nos ensaios 02 e 05 da célula 01, 11 mHz.	54

Figura 5.10–Gráfico com os valores dos índices de similaridade para cada período do vídeo na frequência de 11 mHz da célula 01, utilizando as imagens com e sem suavização.	55
Figura 5.11–Ilustração das imagens de amplitude obtidas no ensaio 02, 25° período, destacando um ruído existente e os resultados processados.	55
Figura 5.12–Gráfico com os valores dos índices de similaridade para cada período do vídeo na frequência de 50 mHz da célula 01, analisando as imagens de amplitude e fase com filtro gaussiano.	56
Figura 5.13–Gráfico com os valores dos índices de similaridade para cada período do vídeo na frequência de 100 mHz da célula 01 (Ensaio 01), analisando as imagens de fase com filtro gaussiano.	57
Figura 5.14–Representação de imagens de fase da célula 02 (100 mHz), mostrando as diferenças encontradas nos vários períodos e que ocasionam a diminuição dos índices.	59
Figura 5.15–Representação de imagens de fase da célula 3 (100 mHz), mostrando as diferenças encontradas nos vários períodos e que ocasionam a diminuição dos índices.	60
Figura 5.16–Representação da evolução de um sinal térmico em um <i>pixel</i> da célula 1 - saudável. A forma em vermelho serve para indicar a região considerada de transiente.	61
Figura 5.17–Imagens de amplitude (a - d) e fase (e - h) da célula saudável em um ensaio de 11 mHz, em períodos do regime transiente.	61
Figura 5.18–Comparativo entre imagens de fase geradas utilizando uma quantidade maior de períodos com a imagem referência, utilizando o índice <i>SSIM</i> como métrica.	64
Figura 5.19–Imagens de fase da célula saudável em um ensaio de 100 mHz, em períodos do regime transiente, processadas utilizando um ou mais períodos do vídeo.	65
Figura 5.20–Espectro de amplitude obtidos após o processamento pela <i>FFT</i> para as imagens da célula saudável em um ensaio de 11 mHz, obtidas utilizando um ou mais períodos do vídeo.	65
Figura 5.21–Imagens de amplitude da célula saudável, na frequência de 11 mHz, à medida que foram adicionados períodos para seu processamento, adicionando ruídos.	66
Figura 5.22–Imagens de amplitude da célula 03 em um ensaio de 11 mHz, obtidas utilizando um ou mais períodos do vídeo, reduzindo o ruído à medida que se adicionam períodos para gerar a imagem.	66

Figura 5.23–Imagens sintetizadas de amplitude (a - c) e fase (d - f) das células, projetadas para o regime permanente. O número inicial da legenda de cada imagem se refere ao número da célula utilizado para gerar a imagem.	68
Figura 5.24–Espectro de amplitude de imagem sintetizada, da célula 03 obtida para a frequência de 100 mHz, indicando a contribuição apenas da frequência fundamental da equação utilizada no ajuste.	69
Figura 5.25–Ajuste dos dados térmicos dos ensaios à um modelo, no caso onde existe uma descontinuidade do sinal, gerando um ajuste menos preciso. Na tela de cima, comparativo entre os dados e o modelo ajustado. Na tela inferior, os resíduos do modelo.	70
Figura 5.26–Imagens sintetizadas de amplitude (a - b) e fase (c - d) da célula saudável.	71
Figura 5.27–Gráfico das médias dos índices <i>SSIM</i> para imagens de amplitude e fase, no regime transitório, permanente e sintetizadas, da célula 01. A letra do Sintetizada (A, B ou C) indica a quantidade de períodos, A (3, 15 ou 30 períodos), B (5, 22 ou 45 períodos) e C (7, 32 ou 64 períodos), a depender da frequência.	72
Figura 5.28–Imagens obtidas experimentalmente e sintetizadas de amplitude (a-b) e fase (c-d) da célula 02 - defeituosa, na frequência de 100 mHz do ensaio 04.	73
Figura 5.29–Gráfico das médias dos índices <i>SSIM</i> para imagens de amplitude e fase, no regime transitório, permanente e sintetizadas da célula 02. A letra do Sintetizada (A, B ou C) indica a quantidade de períodos, A (3, 15 ou 30 períodos), B (5, 22 ou 45 períodos) e C (7, 32 ou 64 períodos), a depender da frequência.	73
Figura 5.30–Imagens sintetizadas de amplitude (a - b) e fase (c - d) da célula 03 - defeituosa, na frequência de 100 mHz do ensaio 03.	74
Figura 5.31–Gráfico das médias dos índices <i>SSIM</i> para imagens de amplitude e fase, no regime transitório, permanente e sintetizadas da célula 03. A letra do Sintetizada (A, B ou C) indica a quantidade de períodos, A (3, 15 ou 30 períodos), B (5, 22 ou 45 períodos) e C (7, 32 ou 64 períodos), a depender da frequência.	75
Figura 5.32–Imagens sintetizadas de amplitude (a - d) e fase (e - h) da célula saudável em um ensaio de 11 mHz, em períodos do regime permanente.	76
Figura 5.33–Representação gráfica dos índices <i>SSIM</i> para imagens de amplitude e fase, indicando a média e o desvio padrão das imagens sintetizadas para a quantidade de dados (períodos) definida.	77
Figura 5.34–Imagens de amplitude (a - c) e fase (d - f) sintetizadas das três células, utilizando o método proposto para obter a imagem em um ensaio curto.	78

Figura 5.35–Diferença entre as imagens sintetizadas utilizando o método proposto, variando a quantidade de períodos utilizada na síntese. Para gerar as imagens (a - d), foi feito o uso de 30 períodos e em (e - h), feito o uso de 15 períodos, com os dados dos ensaios de 100 mHz. Na legenda de cada imagem está indicada de qual célula ela foi obtida. 80

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Materiais e componentes utilizados para o circuito de potência para excitação da célula.	33
Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados para investigar sua influência nas imagens geradas nos ensaios <i>DLIT</i>	42
Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados para ajuste das curvas utilizando a função <i>fit</i> . . .	43
Tabela 4.4 – Parâmetros utilizados para investigar sua influência nas imagens sintetizadas com dados provenientes do regime transitório dos ensaios <i>DLIT</i>	44
Tabela 5.1 – Informações sobre o banco de imagens em regime permanente geradas nos ensaios <i>DLIT</i> realizados.	47
Tabela 5.2 – Estatísticas do índice de similaridade <i>SSIM</i> e <i>MS-SSIM</i> nas imagens obtidas para a célula 01 (11, 50 e 100 mHz), após uso do filtro Gaussiano.	56
Tabela 5.3 – Estatísticas do índice de similaridade <i>SSIM</i> e <i>MS-SSIM</i> nas imagens obtidas para a célula 02 (11, 50 e 100 mHz), após uso do filtro Gaussiano.	58
Tabela 5.4 – Estatísticas do índice de similaridade <i>SSIM</i> e <i>MSSSIM</i> nas imagens obtidas para a célula 03 (11, 50 e 100 mHz), após uso do filtro Gaussiano.	59
Tabela 5.5 – Estatísticas do índice de similaridade <i>SSIM</i> e <i>MS-SSIM</i> nos regimes transitório e permanente para as frequências (11, 50 e 100 mHz) das células estudadas, após uso do filtro Gaussiano.	62
Tabela 5.6 – Comportamento da similaridade <i>SSIM</i> nos regimes transitório e permanente para as frequências (11, 50 e 100 mHz) das células estudadas, com relação ao acréscimo de períodos para obter as imagens.	64
Tabela 5.7 – Estatísticas do índice de similaridade <i>SSIM</i> nas imagens sintetizadas para a célula 01 (11, 50 e 100 mHz)	70
Tabela 5.8 – Estatísticas do índice de similaridade <i>SSIM</i> nas imagens sintetizadas para a célula 02 (11, 50 e 100 mHz)	72
Tabela 5.9 – Estatísticas do índice de similaridade <i>SSIM</i> nas imagens sintetizadas para a célula 03 (11, 50 e 100 mHz)	74
Tabela 5.10–Quantidade de quadros utilizadas para ajuste dos modelos de acordo com a quantidade de períodos.	75
Tabela 5.11–Estatísticas do índice de similaridade <i>SSIM</i> das imagens sintetizadas pelo método proposto em caso de vídeo reduzidos, comparando com a síntese que utiliza os primeiros períodos sem análise ("Normal", na tabela), para as frequências (11, 50 e 100 mHz) das células estudadas, após uso do filtro Gaussiano.	79

Lista de abreviaturas e siglas

4PMM	<i>Four Points Mean Method</i>
4SPSM	<i>Four Step Phase-Shifting Method</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	<i>Alternating Current</i>
CFRP	<i>Carbon-fiber Reinforced Polymer</i>
DC	<i>Direct current</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DI	<i>Dual Integration</i>
DLCM	<i>Digital Lock-in Correlation Method</i>
DLIT	<i>Dark Lock-in Thermography</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FR	<i>Full Reference</i>
FSIM	<i>Feature Similarity Indexing Method</i>
ILIT	<i>Illuminated Lock-in Thermography</i>
IQA	<i>Image Quality Analysis</i>
IR	<i>Infrared Radiation</i>
LIT	<i>Lock-in Thermography</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
MS-SSIM	<i>Multi-Scale Structural Similarity Index Measure</i>
NR	<i>No Reference</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PCT	<i>Principal Component Thermography</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>

PID	<i>Potential-induced Degradation</i>
PSNR	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
RR	<i>Reduced Reference</i>
SR	<i>Signal Reconstruction</i>
SSIM	<i>Structural Similarity Index Measure</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos específicos	3
1.2	Organização do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
3.1	Princípios de funcionamento da Célula Fotovoltaica	10
3.2	Termografia Infravermelha	13
3.2.1	Conceitos sobre irradiação infravermelha	14
3.2.2	Termografia Ativa Modulada	15
3.3	Processamento Digital de Imagens	18
3.3.1	Imagens digitais	18
3.3.2	Filtros Espaciais	20
3.3.3	Transformada Rápida de Fourier	22
3.4	Índices de Similaridade	23
3.4.1	<i>Multi-Scale Structured Similarity</i>	25
3.5	Ajuste de modelo para dados	25
4	METODOLOGIA	28
4.1	Arranjo dos ensaios termográficos	29
4.2	Ensaio realizados e análise dos parâmetros	33
4.2.1	Extração de dados dos vídeos termográficos	37
4.2.2	Aplicação da técnica de processamento dos dados - FFT	39
4.2.3	Técnicas e critérios para comparativo de imagens entre os períodos do vídeo	40
4.3	Estimação de imagens no estado estável através de dados obtidos no regime transiente	42
4.3.1	Pré-processamento dos dados utilizados	42
4.3.2	Ajuste de curvas com os dados selecionados	43
4.3.3	Técnicas e critérios para comparativo de imagens sintetizadas com as obtidas através dos ensaios	43
4.3.4	Método para obtenção de imagens sintetizadas com dados do transiente	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Imagens obtidas por termografia ativa modulada	46

5.1.1	Problemas encontrados na obtenção das imagens processadas	50
5.2	Comparativo de imagens entre períodos de um mesmo vídeo	51
5.2.1	Célula 01 - Saudável	53
5.2.2	Célula 02 - Defeituosa	57
5.2.3	Célula 03 - Defeituosa	58
5.2.4	Análise do transitório através do comparativo entre imagens de diversos períodos do vídeo	60
5.2.4.1	Análise através do comparativo de imagens no transiente	62
5.2.5	Comparativo entre imagens geradas com quantidade de períodos utilizados diferentes	63
5.3	Estimação de imagens no estado permanente através de dados obtidos no regime transiente	66
5.3.1	Comparativo entre as imagens sintetizadas e as obtidas experimentalmente	67
5.3.1.1	Célula 01 - Saudável	69
5.3.1.2	Célula 02 - Defeituosa	71
5.3.1.3	Célula 03 - Defeituosa	73
5.3.1.4	Comparativo entre imagens de acordo com a quantidade de quadros utilizados .	75
5.3.2	Aplicação do método para obtenção das imagens sintetizadas em vídeo de tamanho reduzido	77
6	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS	84

1 Introdução

Devido ao panorama atual do setor elétrico mundial, de transição entre uma matriz energética dependente de combustíveis fósseis para maior utilização de energias renováveis, é possível verificar um crescimento acelerado nos últimos anos na utilização destas fontes de geração de energia. Entre elas, a geração de energia solar fotovoltaica se encontra em franca ascensão, principalmente devido aos avanços tecnológicos dos materiais e técnicas, além de regulamentações e políticas públicas baseadas em sustentabilidade. Dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica [1] revelam um crescimento exponencial da potência instalada desse tipo de fonte na matriz energética brasileira, conforme gráfico na figura 1.1.



Figura 1.1 – Evolução da utilização da fonte solar fotovoltaica no Brasil.

Investimentos em energias renováveis alcançaram 350 bilhões de dólares em 2020, sendo que desses, a quantidade em energia solar foi de 162 bilhões (aproximadamente 46%). Em 2021, esses investimentos em energia solar atingiram 226 bilhões de dólares (um aumento de quase 40% com relação à 2020) e 308 bilhões em 2022 (aumento de 36% com relação à 2021) [2]. Além disso, devido à projeção de um cenário de zero emissões para 2050, é esperado um aumento ainda maior dos investimentos para geração, desenvolvimento e pesquisa nas próximas décadas [3].

Tendo em vista este cenário de instalações que estão funcionando há algum tempo, além da projeção de aumento do mercado para os próximos anos, o desenvolvimento de novas tecnologias se faz necessário, de forma a garantir o funcionamento adequado das

instalações fotovoltaicas. Desenvolvimento de tecnologias das células para que possuam maior durabilidade em face às condições adversas onde estão instaladas como também em técnicas para monitorar e identificar falhas nos módulos antes da instalação ou em inspeções periódicas permitem que os sistemas funcionem com uma diminuição significativa nas perdas em desempenho [4].

Existem diversas técnicas não destrutivas para monitoramento de sistemas fotovoltaicos e identificação de falhas, sendo as principais o método elétrico de levantamento da curva característica I-V dos módulos e os métodos por imagem como termografia infravermelha e eletroluminescência [5]. Elas permitem que sejam encontradas falhas que foram causadas tanto na produção das células ou módulos, como no transporte, instalação ou no uso, como por exemplo, fissuras, pontos quentes, derivações *shunts*, degradação induzida pelo potencial (PID), entre outras.

No entanto, a utilização do levantamento da curva característica não permite que defeitos identificados pelos dados I-V indiquem a localização exata na célula, explicando a origem do problema [6]. Isso é possível com os métodos de imagem que, portanto, vêm ganhando bastante atenção, permitindo observar falhas tanto na distribuição de temperatura na superfície do material como também em profundidade.

Como componentes eletrônicos tem seu funcionamento baseado na passagem de corrente elétrica na sua estrutura interna, após uma aplicação de tensão em seus terminais, uma fonte de calor é gerada, seja por efeito Joule ou por outros mecanismos internos de dissipação de energia. E em caso de certos tipos de defeitos, uma variação na corrente é observada em determinadas posições do componente, causando uma perturbação na quantidade de calor gerada. Dessa forma, a termografia é uma candidata natural para testes nesses tipos de componentes.

Como exemplos desses métodos, existem a termografia ativa, que pode ser pulsada ou modulada (*LIT* - Lock-in thermography), que diferem-se pela forma de onda de excitação. A *LIT* (termografia ativa modulada) possui formas variantes, sendo elas a *DLIT* - *Dark Lock-in thermography* ou *ILIT* - *Illuminated Lock-in thermography* [7], que se diferenciam pela ausência ou presença de iluminação durante o ensaio. Além disso, outros métodos utilizados são a eletroluminescência e fotoluminescência [8], [9].

Porém, a termografia ativa necessita de diversos ciclos de aquecimento para atingir o regime permanente de aquecimento, de forma à obter os resultados adequados, visto que a técnica necessita ser avaliada nesse regime [10]. Esse procedimento faz com que os ensaios utilizando essa técnica demorem por longos períodos de tempo, a depender do material em estudo, se tornando um fator que interfere bastante na caracterização desses módulos.

Um solução apontada em alguns trabalhos para a redução desse tempo de ensaio

seria analisar o regime transiente de aquecimento para obtenção de imagens representativas do material em estudo. Alguns trabalhos encontrados lidam com essas informações de transiente, como os de Pitarresi [11], Chatterjee e Tuli [12] e Luo et al. [13]. Porém, nesses trabalhos são analisados apenas materiais metálicos ou compostos de fibra de carbono.

O presente trabalho busca utilizar as informações obtidas durante o transiente térmico de aquecimento das células fotovoltaicas, durante os ensaios de termografia ativa modulada, para reduzir o tempo de ensaio. Através dos vídeos obtidos nos ensaios, é analisada a influência de parâmetros como frequência de excitação e quantidade de dados na geração de imagens, tanto em regime permanente como no transitório. Com base nessas informações, é proposto um método para sintetizar imagens utilizando os dados do regime transiente, na expectativa de obter imagens representativas do funcionamento interno da célula em tempo reduzido, utilizando valores extrapolados de um modelo ajustado.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é a redução do tempo de ensaios da termografia ativa modulada aplicada em células fotovoltaicas, ao estudar e avaliar as informações obtidas durante o transiente térmico de aquecimento de células fotovoltaicas em ensaios de termografia ativa modulada. Dessa forma, busca-se obter imagens semelhantes às imagens obtidas através do método tradicional, que usa os dados provenientes da resposta no estado permanente, reduzindo o tempo de ensaio.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar os aspectos teóricos e possíveis arranjos experimentais a serem utilizados;
- Entender a influência das condições experimentais nas imagens obtidas, de forma a obter um ensaio mais rápido e igualmente efetivo;
- Realizar os ensaios definidos e avaliar a resposta térmica no transiente de aquecimento das células, através das imagens processadas;
- Definir um método para obtenção de imagens que representem o comportamento da célula em um ensaio com tempo reduzido;

1.2 Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida da seguinte forma: no Capítulo 2 encontra-se uma revisão sobre o uso de termografia ativa modulada, análises baseada no transiente em

ensaios termográficos e sobre comparativos entre imagens; no Capítulo 3, faz-se uma explanação sobre a termografia ativa e seu uso na análise de falhas em células fotovoltaicas, estratégias para a análise dos dados obtidos e para ajuste do modelo; no Capítulo 4 são descritos todos os métodos utilizados para os experimentos e simulações, enquanto que no 5 são apresentadas as análises sobre os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 6 são expostas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

O uso de termografia ativa para caracterização de defeitos em diversos materiais pode ser visto em vários estudos ao longo das últimas décadas. Para um maior entendimento sobre a técnica da termografia ativa modulada, foram encontrados trabalhos e livros que exploram o tema e permitiram, além de uma maior compreensão da técnica, explorar uma forma de diminuir o tempo dos ensaios. Além disso, também foram utilizados trabalhos sobre métricas de qualidade de imagem. Neste capítulo estão listados os trabalhos que foram utilizados como base para esta dissertação.

Ibarra-Castanedo, Tarpani e Maldague, em [14], apresentam uma revisão dos métodos de termografia utilizados em ensaios não destrutivos, além de relacionar trabalhos onde a termografia é aplicada em diversos tipos de materiais em busca de falhas. São listados alguns cenários para demonstrar o procedimento definido em busca de escolher o melhor método de termografia para o objeto e processo em estudo, indicando qual a melhor forma de excitação, como a energia será transferida para o corpo de prova, se necessita de uma fonte externa de excitação, entre outros.

Spagnolo et al. [15] apresenta uma revisão de diversos defeitos que podem ser encontrados em módulos e células fotovoltaicas, indicando como a termografia pode ser utilizada para detecção da localização dos defeitos, de forma rápida, com uso de equipamentos simples e, em alguns casos, sem impactar em perdas de produção por parada do sistema.

Breitenstein e Langenkamp (2010, p. 4), em seu livro, apresenta uma revisão extensa sobre a aplicação de termografia ativa modulada (*LIT - Lock-in thermography*) na caracterização e testes de componentes eletrônicos. São trazidos os aspectos teóricos que envolvem a técnica, como conceitos sobre termografia infravermelha, condução de calor, ondas térmicas de acordo com o formato do corpo de prova, assim como o que é necessário para realizar a técnica (materiais e procedimentos).

Ainda nesse trabalho, os autores afirmam que a termografia modulada já está estabelecida como uma ferramenta vantajosa na análise de falhas em componentes eletrônicos. Sua utilização é baseada na busca por fontes de calor na estrutura interna desses componentes. Nesse tipo de termografia, o corpo de prova é aquecido periodicamente, utilizando uma frequência definida e uma resposta térmica modulada é obtida e avaliada após um determinado período de tempo que possibilite alcançar o estado estável do sinal. Em comparação com a termografia pulsada, possui a vantagem na análise de componentes eletrônicos pelo fato de ter uma maior sensibilidade, facilitando a identificação das pequenas variações de temperatura que são observadas nesses materiais.

Também está presente uma listagem das aplicações de termografia ativa relacionadas às células fotovoltaicas. São mostrados exemplos do uso da termografia ativa modulada no escuro (*DLIT*) para encontrar falhas, medir resistência série nas células, levantar curva I-V através de dados térmicos, ensaios com tensão reversa nas células, entre outros.

Com relação ao processamento das imagens obtidas por termografia, técnicas que transformam os dados do domínio do tempo para o da frequência são bastante utilizadas pois permitem, de forma mais eficiente, remover certos tipos de ruídos, além de destacar e encontrar estruturas periódicas em imagens, entre outros. Breitenstein e Langenkamp (2010) evidenciam os usos da técnica dos quatro pontos (*4 SPSM – Four-step phase-shifting method*) e da transformada rápida de Fourier (*FFT – Fast Fourier Transform*) para geração de imagens de amplitude e fase, sendo que a imagem de fase melhora a sensibilidade na detecção dos erros. Essas técnicas são bastante utilizadas em ensaios não destrutivos e tem sua eficácia comprovada. Vieira et al. (2022) descreve o uso da análise de componentes principais (*PCA – Principal component analysis*), técnica estatística para redução da quantidade de dados com a menor perda possível de informação, facilitando a análise das imagens obtendo um conjunto menor resguardando as principais informações.

Em Moustakidis et al. (2018), são utilizadas algumas técnicas no pré-processamento dos dados obtidos em ensaios de termografia ativa, feitos em compósitos de fibra de carbono utilizando lâmpadas halógenas. São aplicados filtros de média, Gaussiano e um ajuste polinomial nos dados durante o pré-processamento, onde os resultados obtidos foram avaliados comparando as imagens pós-processadas. Foi visualizado que, utilizando o filtro da média, obteve-se o ponto ótimo para remover a presença do efeito indesejado da não uniformidade da distribuição de calor na superfície do corpo de prova.

Breitenstein et al. (2011) apresenta um comparativo entre as técnicas de termografia ativa modulada e eletroluminescência, apontando qual das técnicas é recomendada para determinados tipos de defeitos, tomando como base diversos resultados obtidos para células fotovoltaicas policristalinas quando utilizadas variações dessas técnicas. Apesar disso, também é dito que as técnicas podem ser usadas em paralelo. Em [19], Breitenstein et al. fazem um comparativo entre dois tipos de termografia ativas moduladas (*DLIT* e *ILIT - Illuminated Lock-in Thermography*) e eletroluminescência com a célula polarizada reversamente (RevEL), investigando células que possuem uma falha denominada de *shunt* em busca de encontrar esses defeitos. Já Ramspeck et al. [20] realiza uma combinação entre imagens DLIT e de eletroluminescência, mostrando a resistência série da célula, além da corrente de recombinação.

Além desses, outro trabalho que apresenta exemplo de aplicações da termografia ativa modulada no escuro na detecção de falhas de módulo fotovoltaicos é o de Halwachs [21]. Ele mostra, em sua dissertação de mestrado, o desenvolvimento de um sistema de medição *DLIT* para detectar falhas em módulos fotovoltaicos de diversas tecnologias.

Foram realizados diversos experimentos para encontrar as melhores condições de ensaio, avaliando a dependência da frequência de excitação, a perda de quadros, a posição do módulo com relação a lente da câmera (por trás ou pela frente do módulo), quantidade de períodos e quantidade de quadros por período.

Em [Vieira et al. \(2022\)](#), é vista uma nova técnica de termografia ativa modulada em células fotovoltaicas, utilizando uma excitação senoidal na região de polarização direta e avaliando a resposta térmica no estado estável, buscando detectar defeitos nas células. Comparando os resultados com ensaios de eletroluminescência, foi possível obter informações qualitativas dos defeitos nas células.

Alguns trabalhos encontrados destacam a análise do regime transitório na avaliação dos dados obtidos em ensaios de termografia ativa. [Chatterjee e Tuli \(2012\)](#) exibem um método para aprimorar imagens obtidas em ensaios de termografia ativa modulada através de uma correção e reconstrução do sinal térmico obtido. Foram realizados ensaios em corpo de prova de aço com vários furos de mesmo diâmetro porém, com diversas profundidades, excitado com uma onda senoidal de frequência variando entre alguns valores no intervalo de 1 e 100 mHz. Essa onda é produzida por um arranjo de duas lâmpadas halógenas de 1000 W cada, funcionando com 20% da potência máxima. As imagens foram obtidas por uma câmera termográfica de resolução 320 x 240 *pixels*, com taxa de quadros (*frame rate*) de 4 Hz, por 100 segundos, obtendo 400 imagens.

As imagens obtidas foram processadas seguindo três passos, sendo o primeiro uma remoção do padrão de aquecimento presente no transitório, ao subtrair os valores encontrados ao aproximar a curva de aquecimento do polinômio dos valores de temperatura dos *pixels* ao longo do tempo, obtendo apenas a parte oscilatória do sinal. Após esse passo, são obtidas imagens de amplitude e fase ao aplicar a *FFT* e, em seguida, sintetizar senóides puras utilizando as informações de amplitude e fase obtidas no passo anterior, removendo a influência de harmônicas e obtendo um sinal próximo ao do estado estável. Foi possível obter uma melhora nas imagens em comparação com o método clássico, corrigindo a não uniformidade do aquecimento, além de diminuir o tempo de ensaio.

[Stoynova e Bonev \(2018\)](#) apresentaram uma metodologia de pós-processamento de dados para melhorar as informações obtidas em ensaios de LIT com onda senoidais. Foram obtidas imagens de amplitude e fase utilizando um método chamado *DLCM (Digital Lock-in Correlation)* e os sinais térmicos obtidos foram modelados utilizando uma senóide para representar o sinal no estado estável somada com um polinômio para representar a curva de aquecimento existente no transitório. Foi realizada a aplicação desse método em um material feito de epóxi com regiões de cobre na superfície e avaliados critérios como quantidade de períodos em um ensaio para gerar as imagens e qualidade da imagem gerada ao se desviar da frequência de excitação, no pós-processamento.

[Luo et al. \(2023\)](#) também aplicam a termografia ativa modulada em um corpo de

prova metálico para identificar defeitos internos, utilizando os dados obtidos no regime transitório. Foi utilizada uma câmera com resolução 640 x 480 *pixels*, com taxa de quadros de 50 Hz, excitando o material em 4 frequências (25, 50, 75 e 100 mHz). Eles modelaram o sinal obtido pela câmera termográfica como uma soma de dois componentes, um componente *DC*, ajustado como um polinômio de grau *n* (a ser escolhido após testes) e que representa o transitório, e um componente *AC*, modelado como uma senóide. O componente *DC* é removido da senóide e aplicada a transformada de Fourier para obter imagens de amplitude e fase. Foi demonstrada uma performance superior desse método em comparação com os outros comparados (*PCT - Principal component thermography*) e suas variantes, identificando mais defeitos quando utilizadas as imagens de fase da análise.

Matarrese, Palumbo e Galietti (2023) seguem a mesma linha desses trabalhos, utilizando os dados do transiente na termografia ativa modulada e obtendo imagens que evidenciam melhor os defeitos do que no modo tradicional. Porém, como objetivo principal, realizam uma comparação entre quatro técnicas de pós-processamento dos dados (*FFT*, *4PMM - Four Points Mean Method*, *SR - Signal Reconstruction* e *DI - Dual Integration*) em função de três parâmetros: número de períodos utilizados para gerar as imagens, número de quadros por período e número de *pixels* perdidos na gravação, avaliando a acurácia e precisão de cada um.

Em seu método, são realizados ensaios de *LIT* com sinal senoidal em Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (*CFRP*, em inglês), utilizando duas lâmpadas halógenas de 500 Watts cada. Através dos dados obtidos no regime transitório, é feito um ajuste de um modelo utilizando mínimos quadrados que considera o sinal como uma soma de uma senóide com um termo exponencial. Com os coeficientes obtidos desse ajuste, são sintetizados dados para o regime transiente e estável e, utilizando os métodos listados, produzidas imagens de amplitude e fase para serem feitas as comparações, junto com as imagens obtidas experimentalmente. As comparações são feitas qualitativa e quantitativamente, nesse caso, utilizando o contraste de fase entre um ponto em uma região defeituosa e na região ao redor do defeito.

Como resultados, eles obtiveram que os algoritmos *SR*, *FFT* e *DI* detectaram a mesma quantidade de defeitos porém, devido ao regime transiente, *FFT* e *DI* possuíram menor acurácia, afetando os valores de contraste de fase. Também foi percebido que o contraste de fase normalizado não parece ser afetado pela quantidade de períodos utilizados para gerar as imagens. É dito que, diferente dos defeitos criados artificialmente e utilizados no trabalho, os defeitos reais possuem características intrínsecas que dificultam a análise, sendo necessário utilizar outro método de teste não destrutivo para caracterizar o defeito, inicialmente.

Mohamed et al. (2024) também utilizam *DLIT* para detectar defeitos sob a superfície de um módulo eletrônicos de potência, utilizando uma fonte de laser para aquecer a liga de

alumínio que representa esse componente. As imagens são processadas com *FFT*, *DLCM* e *4SPSM*, obtendo resultados próximos, e analisadas para verificar o efeito do número de períodos nas imagens de amplitude e fase. Foi percebido que, no estado estável, os valores de amplitude e fase se mantêm constantes mas variam levemente no transiente, de forma que também é possível obter resultados durante o transiente.

Sapieta et al. (2023) realizaram ensaios de termografia ativa modulada utilizando lâmpadas halógenas e *flash* para identificar defeitos em peças produzidas com PETG em impressoras 3D, com defeitos de formatos e profundidades diferentes. Foram gravados vídeos de 10 minutos dos ensaios e geradas imagens de fase, utilizando *FFT* para uma quantidade de dados equivalente à valores entre um período até cinco períodos (video todo), sendo essas imagens comparadas utilizando o índice de similaridade estruturada e uma versão derivada (*SSIM - Structured Similarity Indexing Method* e *MS-SSIM - Multi-Scale Structured Similarity Indexing Method*). Foi possível perceber que, ao aumentar o número de períodos na geração das imagens, os valores dos índices se mantêm bem próximos, sem grandes modificações em seus valores. Também foi notado que as imagens geradas utilizando *flash* como excitação, com a quantidade maior de períodos, aparentam estar mais borradas do que para um período.

Sobre as métricas de comparativo entre imagens, um trabalho encontrado foi o de Wang (2011). Nele, são apresentados os conceitos sobre métodos modernos de qualidade de imagens (*IQA - Image Quality Analysis*), apresentando aspectos teóricos, alguns exemplos e os potenciais das aplicações desses métodos. Em Sara, Akter e Uddin (2019), é apresentado um comparativo entre diversas técnicas de IQA (*MSE - Mean Square Error*, *PSNR - Peak Signal to Noise Ratio*, *SSIM* e *FSIM - Feature Similarity Indexing Method*), utilizando algumas imagens padronizadas, que sofreram um processo de remoção de ruído utilizando um filtro Gaussiano. Como resultados, percebeu-se que os índices *SSIM* e *FSIM* podem ser analisados de forma mais fácil, por serem normalizados. Além disso, eles apresentam um resultado melhor, em termos de comparação entre duas imagens, do que os outros dois métodos.

Com base nestes estudos encontrados, é possível perceber que existe a possibilidade do uso de informações presentes no transiente térmico de aquecimento de um ensaio de termografia ativa modulada para estimar dados no regime permanente, sendo uma forma de redução do tempo de ensaio. Além disso, foi possível ver que o uso de métricas de similaridade consegue realizar a comparação entre imagens obtidas em ensaios de termografia ativa, podendo ser utilizada como uma forma de verificar se as imagens sintetizadas com os dados estimados estão de acordo com a imagens obtidas experimentalmente. Sendo assim, buscou-se aplicar as informações obtidas nestes estudos nos ensaios de termografia ativa modulada em células fotovoltaicas, desenvolvendo um método para redução do tempo de ensaio.

3 Fundamentação Teórica

Neste capítulo estão relacionados os principais conceitos teóricos utilizados neste trabalho. Para os ensaios de termografia ativa modulada, são apresentados os princípios de funcionamento de células fotovoltaicas e conceitos sobre termografia ativa, com foco no tipo modulada (*LIT*). Além disso, são apresentados conceitos sobre processamento digital de imagens, listando como são representadas as imagens digitais, conceitos sobre os filtros espaciais utilizadas neste trabalho além da técnica da transformada rápida de Fourier. Outros tópicos tratados neste capítulo são os índices de similaridades entre imagens utilizados e o ajuste de um modelo para os dados (*curve fitting*).

3.1 Princípios de funcionamento da Célula Fotovoltaica

Células solares são dispositivos que convertem energia da luz solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Com relação ao efeito fotovoltaico, ele pode ser dividido nas seguintes partes [27]:

1. **Absorção de Fótons:** Quando a luz solar atinge a célula fotovoltaica, fótons com energia suficiente são absorvidos pelos átomos do semicondutor, excitando os elétrons da banda de valência para a banda de condução, onde eles se tornam eletricamente livres (n^o1 na figura 3.1);
2. **Geração de Pares Elétron-Lacuna:** A absorção de fótons gera pares elétron-lacuna. Os elétrons livres na banda de condução e as lacunas na banda de valência são separados pelo campo elétrico inerente à junção p-n (n^o2 na figura 3.1);
3. **Separação de Cargas:** O campo elétrico da junção p-n direciona os elétrons livres para a camada tipo-n e as lacunas para a camada tipo-p. Essa separação de cargas cria uma diferença de potencial entre as camadas, permitindo a circulação de corrente elétrica quando a célula é conectada a um circuito externo (n^o3 na figura 3.1);
4. **Movimento das Cargas:** A separação de cargas cria uma diferença de potencial elétrico, ou tensão, entre as duas camadas. Se os contatos elétricos são ligados às camadas tipo-n e tipo-p, a corrente elétrica pode fluir através de um circuito externo, gerando eletricidade (n^o4 na figura 3.1). Depois de fluir pela carga, os elétrons voltam para o semicondutor e se recombinam com as lacunas (n^o5 na figura 3.1).

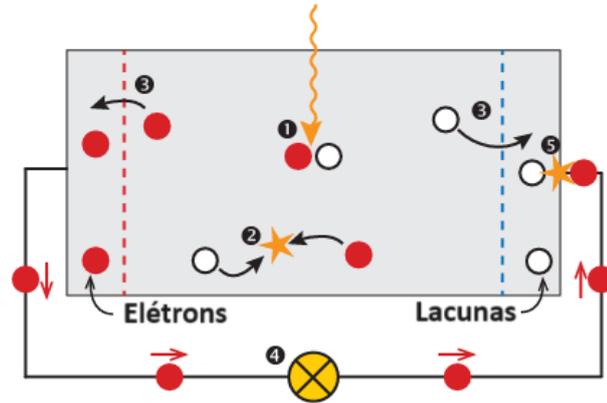


Figura 3.1 – Modelo simples do funcionamento da célula fotovoltaica, retirado de [27].

O funcionamento da célula pode ser analisado utilizando um modelo elétrico equivalente. O modelo mais comum utilizado é o de diodo único, representado na figura 3.2, onde:

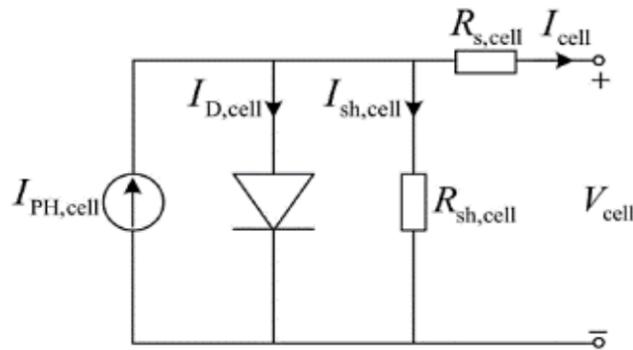


Figura 3.2 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica utilizando um modelo de diodo único, retirado de [28].

Onde $I_{PH,cell}$ é a corrente fotogerada na célula, em Amperes; $I_{D,cell}$ é a corrente do diodo, em Amperes; $I_{sh,cell}$ é a corrente que flui pela resistência paralelo ($R_{sh,cell}$, em Ohms), em Amperes; $R_{s,cell}$ é a resistência série da célula, em Ohms; V_{cell} e I_{cell} são a tensão e corrente nos terminais da célula, em Volts e Amperes, respectivamente.

Em relação ao circuito presente na figura 3.2, a equação 3.1 descreve o comportamento I-V da célula fotovoltaica. Na figura 3.3, o gráfico dessa relação é mostrado, indicando alguns pontos importantes.

$$I_{cell} = I_{PH,cell} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{\alpha k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh,cell}} \quad (3.1)$$

Sobre os parâmetros presentes na figura 3.3 [29]:

- I_{CC} , corrente de curto circuito. É a corrente máxima fornecida pela célula, quando seus terminais estão em curto. Depende de diversos fatores como a área, a potência

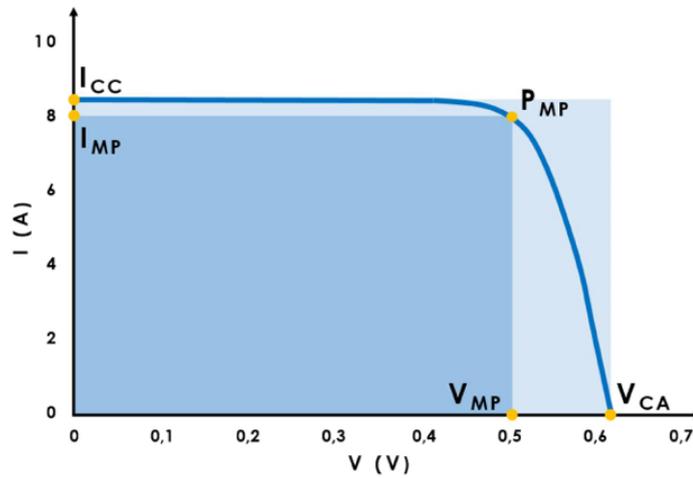


Figura 3.3 – Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica, com a indicação dos parâmetros principais de análise, retirado de [28].

e o espectro da luz que incide na célula, absorvância e refletância;

- V_{CA} , tensão de circuito aberto. É a máxima tensão da célula, quando não existe circulação de corrente em seus terminais. Atribuindo $I_{cell} = 0$ na equação 3.1, a tensão de circuito aberto é dado por:

$$V_{CA} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{PH,cell}}{I_{0,cell}} + 1 \right) \quad (3.2)$$

sendo $I_{0,cell}$ a corrente de saturação reversa do diodo;

- FF , fator de forma. É o parâmetro que, junto com a tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito, determina a potência máxima da célula. Permite obter indicativos de como estão o efeito das resistências em serie e paralelo sobre o dispositivo. Sua equação é definida por:

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{CA}I_{CC}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{CA}I_{CC}} \quad (3.3)$$

sendo V_{MP} e I_{MP} a tensão e corrente de máxima potência;

- η , eficiência. Parâmetro mais comum para comparar células, representa o quanto é eficiente o processo de conversão da célula fotovoltaica, sendo uma fração da potência incidente que é convertida em eletricidade. Sua equação é dada por:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{IN}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{AG} \quad (3.4)$$

sendo A a área da célula/módulo (m^2) e G a irradiância incidente (W/m^2);

Para caracterizar o funcionamento da célula fotovoltaica, o levantamento da curva I-V é uma das ferramentas mais utilizada nesse tipo de análise. Este é um método baseado nos parâmetros elétricos da célula, porém, existem também métodos baseados em análises de imagens, como por exemplo, a termografia e a eletroluminescência.

A eletroluminescência é um método que, ao excitar um determinado semicondutor com uma corrente elétrica, luz é emitida (em um comprimento de onda na faixa do infravermelho) e observada através de uma câmera adaptada para este fim. No caso da célula fotovoltaica, basicamente, é realizado o processo oposto ao que é feito para gerar eletricidade através da luz (efeito fotovoltaico). A eletroluminescência é observada quando a célula é polarizada. Sob essa condição, os portadores de carga (elétrons e lacunas) são injetados nas regiões n e p da junção p-n, respectivamente. Ao se recombinarem, esses portadores liberam energia na forma de luz, cuja intensidade e espectro dependem das características do material semicondutor e da qualidade da junção [21]. Nas imagens geradas (figura 3.4), as regiões mais brilhantes estão ativas, enquanto que as regiões escuras indicam partes defeituosas.

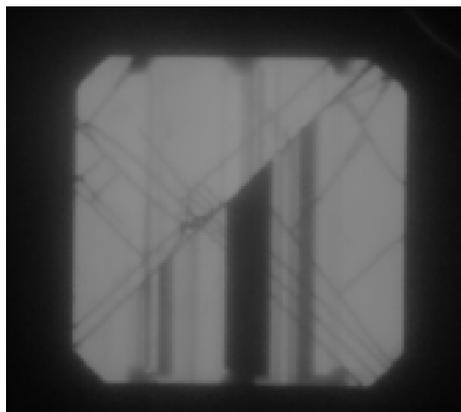


Figura 3.4 – Exemplo de imagem de um ensaio de eletroluminescência, retirado de [30].

Já na termografia, o efeito analisado é a distribuição térmica na superfície do célula. As seções a seguir apresentam mais detalhes sobre esse método.

3.2 Termografia Infravermelha

A termografia ativa é uma técnica de inspeção não destrutiva que utiliza uma fonte externa de calor para induzir variações térmicas em um material, capturando a radiação infravermelha emitida ou refletida para criar uma imagem térmica [14]. A propagação de calor induzido é influenciada pelas propriedades térmicas e físicas do material, sendo que a presença de defeitos (como trincas, delaminações, etc.) modifica a maneira que esse calor se propaga, criando alterações que são detectadas por câmeras infravermelhas. A seguir, alguns conceitos sobre radiação infravermelha e os materiais utilizados na termografia são apresentados.

3.2.1 Conceitos sobre irradiação infravermelha

A radiação infravermelha (IR) é uma forma de radiação eletromagnética com comprimentos de onda mais longos do que a luz visível, variando aproximadamente de 0,7 a 1000 micrômetros. Ela pode ser dividida de acordo com o intervalo do comprimento de onda, como representado na figura 3.5.

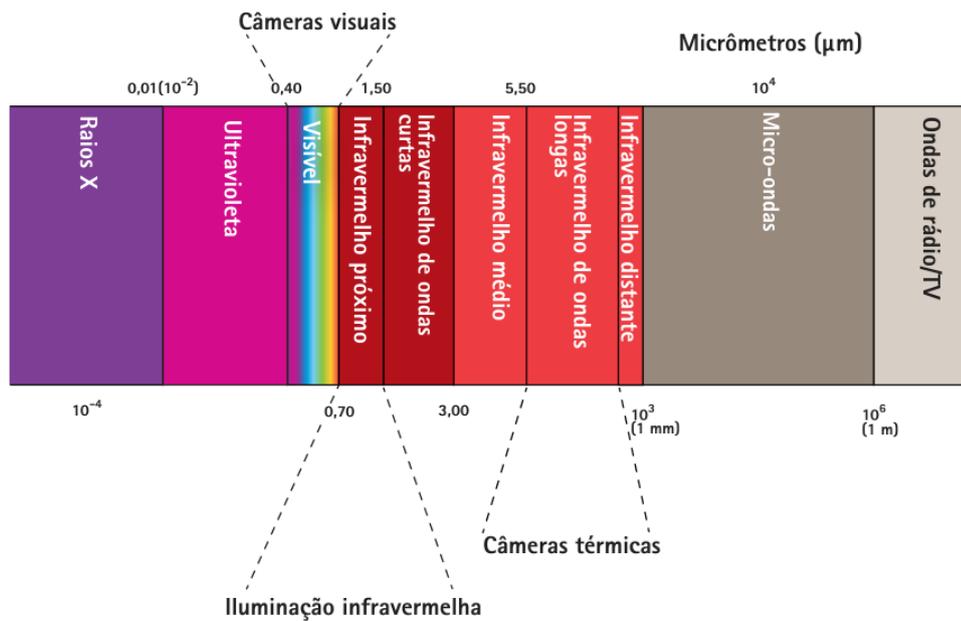


Figura 3.5 – Representação do espectro eletromagnético, destacando a região do infravermelho, retirado de [31].

Devido à irradiação térmica, todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto (0 K) podem emitir ondas eletromagnéticas em uma quantidade correlacionada à sua temperatura de superfície. A quantidade de radiação emitida por um objeto e sua distribuição espectral dependem de sua temperatura e propriedades de emissividade.

Especificamente, as ondas eletromagnéticas irradiadas de um objeto (normalmente entre $40^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$) na Terra estão principalmente na faixa do comprimento médio do infravermelho (2 a $5 \mu\text{m}$) e comprimento longo (8 a $14 \mu\text{m}$), que causam efeito de aquecimento significativo aos objetos no ambiente natural [32].

Quando a radiação eletromagnética incide sobre a superfície de um material, três coisas podem acontecer: ela pode ser refletida pela superfície, pode ser absorvida pelo material ou pode ser transmitida, caso o material seja total ou parcialmente transparente à luz. As probabilidades de ocorrência desses três processos são descritas pelo coeficiente de reflexão ou refletância ρ , o coeficiente de absorção ou absorptância α e o coeficiente de transmissão ou transmitância τ . Esses três coeficientes geralmente dependem do comprimento de onda e da distribuição direcional da irradiação [7].

Eles são adimensionais e sua soma é sempre igual a um, da seguinte forma:

- Para um material idealmente refletor: ρ é igual a um, e α e τ são zero;
- Para um material totalmente transparente e não refletor: τ é igual a um, e α e ρ são zero;
- Para um corpo negro: α é igual a um, e ρ e τ são zero.

A probabilidade de uma superfície emitir radiação (chamada de emissividade, ϵ) deve ser igual à probabilidade de absorção (α) nesse comprimento de onda. Essa identidade é conhecida como lei de Kirchhoff. Para um corpo negro ideal, $\alpha = \epsilon = 1$. Para corpos reais, ϵ é menor que 1.

Uma das incertezas presentes na termografia é o fato que a emissividade de um objeto as vezes é desconhecida ou pode ser alterada de acordo com a posição em que se encontra. Superfícies metálicas, por exemplo, apresentam uma emissividade baixa devido a sua alta refletância e a radiação que vem destes objetos contém uma grande quantidade de luz refletida do ambiente ao seu redor [7]. Sendo assim, é importante a configuração da emissividade adequada ao realizar ensaios com termografia ativa.

3.2.2 Termografia Ativa Modulada

Termografia ativa modulada é um tipo de ensaio não destrutivo em que um material é excitado com um sinal periódico e produz um resposta modulada em forma de calor [7]. Caso existam defeitos internos no material, o perfil térmico na superfície irá ser alterado, indicando a falha. Como características, é menos suscetível à influência do ambiente ao redor, desigualdade de aquecimento e ruídos. Porém, necessita de um pós-processamento mais complexo dos dados e maior tempo de ensaio, se comparada com outras técnicas de termografia [22].

O sinal utilizado pode ser ótico (geralmente em materiais como metais, compostos de fibra de carbono, alumínio, entre outros) ou elétrico (utilizado em dispositivos eletrônicos ou células solares). Os sinais mais utilizados para excitar o material são ondas quadradas ou senoides. No caso da senoide, a função utilizada possui um termo senoidal, de frequência f_L , somado com um valor DC (E_{DC}) de acordo com a equação 3.5.

$$E(t) = E_{DC} + E_0 \text{sen}(2\pi f_L t) \quad (3.5)$$

A resposta modulada no material em análise é medida utilizando uma câmera infravermelha, onde o vídeo obtido possui uma sequência de imagens capturadas de acordo com uma taxa de quadros (de acordo com o modelo da câmera). Essa resposta pode ser descrita pela equação 3.6a [33].

$$T(z) = A \operatorname{sen}(2\pi f_L t + \phi) \quad (3.6a)$$

onde:

$$A = T(z = 0) e^{\frac{-z}{\mu}} \quad (3.6b)$$

e

$$\phi = \frac{-z}{\mu} \quad (3.6c)$$

sendo: f_L , frequência de excitação; z , espessura; μ , difusividade térmica dada por $\sqrt{\frac{2\alpha}{2\pi f_L}}$;

A difusividade térmica é dada pela fórmula $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho}$, onde λ é a condutividade térmica (em W/mK), c_p é o calor específico (em J/gK) e ρ é a densidade (g/cm^3).

As imagens obtidas pela câmera fornecem a distribuição de temperatura da superfície do material. Já o valor de um *pixel* ao longo dos quadros fornece a informação de temperatura no tempo de ensaio. Uma forma de análise desses dados é realizar um pós-processamento destes valores dos *pixels* utilizando técnicas, como a transformada de Fourier, presente em [28] (Figura 3.6), onde são obtidas imagens de amplitude e fase do sinal térmico em cada ponto da imagem. Essas imagens possuem características que permitem a identificação de defeitos nos materiais [21].

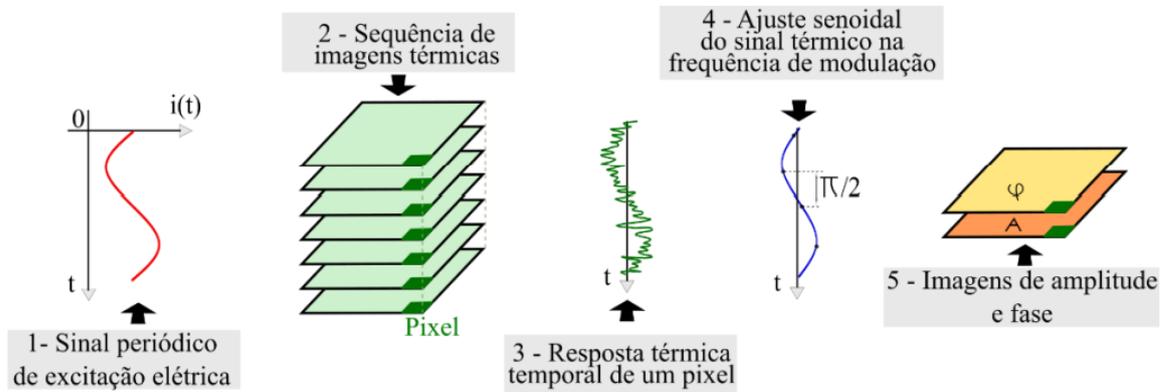


Figura 3.6 – Representação do procedimento de termografia ativa modulada, para obtenção das imagens que representam a técnica, retirado de [28].

A imagem de amplitude fornece informações sobre o perfil térmico na superfície do material, indicando onde as fontes de calor estão presentes e as diferenças de temperatura entre essas fontes na superfície. Em imagens utilizando frequências menores de modulação, a imagem mostra as fontes de calor mais espalhadas e borradas, enquanto que para frequências maiores, essas fontes possuem uma resolução espacial melhor, mais pontuais [21].

Já para as imagens de fase, é possível medir o contraste de fase pela diferença de ângulo entre as regiões defeituosas e sadias [28]. Pode ser usada para detectar uma variação entre fontes de calor nos sinais, não sendo influenciada pela mais forte como nas

imagens de amplitude. Consegue obter as informações dos contornos da amostra, sendo boa opção na análise de componentes eletrônicos, e sua resolução espacial é dada pela difusividade térmica [21].

Um caso específico da termografia ativa modulada é quando o ensaio é feito utilizando uma câmera escura (*DLIT*), onde as medições são realizadas em um ambiente sem iluminação. Dessa forma, possíveis ruídos provenientes da exposição à luz não aparecem na medição, permitindo análises mais precisas com relação ao comportamento do material, sem a presença de influências externas na resposta. Nesse caso, utilizado para ensaios em circuitos eletrônicos e células fotovoltaicas, a excitação é realizada através da injeção de corrente elétrica no material, e medido o calor gerado pelo seu funcionamento.

Com relação ao aquecimento em um semiconductor, uma das causas principais é o efeito Joule, que ocorre ao conduzir uma corrente elétrica por uma resistência. Em células fotovoltaicas, isso ocorre nos locais que existe um defeito denominado de *shunt*. Outras formas de aquecimento são através da emissão de fônons e calor, através do efeito fotoelétrico, e do efeito Peltier, quando os portadores de carga na junção p-n da célula transferem energia para os eletrodos da célula, resfriando a junção e aquecendo os eletrodos [7].

A temperatura da superfície de um objeto sob investigação é mostrada como uma função do tempo de medição após o início de um experimento de termografia ativa modulada. Ao iniciar o experimento, a temperatura da amostra é igual à temperatura em torno dela, T_0 . No primeiro período, a temperatura aumenta de acordo com o sinal de entrada e, após este pulso, este aumento de temperatura permanece constante, devido a resistência térmica do material. Os ciclos vão se repetindo e, com o fluxo de calor contínuo para o material, a temperatura aumenta, ao longo do tempo, em um perfil exponencial, como mostrado na figura 3.7 (nesse caso, para uma onda quadrada de aquecimento). No estado de equilíbrio, a quantidade de calor introduzida é igual a perda de calor para o entorno em cada período, mantendo o valor médio da temperatura constante, T_{eq} [7].

Esse perfil de aquecimento da figura 3.7, quando o material é excitado utilizando um sinal senoidal, pode ser descrito matematicamente através da equação 3.7 [10].

$$T(t) = T_0 + \Delta T(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + A \sin(2\pi f_L t + \varphi), \quad (3.7)$$

onde T_0 é a temperatura inicial da superfície do material, ΔT é a variação de amplitude térmica, τ é a constante de tempo e φ é a defasagem para o sinal de excitação.

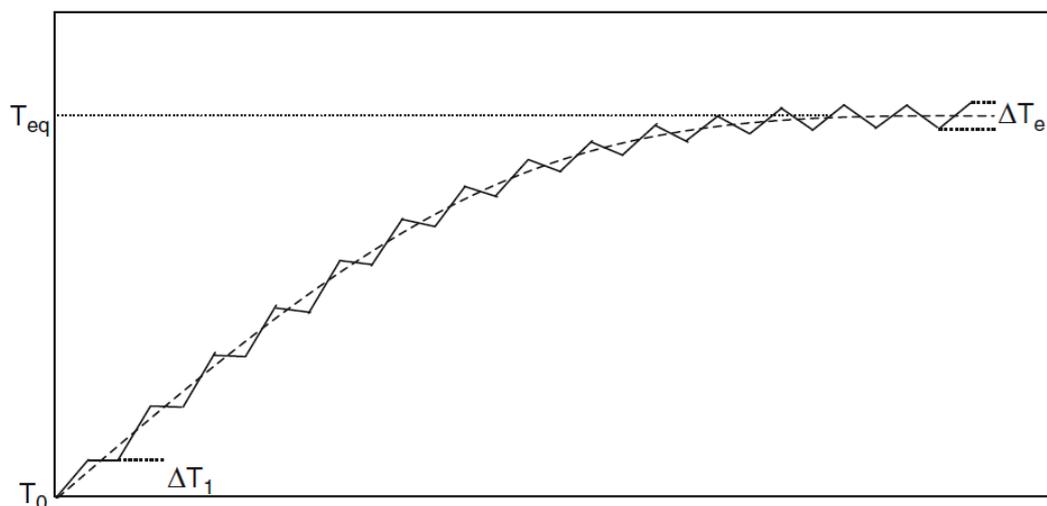


Figura 3.7 – Representação do aquecimento de um material em um ensaio por termografia ativa modulada, retirado de [7].

3.3 Processamento Digital de Imagens

Processamento digital de imagens surgiu da necessidade de melhorar a qualidade da informação de uma imagem para a interpretação humana. Seu uso se dá, basicamente, com a manipulação de imagens digitais, através de técnicas e algoritmos desenvolvidos. É utilizado através de uma sequência de etapas, em busca de melhorar a qualidade das imagens e extrair informações relevantes. É uma ferramenta poderosa para analisar e obter informações, sendo aplicada em diversos campos. A seguir, são apresentados alguns conceitos teóricos para um maior entendimento sobre este assunto.

3.3.1 Imagens digitais

A visão humana é um dos sentidos mais importantes e avançados dos seres humanos, tendo importância crucial para que eles possam reconhecer e entender tudo que se passa ao seu redor. De forma simples, podemos resumir a visão como um processo que começa com a captação de luz pelos olhos e, após uma série de processamentos, os dados obtidos são analisados e interpretados pelo cérebro, gerando o entendimento sobre o que foi visto.

Os seres humanos conseguem visualizar apenas uma estreita faixa de valores em toda a banda dos sinais eletromagnéticos, que é chamado de espectro de luz visível, vide figura 3.8. No entanto, aparelhos e máquinas podem obter imagens em outras faixas espectrais e de outras fontes, que os humanos não conseguem, como infravermelho ou raio-x, por exemplo[34].

De acordo com Russ [36], existem algumas diferenças da forma como a visão humana e dispositivos obtêm informações sobre as imagens. A visão humana é essencialmente qualitativa e comparativa, ao invés de quantitativa. Seres humanos tem dificuldade para

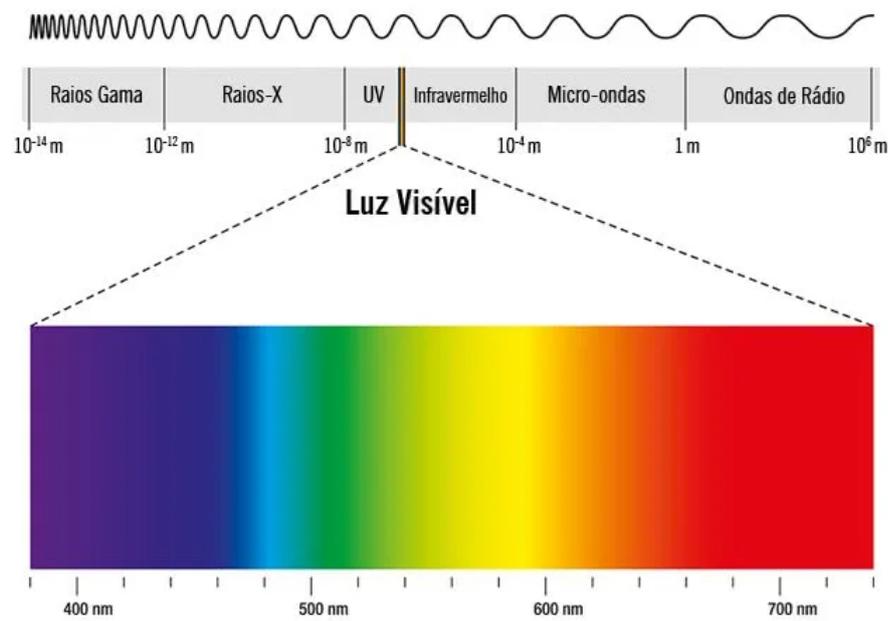


Figura 3.8 – Representação do espectro eletromagnético, destacando a região de luz visível, retirado de [35].

julgar cor e brilho de imagens, onde mudanças sutis desses parâmetros espacialmente ou ao longo do tempo geralmente são ignoradas, devido ao sistema humano compensar automaticamente. As mudanças bruscas, relacionadas à bordas ou outras estruturas importantes da cena são percebidas mais facilmente.

Dessa forma, a depender da situação, a visão humana pode não conseguir distinguir alguns detalhes presentes em imagens ou vídeos, gerando dúvidas sobre a real informação obtida. Nesses casos, é possível que as máquinas, que trabalham com imagens digitais, consigam resultados mais interessantes, utilizando o processamento adequado.

Sobre as imagens digitais, elas podem ser definidas como uma função bi-dimensional, $f(x, y)$, onde x e y são as coordenadas espaciais e o valor de f , em cada ponto, é chamado de intensidade ou nível de cinza. Tanto x e y , quanto f devem ser discretos e finitos para a imagem ser considerada digital. Esses pontos são chamados de elementos da figura ou *pixels* [34].

Observando a imagem 3.9, o índice m indica a posição de um ponto na linha enquanto que n indica na coluna. Em uma matriz $M \times N$, os índices variam entre 0 e $M - 1$ para as linhas e 0 e $N - 1$ para as colunas, sendo que o ponto $(0, 0)$ é o ponto na extrema esquerda superior.

O valor de f é uma quantidade escalar, proporcional a energia emitida pela fonte física da imagem sendo, portanto, finita e positiva ($0 \leq f(x, y) < \infty$). É caracterizada por dois componentes sendo eles, a luminosidade incidente no local (iluminância) e a luminosidade refletiva pelos objetos do local (refletância), denominados respectivamente

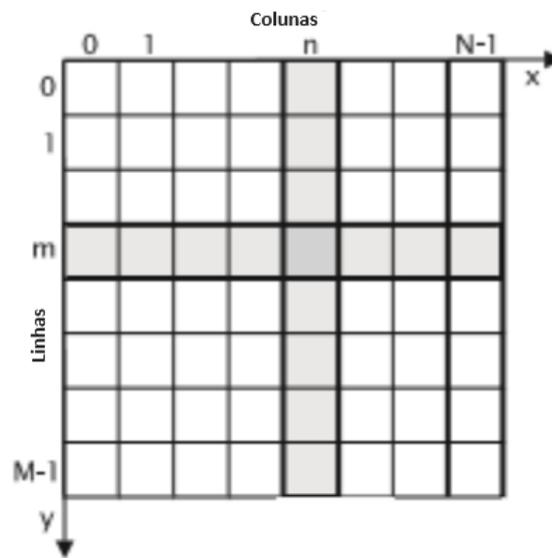


Figura 3.9 – Representação de uma imagem digital utilizando uma grade retângular $M \times N$, adaptado de [37]

de $i(x, y)$ e $r(x, y)$, como mostrado na equação 3.8a.

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (3.8a)$$

onde:

$$0 \leq i(x, y) < \infty, \quad (3.8b)$$

e

$$0 \leq r(x, y) \leq 1 \quad (3.8c)$$

A intensidade $f(x, y)$ do *pixel* varia entre L_{min} e L_{max} , onde $L_{min} = i_{min}r_{min}$ e $L_{max} = i_{max}r_{max}$. O valor dessa intensidade geralmente é ajustado para variar entre 0, que é o valor mínimo e que identifica a cor preta, até L (255, se a imagem for de 8 bits), indicando a cor branca). Valores intermediários são considerados como tons de cinza.

3.3.2 Filtros Espaciais

Técnicas de filtragem espacial realizam transformações nos *pixels* da imagem, utilizando uma combinação dos valores de um grupo de *pixels* (máscara) na vizinhança do ponto. Corresponde a realizar uma convolução entre a imagem e a máscara. Essas transformações tem como objetivo realçar ou suavizar características específicas presentes na imagem [38].

Os filtros mais utilizados são os que realizam um suavização da imagem. Eles reduzem as variações abruptas nos valores dos níveis de cinza, como ocorre na incidência de ruído aleatório na imagem, agindo então na redução de ruído na imagem. Além disso, servem para reduzir ou remover pequenas áreas na imagem, menor do que o tamanho da

máscara [34]. As imagens obtidas após a aplicação desse tipo de filtro tem um aspecto de borrada, sendo que esse efeito é determinado pelo tamanho da máscara e valores dos coeficientes utilizados.

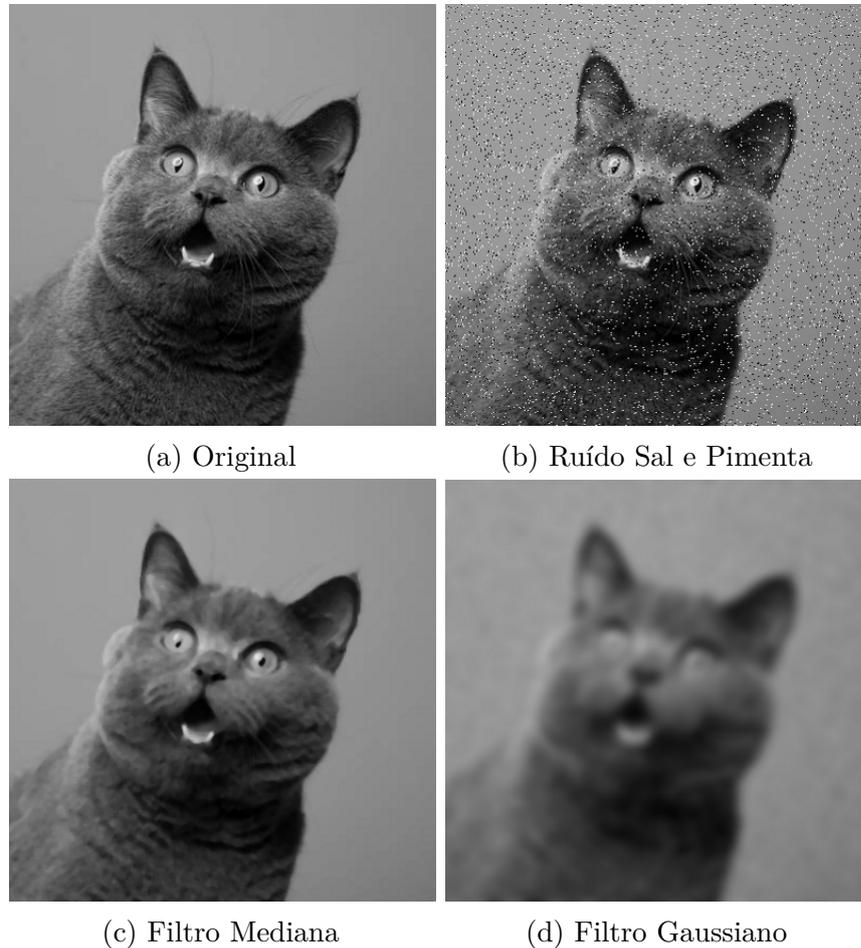


Figura 3.10 – Exemplos de resultados após o processamento utilizando filtros espaciais. Em (b), a densidade de pixel do ruído adicionado é de 0,05; em (c) a janela da máscara é tamanho 5; o valor da variância para o filtro Gaussiano é de 5.

Um dos filtros que geram essa suavização nas imagens é o da mediana. Ele é um filtro não linear que se baseia na substituição do valor do *pixel* em análise pelo valor presente na posição central da lista ordenada dos *pixels* presente na máscara utilizada (mediana). Como resultado, é eficaz em remover ruídos impulsivos (do tipo Sal e pimenta), além de preservar a definição das bordas da imagem tratada. Um exemplo desse filtro pode ser visto na figura 3.10 (c), onde uma imagem com um ruído do tipo Sal e Pimenta (3.10 (b)) foi filtrada, removendo o ruído.

Outro filtro suavizador que é bastante utilizado é o Gaussiano. Utiliza uma função Gaussiana, como presente na equação 3.9, para transformar os *pixels* da imagem, atribuindo pesos maiores para os *pixels* centrais da máscara e menores para os mais distantes.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.9)$$

A implementação do filtro se dá utilizando uma máscara que possua um perfil Gaussiano. Na equação 3.10, pode ser visto um exemplo de uma máscara, com tamanho 3×3 .

$$\text{Máscara} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Assim como o filtro da mediana, também tem a capacidade de preservar bordas enquanto suaviza a imagem. Na figura 3.10 (d), é visto um exemplo de uma imagem após o processamento com um filtro Gaussiano, onde também é visto a remoção de grande parte do ruído, porém menor do que com o filtro da mediana.

3.3.3 Transformada Rápida de Fourier

As séries de Fourier, teoria desenvolvida pelo matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier, é uma ferramenta matemática bastante importante no processamento digital de sinais, em muitos casos facilitando seu processamento. Pode ser definida como uma forma de representar funções que estão no domínio do tempo para o domínio da frequência, obtendo a contribuição que cada frequência gera para a amplitude do sinal, sendo visualizada no espectro do sinal [34].

Pode-se analisar um sinal $f(t)$ utilizando a expansão em série de Fourier utilizando a equação 3.11:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{l=1}^{\infty} a_l \cos\left(\frac{2\pi lt}{T}\right) + b_l \text{sen}\left(\frac{2\pi lt}{T}\right), \quad (3.11)$$

onde a_l e b_l são coeficientes constantes e T é o comprimento do período do sinal. Esses coeficientes podem ser calculados utilizando as equações em 3.12:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt, \\ a_l &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi lt}{T}\right) dt, \quad \forall l \in N \\ b_l &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}\left(\frac{2\pi lt}{T}\right) dt, \quad \forall l \in N \end{aligned} \quad (3.12)$$

Os coeficientes a_l e b_l pode ser convertidos em amplitude e fase, onde:

$$\begin{aligned} A_l &= \sqrt{a_l^2 + b_l^2} \\ \varphi_l &= -\arctan \frac{b_l}{a_l} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Caso o sinal que está sendo estudado seja discreto, é utilizada a transformada discreta de Fourier (*DFT*) para a análise espectral. Neste caso, supondo que o sinal agora seja $f[n]$, com N amostras, a DFT será dada pela equação 3.14:

$$F[k] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad (3.14)$$

onde $F[k]$ é o componente de frequência k do sinal e j é a unidade imaginária.

Porém, quando este sinal é analisado em ambiente computacional, uma alternativa amplamente utilizada é a transformada rápida de Fourier (*FFT*), que é um algoritmo que calcula a transformada de forma mais eficiente, com relação ao custo computacional.

Para as imagens digitais obtidas utilizando a câmera térmica, os sinais utilizados são os valores de temperatura medidos para cada quadro do vídeo em um ponto da imagem. Esses sinais são discretos no tempo, com quantidade de amostras de acordo com a taxa de quadros da câmera vezes o período do sinal de excitação. Aplicando a *FFT*, são obtidas imagens de amplitude e fase a partir do módulo da parte real do resultado da transformada e do ângulo correspondente a parte imaginária do resultado, respectivamente.

3.4 Índices de Similaridade

Quando se trata de análise de imagens digitais, existe uma dificuldade de realizar uma avaliação visual para detectar se uma imagem é melhor ou mais próxima de outra realizando uma análise qualitativa. A área de avaliação de qualidade de imagens (*IQA - Image Quality Assessment*) surge com uma forma de perceber a qualidade de uma imagem ou vídeo e transformar essa avaliação em um índice [25].

Os índices de qualidade de imagem podem ser classificados de acordo com a disponibilidade da imagem original, que não foi distorcida devido a ruídos. A maior quantidade dos índices existentes são os conhecidos como referência completa (*FR - Full Reference*), onde a imagem original é totalmente conhecida. Os outros índices podem ser do tipo referência reduzida (*RR - Reduced Reference*), onde somente uma parte da imagem é conhecida (através de um conjunto de características, por exemplo) ou sem referência (*NR - No-Reference*), onde a imagem padrão não é conhecida [39].

Dentre os diversos índices existentes, destacam-se os índices de similaridade estrutural (*SSIM*) e sua versão multi-escala (*MS-SSIM*). O *SSIM* é uma métrica que, diferente do erro quadrático médio ou relação sinal-ruído, os quais tratam cada ponto da imagem de forma independente, busca mudanças nas estruturas locais da imagem, utilizando para isso critérios como luminância e contraste. Esses índices realizam o comparativo entre duas imagens e possuem valores entre 0 e 1, onde 0 significa que as imagens são totalmente dissimilares e 1 significa que são equivalentes.

A fórmula geral do *SSIM* pode ser escrita de acordo com a equação 3.15a, para dois sinais (imagens) x e y :

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (3.15a)$$

onde:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad (3.15b)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad (3.15c)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (3.15d)$$

Nas equações, os termos μ_x e μ_y são as médias das intensidades dos *pixels* nas imagens x e y , σ_x e σ_y são os desvios padrões de x e y e σ_{xy} é a covariância entre as imagens. C_1 , C_2 e C_3 são constantes, sendo que o valor padrão de $C_3 = C_2/2$.

Os componentes $l(x, y)$, $c(x, y)$ e $s(x, y)$ são denominados luminância, contraste e estrutura, respectivamente. A luminância mede a similaridade do brilho entre as duas imagens, o contraste compara a variação de contraste e a estrutura avalia a similaridade das estruturas locais.

Em geral, os índices $\alpha = \beta = \gamma = 1$, dessa forma, a equação 3.15a pode ser simplificada como apresenta na equação 3.16.

$$\begin{aligned} SSIM(x, y) &= [l(x, y)] \cdot [c(x, y)] \cdot [s(x, y)] \\ &= \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

que satisfazem as seguintes condições:

1. Simetria: $SSIM(x, y) = SSIM(y, x)$;
2. Limitado: $SSIM(x, y) < 1$;
3. Único valor máximo: $SSIM(x, y) = 1$ se e apenas se $x = y$.

O algoritmo do *SSIM* utiliza uma abordagem de janelas deslizantes. Uma janela que, geralmente, possui tamanho de 8 x 8 ou 11 x 11 *pixels* é aplicada em toda a imagem, calculando o índice para cada ponto da janela. É calculada uma média de todos os índices obtidos para cada janela, obtendo o valor final do índice.

3.4.1 Multi-Scale Structured Similarity

O índice de similaridade estrutural multi-escala (*MS-SSIM - Multi-scale Structural Similarity Index*) é uma métrica de qualidade de imagens baseada na métrica *SSIM* porém, analisando múltiplas escalas. Ele permite uma análise mais robusta da imagem, pelo fato de se fazer uma análise levando em conta detalhes que podem ser obtidos em diversos níveis de resolução.

Neste índice, são utilizados os mesmos conceitos de luminância, contraste e estrutura. Contudo, são efetuadas etapas de filtragem (utilizando um filtro passa-baixas) e subamostragem (em escalas de 2, até um valor máximo M) obtendo imagens em diversas resoluções. Para cada escala, são calculados os índices *SSIM* que, combinados, produzem o valor do *MS-SSIM*.

A equação do índice é descrita conforme:

$$MS - SSIM(x, y) = [l_M(x, y)]^{\alpha_M} \prod_{j=1}^M [c_j(x, y)]^{\beta_j} \cdot [s_j(x, y)]^{\gamma_j} \quad (3.17)$$

Onde:

- $l_{M(x,y)}$ é o comparativo de luminosidade, calculado apenas na escala M ;
- $c_j(x, y)$ e $s_j(x, y)$ são os comparativos de contraste e estrutura na j – ésima escala, respectivamente;
- α_M , β_j e γ_j são pesos utilizados para ajustar a contribuição dos componentes;
- M é o número de escalas utilizadas na obtenção do índice.

O uso desse índice tende a fornecer uma comparação mais robusta com relação ao índice *SSIM*, referente a variação das condições de visualização da imagem e de acordo com a escolha dos parâmetros adequados [40]. Em Wang, Simoncelli e Bovik [40], utilizando um procedimento de calibração dos pesos α_M , β_j e γ_j , com diversos tipos de imagens (faces, paisagens, plantas, objetos, etc.) foram obtidos, para $M = 5$, os valores de $\beta_1 = \gamma_1 = 0,0448$; $\beta_2 = \gamma_2 = 0,2856$; $\beta_3 = \gamma_3 = 0,3001$; $\beta_4 = \gamma_4 = 0,2363$; $\alpha_5 = \beta_2 = \gamma_2 = 0,1333$.

3.5 Ajuste de modelo para dados

O Ajuste de curvas (*Curve Fitting*) é um método que consiste em encontrar uma descrição matemática mais próxima possível para um conjunto de dados. Essa definição de proximidade se dá através de algum critério, como por exemplo o erro quadrático médio. O ajuste de curvas pode ser feito de três formas principais:

- Interpolação, onde é preciso que o ajuste seja exato aos dados;
- Suavização, que envolve a criação de uma função suave que se aproxima dos dados;
- Análise de regressão, que se concentra mais em questões de inferência estatística.

Considerando um caso simples, onde existem um conjunto de dados $y_k, k = 1..M$ que são saídas de uma função de uma variável independente x nos pontos x_k . Busca-se uma função de ajuste f que descreva esses dados de forma aproximada, como na equação 3.18 .

$$y_k \approx f(a_0, a_1, \dots, a_n, x_k) \quad (3.18)$$

Para isso, é necessário encontrar os parâmetros ajustáveis $a_i, i = 0..n$ que melhor aproximem essa função, minimizando uma métrica apropriada. No ajuste de curva utilizando o método dos mínimos quadrados, presente no *software* MATLAB [41], é utilizada a soma quadrática dos resíduos, como na equação 3.19.

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.19)$$

onde \hat{y}_i são os valores ajustados e n a quantidade de dados.

Para ajustar um modelo não linear aos dados, uma solução é utilizar os mínimos quadrados não lineares para obter os coeficientes. Um modelo não linear pode ser descrito pela equação matricial 3.20 [41].

$$y = f(X, \beta) + \epsilon \quad (3.20)$$

onde: y é um vetor linha de saídas de tamanho n , X é a matriz de delineamento do modelo com tamanho n por m , β é um vetor linha de tamanho m dos coeficientes e ϵ é um vetor linha de tamanho n dos erros.

No entanto, esse tipo de modelo é mais difícil de ajustar do que o linear, sendo necessário uma série de iterações para obter os coeficientes, como descrito a seguir [41]:

1. Fornecer uma estimativa inicial para os coeficientes;
2. Ajustar o modelo $\hat{y} = f(X, b)$ e obter uma curva de resposta para esse conjunto de coeficientes, calculando o jacobiano de $f(X, b)$;
3. Atualize os coeficientes utilizando um algoritmo de otimização, que verifica se o ajuste realizado se aproximou dos dados reais;

4. Faça mais uma iteração, voltando para o passo 2, até que o ajuste atinja o critério de parada.

Para verificar a qualidade do ajuste, alguns critérios podem ser utilizados, tanto para modelos lineares quanto não lineares. Esses critérios podem ser gráficos (resíduos, por exemplo) ou numéricos (erro quadrático médio), sendo recomendado seu uso em conjunto para uma melhor avaliação [41].

Dentre esses critérios, dois utilizados neste trabalho são o coeficiente de determinação R^2 e o erro quadrático médio ($RMSE$). O R^2 é uma medida estatística que indica o quanto que o ajuste conseguiu explicar a variação dos dados. Ele pode ser definido pela equação 3.21.

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad (3.21)$$

sendo SQ_{res} definida na equação 3.19, $SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ e \bar{y} a média das observações.

Dessa forma, o R^2 varia entre 0 e 1, sendo que o valor próximo de 1 indica um ajuste melhor dos dados a função definida.

Já o erro quadrático médio é uma estatística que indica o erro da regressão, ou seja, quanto os dados ajustados se desviaram dos dados reais. Para tanto, utiliza-se a equação 3.22, onde quanto mais próximo de 0 o valor se encontra, melhor o ajuste realizado.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} = \sqrt{\frac{SQ_{res}}{n}} \quad (3.22)$$

Tendo em vista estes conceitos apresentados neste capítulo, além dos estudos dos trabalhos presentes na revisão bibliográfica, busca-se desenvolver uma metodologia para estudar o comportamento dos ensaios de termografia ativa modulada em célula fotovoltaicas durante o regime transiente, para verificar uma forma de redução do tempo dos ensaios.

4 Metodologia

Neste capítulo, é apresentado o método utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. Baseado nas informações obtidas através da revisão bibliográfica e no referencial teórico sobre o tema, define-se um procedimento para ensaios de termografia ativa modulada em células fotovoltaicas. Utilizando dados obtidos no regime transitório, busca-se diminuir o tempo de ensaio.

Na figura 4.1, é possível observar um diagrama de blocos que indica como as etapas foram inicialmente definidas para esse trabalho.

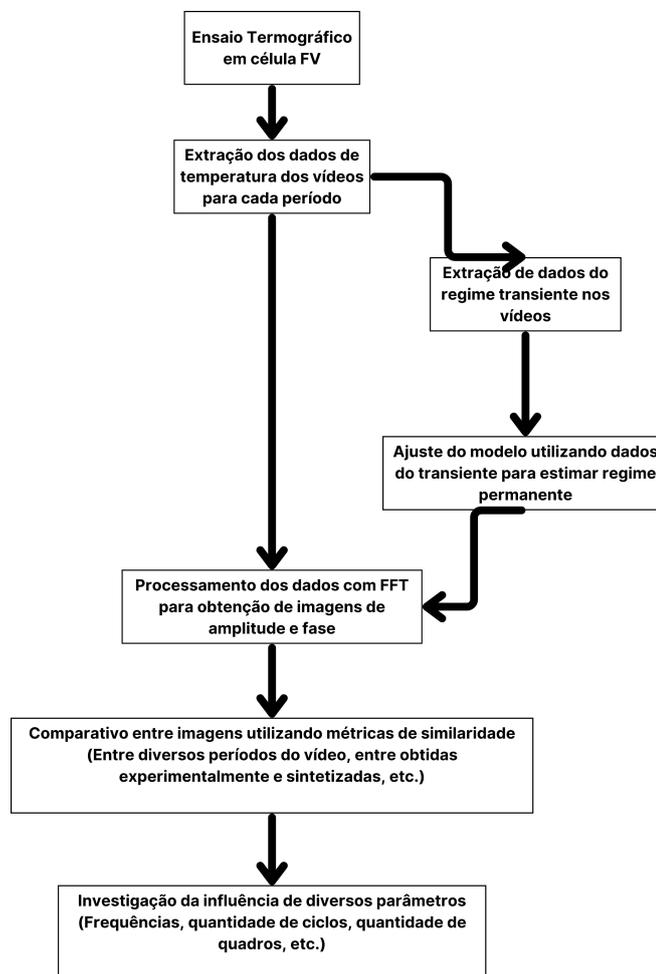


Figura 4.1 – Diagrama de blocos com o método utilizado para desenvolver o trabalho

Para tanto, nas próximas seções serão apresentados os procedimentos para realizar os ensaios termográficos nas células fotovoltaicas, a extração e processamento dos dados provenientes dos vídeos obtidos nos ensaios. Busca-se, com isso, viabilizar o uso das informações contidas no transiente térmico na obtenção de imagens que também indiquem o comportamento térmico da célula, através de posterior análise, comparativos e ajuste de

modelos com os resultados encontrados.

4.1 Arranjo dos ensaios termográficos

Para realizar os ensaios de termografia ativa modulada, faz-se necessário preparar um arranjo experimental com a presença de equipamentos de medição, células fotovoltaicas, circuitos eletrônicos auxiliares e uma câmara escura. Na figura 4.2, é possível visualizar um esquemático do arranjo experimental definido, baseado no trabalho desenvolvido em Vieira[28], com indicações sobre cada item do processo. A seguir, essas partes serão descritas em detalhes.

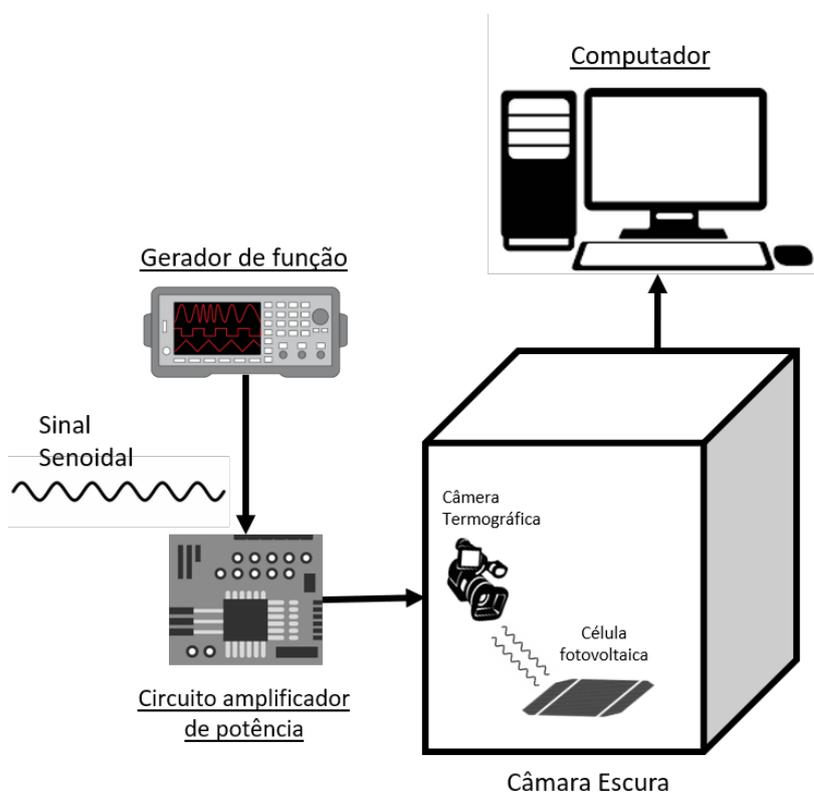


Figura 4.2 – Representação de um esquemático do arranjo experimental definido para os ensaios de termografia ativa modulada

Foram utilizadas células fotovoltaicas monocristalinas, modelo C60 da fabricante *SunPower*TM, de 3,4 W de potência e dimensões de 12,5 x 12,5 cm, representadas na figura 4.3. Essas células possuem uma corrente de curto-circuito (I_{CC}) de 6,27 A e tensão de circuito aberto (V_{CA}) de 0,68 V. Também apresentam linhas de grade traseiras e seis terminais de interconexão, também na parte traseira, sendo três positivos em um lado e três negativos no lado oposto. As células utilizadas foram separadas em modelos saudáveis e defeituosas, de acordo com ensaios de eletroluminescência realizados para identificar falhas internas. Na seção 4.2 este procedimento será abordado em mais detalhes.

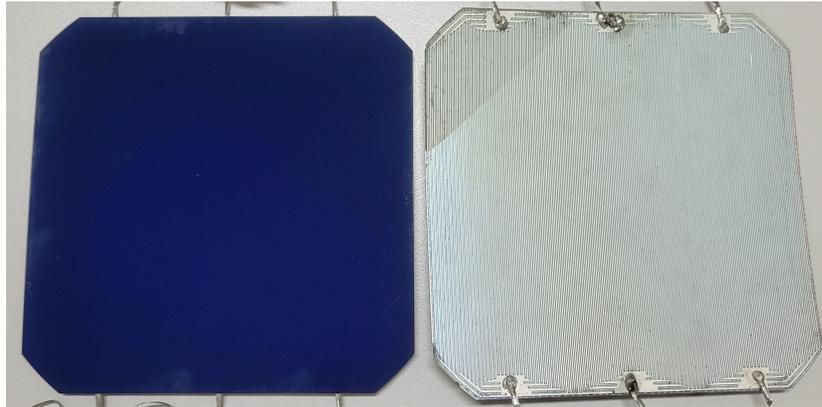


Figura 4.3 – Célula fotovoltaica da *SunPower*, modelo C60 (frente e verso), com suas seis interconexões na parte traseira (três superiores e três inferiores).

Foi utilizada uma câmara escura para realização dos ensaios *DLIT*, conforme é visto na figura 4.4. O objetivo de seu uso foi para evitar interferências de radiações eletromagnéticas, alterando o funcionamento da célula devido à luz ou alterando a temperatura da célula sem ser pelo efeito da corrente induzida pelo ensaio. Ela é feita de madeira e possui dimensões de 132 cm x 76 cm x 73 cm (altura total, incluindo as rodas, x comprimento x largura), além de ser toda pintada com tinta preta fosca internamente.



Figura 4.4 – Câmara escura utilizada para os ensaios *DLIT*.

Internamente, existe uma plataforma, de altura ajustável, onde é possível fixar a câmera termográfica utilizando uma base de ajuste. Na figura 4.5, é possível observar uma representação de como serão os ensaios utilizando este arranjo físico e os detalhes internos

da câmara.

Para os ensaios, a célula fotovoltaica deverá ser posicionada no interior da câmara escura, com a câmara inclinada e a uma distância fixa de aproximadamente 40 cm (distância mínima focal da câmara termográfica utilizada), sendo direcionada para a face da célula. A câmara é fixada através de um suporte, conforme visto na figura 4.6, de forma a impedir a movimentação da câmara durante o ensaio e permitir uma maior padronização do posicionamento da célula nos vídeos.

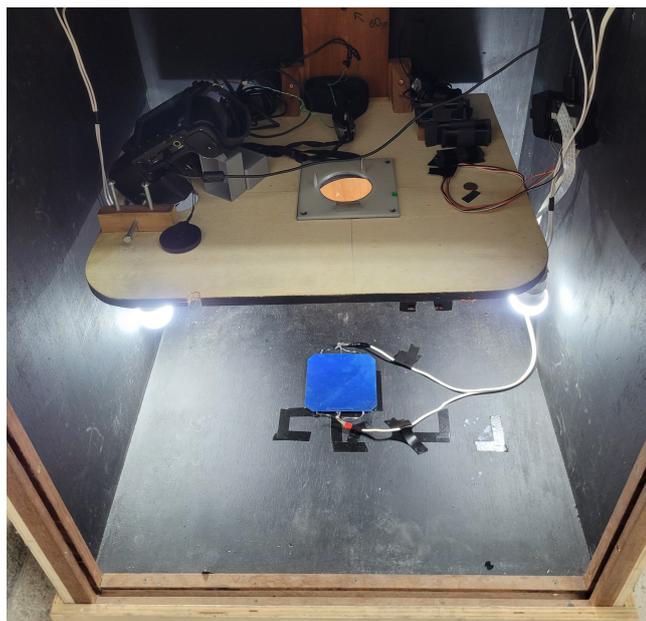


Figura 4.5 – Câmera escura sendo ajustada para realização dos ensaios nas células fotovoltaicas.



Figura 4.6 – Suporte desenvolvido para fixação da câmera, buscando padronizar os ensaios.

Para gerar um perfil de aquecimento na célula, é necessário inserir um sinal de tensão de excitação que induz uma corrente elétrica modulada pela célula. Para tanto, foi

utilizado um gerador de funções (modelo *Keysight 33250*) para fornecer um sinal senoidal, configurando seus valores de amplitude, frequência e *offset*. Além disso, faz-se necessário utilizar um circuito amplificador de potência para conseguir fornecer a potência necessária na polarização adequada da célula, pois o gerador tem uma limitação de corrente e não permite excitar a célula corretamente apenas com o sinal proveniente dele. Portanto, foi desenvolvido um circuito *buffer* do tipo *push-pull* em uma placa de circuito impresso (figura 4.7), que mantém a tensão de saída no mesmo formato que a tensão de entrada porém com transistores para dar ganho de corrente para os valores positivos ou negativos de excitação.

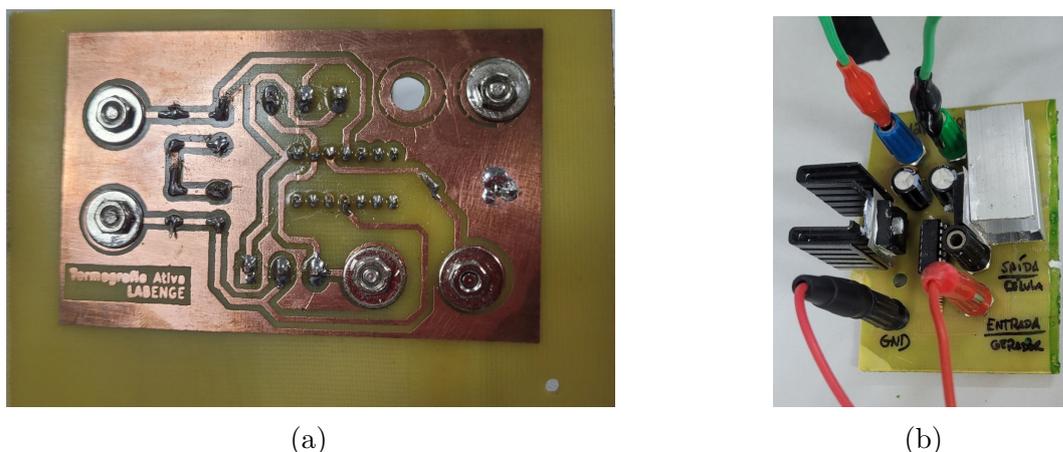
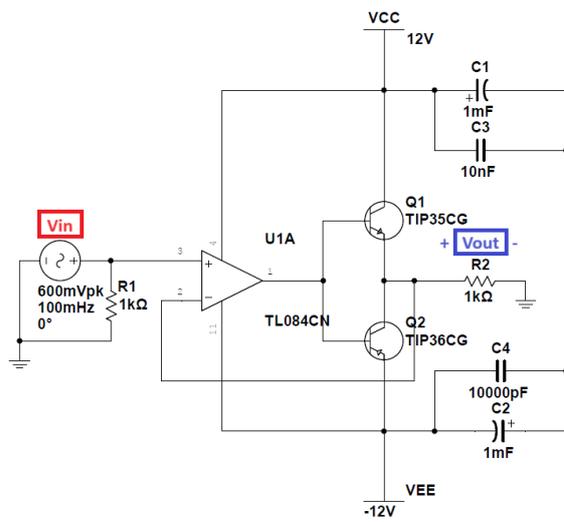


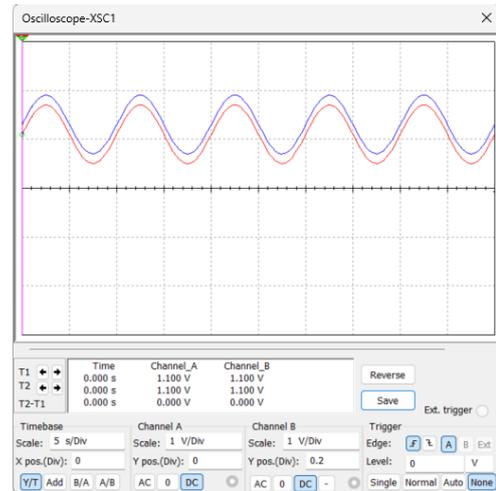
Figura 4.7 – Ilustração da placa de circuito impresso produzida para o circuito amplificador de potência. Vista inferior (a) e vista superior (com os componentes soldados e conexões) (b).

O circuito foi montado baseado no esquemático presente na figura 4.8 (a). Uma tensão de entrada V_{IN} (na figura, em vermelho) é introduzida na entrada não-inversora do amplificador operacional, configurado como *buffer*. O sinal de saída desse amplificador será aplicado na base de dois transistores, permitindo que a saída V_{OUT} (na figura, em azul) do circuito possua o mesmo formato de onda da entrada (como pode ser visto na figura 4.8 (b), onde são representados os sinais obtidos com uma simulação do circuito no *software* Multisim 13), porém com a alimentação proveniente dos transistores (durante o semiciclo positivo da onda de entrada, pelo transistor NPN e no semi ciclo negativo, pelo transistor PNP). Foram utilizados os transistores TIP35CN e TIP36CN e o TL084 como amplificador operacional. Todos os materiais utilizados estão listados na tabela 1.

O ensaio é captado utilizando uma câmera termográfica modelo FLIR T420, com resolução máxima de 320×240 (76800 pixels), que registra 30 quadros (*frames*) por segundo, mede valores de temperatura entre -20°C até 1200°C , possui sensibilidade térmica $<0,045^{\circ}\text{C}$ a 30°C e a faixa espectral de 7,5 a $13\mu\text{m}$. Utilizando a conexão *USB* da câmera com um computador, é possível controlar funções da câmera remotamente, como por exemplo, o início e término do vídeo ou foco automático, além de ter uma visualização da imagem observada em tempo real, através da interface FLIR ATLAS SDK para o software



(a) Esquemático



(b) Formas de onda de entrada (em vermelho) e saída, 600 mV de tensão, 1,1V de Amplitude e 100 mHz de frequência

Figura 4.8 – Circuito *buffer push-pull* utilizado nos ensaios. A diferença entre as ondas em (b) ocorreu devido ao ajuste no osciloscópio para poder visualizá-las ao mesmo tempo, adaptado de [28].

Tabela 4.1 – Materiais e componentes utilizados para o circuito de potência para excitação da célula.

Materiais/Componentes Eletrônicos	Quantidade
Placa de fibra de vidro	1
Transistor TIP35CN (<i>NPN</i>)	1
Transistor TIP36CN (<i>PNP</i>)	1
Amplificador Operacional TL084	1
Resistor 1 k Ω	1
Capacitor Eletrolítico 1000 uF	2
Capacitor cerâmico 10 nF	2
Dissipador de calor	2
Conector tipo borne	6

MATLAB®. O computador utilizado nos ensaios apresenta um processador Intel Xeon E3-1240 v3 @ 3.40GHz, memória RAM de 32 GB, sistema operacional Windows 10 e o software MATLAB®, versão R2018b.

4.2 Ensaios realizados e análise dos parâmetros

Tendo em vista as informações sobre o arranjo experimental, foram definidos que experimentos seriam feitos utilizando três células diferentes, uma considerada saudável (sem defeitos aparentes) e outras duas consideradas defeituosas, sendo uma delas com um defeito localizado (chamada de defeituosa - 2) e a outra com vários defeitos espalhados por toda a célula (defeituosa - 3). As informações sobre os defeitos foram obtidas através da

análise de imagens de eletroluminescência dessas células, onde regiões escuras indicam a inoperância da célula nesses locais devido a presença de defeitos enquanto que áreas claras indicam que a célula continua em funcionamento. Na figura 4.9 estão representadas as células utilizadas além de suas respectivas imagens de eletroluminescência.

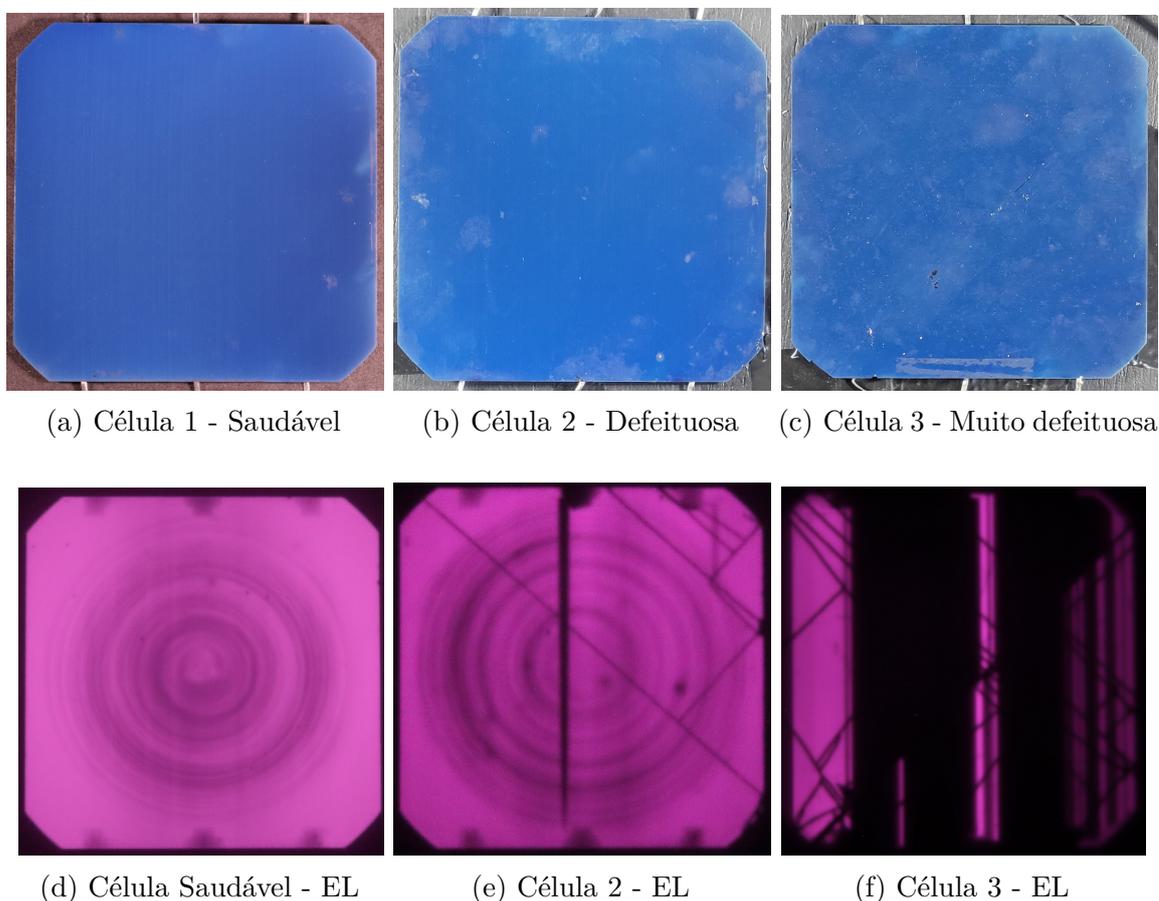


Figura 4.9 – Imagens das células utilizadas nos experimentos, sendo elas visíveis em (a), (b) e (c) e por eletroluminescência em (d), (e) e (f), conforme procedimento presente em [30]

As imagens de eletroluminescência foram obtidas através de um ensaio utilizando a câmara escura, porém com uma câmera (modelo Canon EOS Rebel SL3) adaptada para o ensaio, com o filtro IR removido para detectar os fótons emitidos ao se excitar a célula com um sinal de corrente, que estão na faixa de comprimento de onda do infravermelho. Foi utilizada 80% da corrente de curto de circuito da célula (5 amperes), com tempo de exposição e ISO da câmera definidos de forma diferente para cada uma, em busca de obter a imagem de acordo com o funcionamento das mesmas.

Os experimentos com termografia foram realizados utilizando sinais senoidais com valores de amplitude e *offset* fixos (0,6 e 1,1 Volts, respectivamente) como sinal de excitação. Esses valores foram escolhidos para permitir que a resposta da célula esteja em uma região do comportamento da curva I-V próximo do linear ($\Delta x \approx \Delta y$, como mostrado na figura 4.10), impedindo o aparecimento de distorções no sinal de saída da célula. Na figura 4.11

é possível verificar a diferença entre as respostas da célula quando excitada com valores nessa região e fora dela.

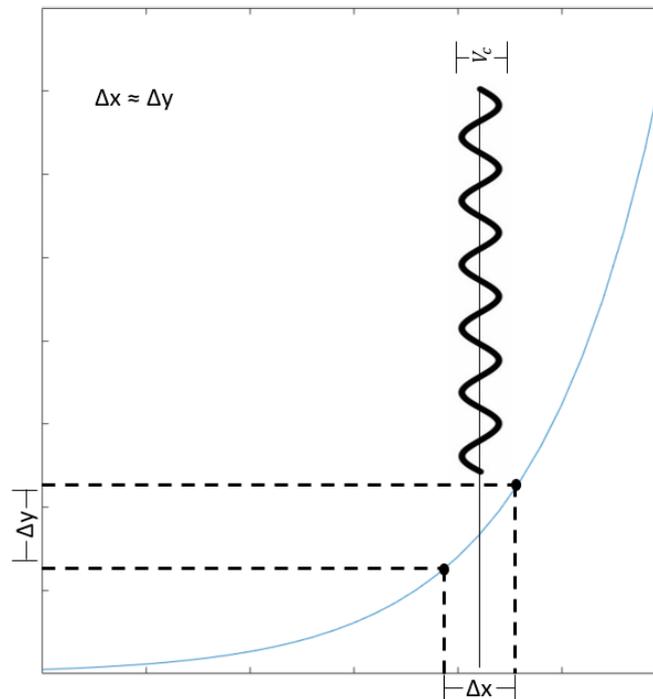
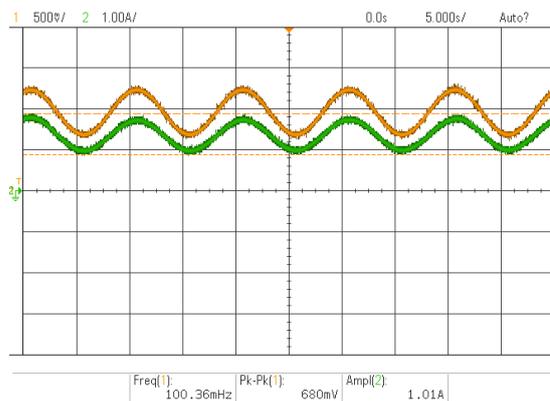
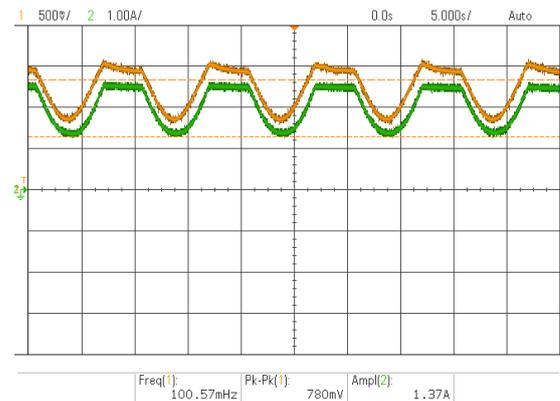


Figura 4.10 – Gráfico representando o sinal de excitação da célula em relação a curva I-V. O sinal possui uma tensão de pico a pico V_c (duas vezes o valor de amplitude) e a frequência definida pelo ensaio.



(a) Amplitude=0.6V, *offset*=1.1V



(b) Amplitude=1V, *offset*=1.5V

Figura 4.11 – Medições dos sinais de tensão (em amarelo) e corrente (em verde) em uma célula fotovoltaica de acordo com seu sinal excitação. Em (a), excitação na região da curva quase linear, em (b), na região não linear.

Além do ajuste dos valores de amplitude e *offset* do sinal de excitação, também se faz necessário configurar a frequência desses sinais. A escolha desses valores foi no sentido de verificar a influência da frequência na detecção do defeito e na resolução que ele apresenta na imagem. Dessa forma, três valores de frequência de excitação foram utilizados

nos ensaios, sendo eles 11 mHz, 50 mHz e 100 mHz. Em cada desses valores, foram feitos cinco experimentos diferentes para cada célula, em um total de 45 ensaios.

Também se faz necessário a configuração da câmera termográfica para o ensaio. Para tanto, calibra-se o valor da emissividade na câmera para obter o valor correto de temperatura, procedimento feito com base no manual da câmera e baseado na norma ABNT [42], obtendo um valor de 0,74. Além disso, é necessário ajustar o foco da câmera, para permitir uma avaliação mais precisa. Isso é feito através de um botão na parte superior da câmera, que possui um controle fino do ajuste ao deslizar para os lados como também uma função de autofocus ao apertar o botão. O ajuste do foco também pode ser feito de forma remota pelo computador.

Os ensaios tiveram uma duração fixa total de 55 minutos cada um. Foi verificado, tanto na literatura [21], [43] quanto em testes, que o tempo para que a célula atinja o estado estável de temperatura é de, aproximadamente, 45 minutos. Sendo assim, o tempo total escolhido teve esse valor maior para garantir que o regime estável tenha sido obtido com alguma margem, de forma a identificar o melhor período para gerar a imagem, caso o último período apresentasse algum problema. Na figura 4.12 é possível visualizar um gráfico mostrando o processo de aquecimento para as três células deste trabalho.

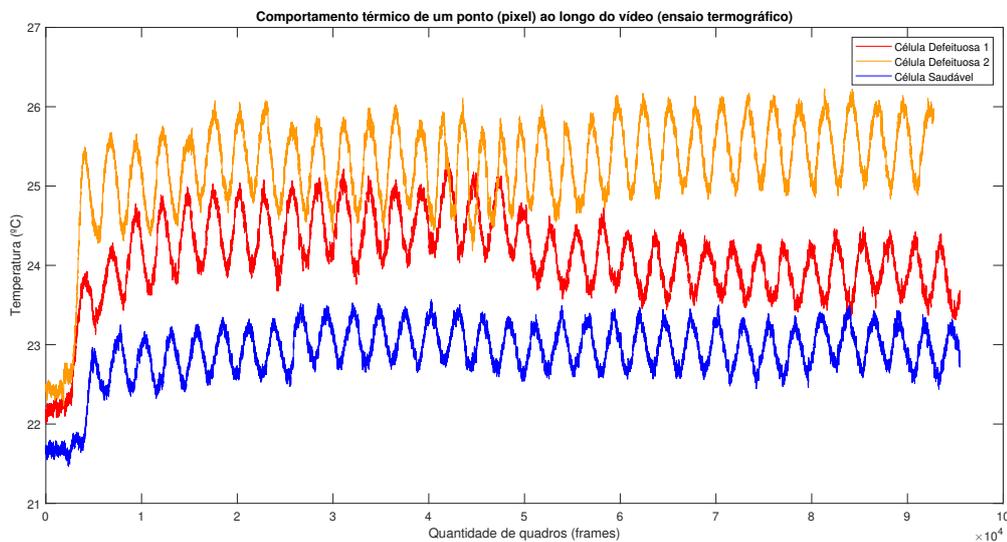


Figura 4.12 – Gráfico com os valores de temperatura de um ponto (*pixel*) ao longo dos termogramas.

Outro ponto sobre o tempo de ensaio é que a parte inicial do vídeo é filmada sem a excitação da célula acontecendo. De acordo com a frequência de excitação (11, 50 ou 100 mHz), o equivalente à o primeiro período do vídeo (90, 20 e 10 s, respectivamente) são gravados porém com a excitação da célula desligada. Isso é feito apenas para controlar melhor o momento que se inicia o aquecimento e facilitar o processamento posterior.

4.2.1 Extração de dados dos vídeos termográficos

Para extração dos dados termográficos obtidos com a câmera infravermelha, faz-se necessário a utilização de um kit de desenvolvimento da fabricante, o FLIR Atlas SDK, que permite a comunicação, transmissão de dados e gravação através de uma interface USB, fornecendo acesso aos dados radiométricos de cada pixel e permitindo a criação de soluções adaptadas para os usuários [44]. Foi utilizado o FLIR Atlas SDK para MATLAB®, que possui um exemplo de uma interface para visualização e gravação de vídeos, conforme é possível ver na figura 4.13. Com essa interface, foi possível fazer as gravações de acordo com as configurações listadas na seção 4.2, no formato de arquivo ".seq".

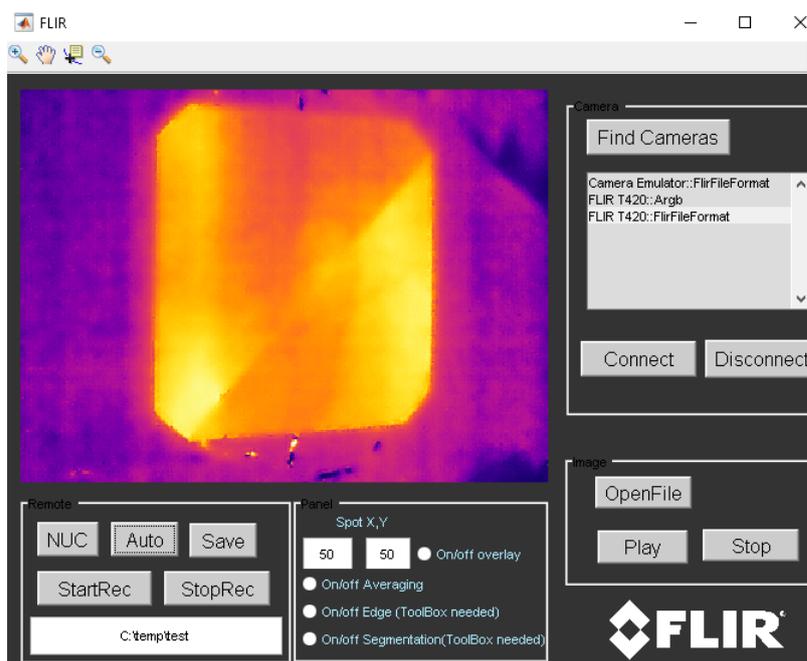


Figura 4.13 – Interface para controle da câmera termográfica através do computador

Os vídeos registrados permitem obter uma visualização do comportamento térmico na superfície das células e necessitam de um processamento para poder fornecer as informações sobre defeitos esperados neste trabalho. Como primeiro passo, para processar esses vídeos termográficos gerados e obter os valores de temperatura, é necessário desenvolver um código no ambiente do MATLAB pra extrair essas informações. Para tanto, desenvolveu-se um algoritmo conforme descrito a seguir, utilizando duas funções: uma para gerar matrizes de temperatura a partir do vídeo original e outra para segmentar a imagem, mantendo apenas a região da célula que é de interesse para a avaliação.

1. Insere-se, de acordo com o ensaio a ser analisado, o valor de frequência f_L do mesmo e, em seguida, é chamada a função *geraMAs* para gerar as matrizes de temperatura utilizando f_L como parâmetro de entrada;

- a) Nessa função, é escolhido o arquivo do vídeo e, de acordo com o valor de f_L , é feita uma iteração para dividir todo o vídeo em pedaços do tamanho do período do sinal de excitação da célula (t_L), chamado de $nPeriodos$;
 - i. Exemplo: Um vídeo de 55 minutos de um ensaio utilizando 11 mHz de frequência de excitação possui 3300 segundos e, dividido por 90 segundos (t_L , para 90s), são obtidos 36 períodos ($nPeriodos$) nesse vídeo;
 - b) Em cada iteração, a informação de um período da onda é recortada do vídeo total, sendo criada uma matriz tridimensional do tamanho da resolução da câmera (320x240) e na terceira dimensão, a quantidade de quadros existentes em um período do sinal de excitação ($t_L \times f_{fr}$, sendo f_{fr} a taxa de quadros);
 - c) No final de cada iteração, essa matriz tridimensional é salva em um arquivo de extensão .mat com o nome do respectivo período;
2. Em seguida, uma iteração será feita, de acordo com a quantidade de arquivos ($nPeriodos$) gerados;
 3. Essa iteração ocorre em ordem decrescente, começando do último período do vídeo ($nPeriodos$). É utilizada uma função para segmentar a matriz de temperatura, recortando apenas a área da célula dos dados;
 - a) Nessa função de segmentação, é selecionado um quadro do período para a avaliação. Ele é transformado de matriz de temperatura em uma imagem em escala de cinza, depois calculado e aplicado o limiar de Otsu para selecionar apenas a região da célula, indicando o restante da imagem como fundo. Após isso, a imagem é binarizada;
 - b) Para evitar o aparecimento de algumas áreas no mesmo padrão de cor da célula nas partes superior e inferior da imagem, provenientes dos cabos de energia, é feita uma estratégia para detectar pontos da cor da célula (branco) na parte superior e inferior da imagem. Utilizando esses pontos, uma reta é interpolada e a região acima dessa reta é transformada em preto (fundo da imagem). O mesmo procedimento é feito para a parte inferior da imagem;
 - c) Por fim, a região obtida com essa máscara é aplicada na matriz de temperatura original, selecionando somente os valores presentes na área da célula e colocando como valor zero de temperatura os pontos restantes. O arquivo da máscara e da matriz modificada são salvos também na extensão .mat. Um exemplo do resultado pode ser visto na figura (4.14);
 4. Gerada essa máscara, a cada iteração ela é utilizada para encontrar a matriz de temperatura segmentada para cada período do vídeo. A cada iteração, essa matriz é salva com o nome do respectivo período em questão para posterior processamento.



Figura 4.14 – Segmentação da área da célula utilizando método do limiar de Otsu. (a) Imagem em tons de cinza dos dados radiométricos do ensaio, (b) Máscara para segmentação da célula.

4.2.2 Aplicação da técnica de processamento dos dados - FFT

Obtidas as matrizes de temperatura, torna-se possível aplicar técnicas de processamento para identificar os defeitos nas células, obtendo as imagens de amplitude e fase utilizadas para tal fim. Nesse trabalho, foi utilizada a técnica da transformada rápida de Fourier - *FFT*.

Para o método do *FFT*, o algoritmo foi desenvolvido da seguinte forma:

1. De início, é criada uma iteração para aplicar a técnica em todos os arquivos gerados na extração dos dados termográficos do ensaio. E em cada passo, são abertos os arquivos com a matriz de temperatura do período em análise e a máscara para dar início ao processamento;
2. Em seguida, é feito um pré-processamento dos dados. São obtidas informações sobre essas matrizes (dimensões) e a matriz de temperatura é modificada para ter apenas duas dimensões, por ser uma restrição da função do MATLAB para aplicar a técnica, além de normalizar os dados retirando o valor médio de toda a matriz;
3. Após esse passo, é aplicada a *FFT* na matriz. Foi utilizada a função *fft()* do MATLAB®, pelo fato de ser feita a transformada em uma dimensão, ao longo dos quadros salvos no vídeo para um *pixel* em específico. Em seguida, os valores de magnitude e fase são obtidos utilizando as funções de valor absoluto, *abs()*, e ângulo, *angle()*, no resultado da *FFT*;
4. As matrizes da magnitude e fase são alteradas novamente para ter as três dimensões originais da matriz de temperatura e, de acordo com o espectro de amplitude, é escolhido o quadro que possui maior influência para obter a imagem de amplitude e fase;
5. Com relação a imagem de fase, em alguns casos durante o processamento, a imagem apareceu saturada. Caso o valor de fase atual de um pixel seja muito maior do que o

valor do pixel vizinho anterior, ocorre que chegou no limite do domínio da função utilizada, que é de $-\pi$ até π . Dessa forma, é utilizada a função $wrapTo2Pi()$ para mudar esse domínio, convertendo para o intervalo de 0 até 2π , que geralmente corrige esse problema;

6. Em seguida, são realizados dois ajustes para melhor visualização das imagens. Primeiro, são definidos os valores limites inferior e superior a serem utilizados nas matrizes para melhorar o contraste das imagens. Isso é feito selecionando apenas os valores que estejam entre o valor médio ± 2 vezes o desvio padrão, de acordo com os *pixels* presentes no intervalo da máscara criada, seja para o limite superior ou inferior, respectivamente. Isso é feito nas duas imagens (amplitude e fase);
7. O outro passo é uma transformação geométrica para planificar a imagem da célula. São informados quatro pontos, um de cada uma das bordas da projeção, e utilizada uma função que realiza uma transformação geométrica, para ajustar a imagem da célula;
8. Por fim, são salvas as imagens de amplitude e fase, além dos limites encontrados para melhorar o contraste, para cada período do vídeo.

Na figura 4.15, é possível ver um exemplo das imagens obtidas com a utilização desse algoritmo.

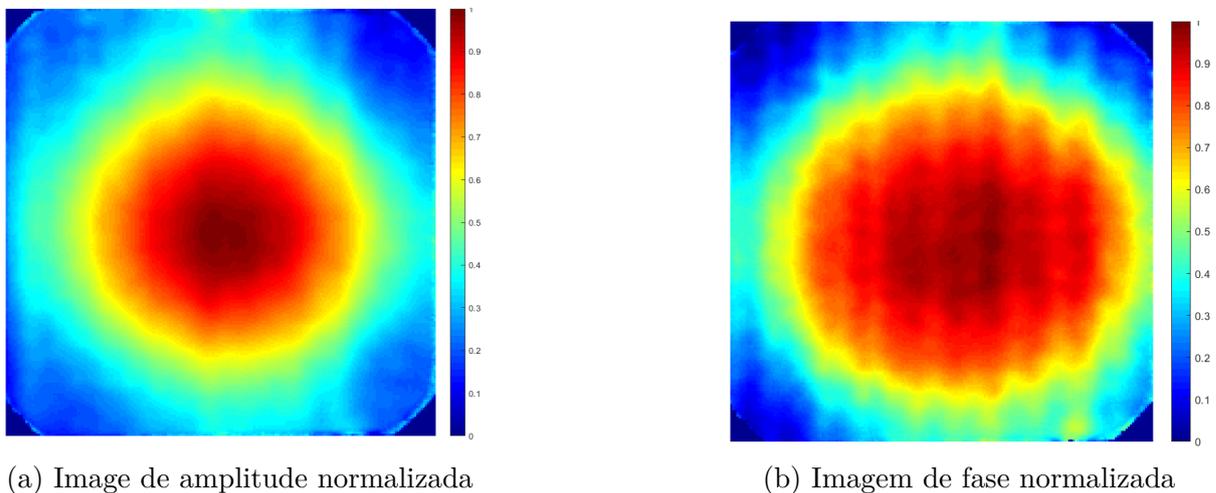


Figura 4.15 – Exemplo de imagens geradas após o final do processamento com a técnica da *FFT*

4.2.3 Técnicas e critérios para comparativo de imagens entre os períodos do vídeo

Obtidas as imagens de amplitude e fase, com as técnicas relatadas anteriormente, é possível fazer análises entre elas utilizando técnicas para o comparativo de imagens. Nesse

trabalho, as técnicas utilizadas são a *SSIM* e *MS-SSIM*, índices relatados em [Sapieta et al.\[24\]](#) como bons indicadores para esse tipo de comparação.

O uso dessas métricas foi feito através das funções *ssim()* e *multissim()* existentes no MATLAB®. Elas geram um valor global do índice para toda imagem como também um mapa dos valores para cada ponto, permitindo entender quais áreas houve maior divergência de uma imagem para a outra. Utilizando essas funções, foi desenvolvido um algoritmo para comparar diversas imagens, indicando os índices obtidos e podendo avaliar o efeito da alteração dos parâmetros nas imagens geradas:

1. Inicializam-se variáveis que serão modificadas em cada passo da iteração para abrir e comparar as imagens;
2. Em seguida, é feita uma iteração, para abrir todas as imagens e salvar em uma variável. Após abrir uma imagem, é aplicado um filtro de mediana ou Gaussiano nela para remoção de ruído e melhorar a comparação;
3. Após esse passo, é feito o comparativo com base nas técnicas listadas, utilizando a imagem do último período do vídeo como referência. No entanto, em alguns vídeos, a última imagem pode apresentar alguns problemas e, nesse caso, é procurada uma imagem obtida em algum período no regime estável para servir como a referência na comparação;
4. Por fim, são calculadas médias dos índices e demonstrado um gráfico com os valores dos índices e do valor médio para as imagens em estudo;

Neste trabalho, os comparativos entre as imagens são utilizados para verificar a influência dos parâmetros nos ensaios, permitindo uma análise entre as imagens geradas ao longo do vídeo e, principalmente, durante o transitório, além da influência entre a quantidade de períodos utilizados para gerar uma imagem. Filtros espaciais são utilizados para evitar que ruídos que não influenciem na detecção do defeito prejudiquem a comparação entre as imagens.

Para verificar a influência da quantidade de períodos utilizada, foram geradas imagens concatenando de 2 até 5 períodos subsequentes do vídeo, tanto no transitório quanto no regime permanente e geradas imagens de fase e amplitude para comparação.

Na tabela 4.2 são listados os parâmetros a serem modificados, os valores e o que é buscado na investigação deles, além do método utilizado.

Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados para investigar sua influência nas imagens geradas nos ensaios DLIT

Parâmetro avaliado	Valores	Objetivo	Método
Filtros Espaciais	Mediana (Máscara 5x5) e Gaussiano ($\sigma = 5$)	Verificar diferenças entre as imagens geradas utilizando os filtros listados	Comparação entre imagens processadas com cada filtro, para o mesmo período do vídeo
Períodos do vídeo	35 (11 mHz), 164 (50 mHz) e 328 (100 mHz)	Diferenças entre imagens em diversos instantes do vídeo (transitório)	Imagem de cada período do vídeo comparada com a imagem representativa no regime estável
Quantidade de períodos para gerar uma imagem	1, 2, 3, 4 e 5	Influência da quantidade de dados para gerar a imagem	Imagens da quantidade de períodos utilizadas é comparada com a imagem obtida com um período no estado estável

4.3 Estimação de imagens no estado estável através de dados obtidos no regime transiente

Após analisar os parâmetros nos ensaios de termografia ativa e verificar o comportamento durante o regime transitório, parte-se para obtenção de imagens de amplitude e fase através de vídeo de duração reduzida, sem esperar a célula alcançar o regime estável de temperatura.

Para tanto, faz-se necessário obter os dados de temperatura para um ensaio mais curto e ajustar esses dados para um modelo. Isso é feito utilizando a função de ajuste *fit* do MATLAB®, onde são utilizados como parâmetros da função uma expressão que modele os dados, o método de ajuste, além da variável independente, dependente, dos coeficientes e dos pontos de partida do ajuste.

4.3.1 Pré-processamento dos dados utilizados

Antes de efetuar o ajuste em si, é preciso fazer um processamento prévio nos dados para permitir e melhorar o ajuste. O primeiro ponto é o recorte dos dados, onde é necessário ignorar o primeiro período do vídeo (que não contém valores de aquecimento da célula), escolhendo um ponto após a quantidade de quadros existentes nesse primeiro período. Além disso, esses dados são tratados com uma função para suavizá-los (função *smooth()* do MATLAB®), diminuindo os ruídos existentes.

Outro ponto também durante essa etapa é a escolha da quantidade de quadros usados no ajuste. Foram escolhidos três valores que permitam que os dados ainda estejam dentro do regime transitório, para poder investigar a qualidade do ajuste e das imagens

geradas. A opção por três valores se deu para poder investigar se seria possível obter imagens que representavam o comportamento com uma pequena, média e grande porção do transitório, sem também ser muito extenso nessas quantidades. Foram definidos os valores de 8184, 13640, 19096 quadros (que correspondem a 3, 5 e 7 períodos, para a frequência de 11 mHz) e 9000, 13500 e 19200 quadros (15 e 30, 22 e 45, 32 e 64 períodos, para as frequência de 50 e 100 mHz, respectivamente).

4.3.2 Ajuste de curvas com os dados selecionados

O regime transiente de aquecimento de um material em ensaio de termografia ativa modulada, que utiliza uma senoide como sinal de excitação, pode ser modelado de acordo com a equação 3.7, presente no referencial teórico deste trabalho. Essa equação é utilizada como o modelo na função de ajuste e os valores iniciais para o ajuste são definidos empiricamente. Na tabela 4.3 estão resumidas as informações sobre os parâmetros utilizados para ajuste das curvas.

Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados para ajuste das curvas utilizando a função *fit*.

Parâmetros utilizados no ajuste	Valor
Coefficientes da equação	$A, \Delta t, \phi$ e τ
Valores iniciais dos coeficientes	0.01, 25, 0.01, 500
Algoritmo de ajuste	Levenberg-Marquardt
Nº máximo de usos da função objetivo (MaxFunEval)	300
Nº máximo de iterações (MaxIter)	200
Tolerância para ajuste dos coeficientes (TolX)	0.00001

Obtidos os coeficientes da curva ajustada aos dados, eles são utilizados para estimar os valores da temperatura em cada pixel em um período de tempo em que a célula estaria no regime estável, criando uma matriz de temperatura semelhante a obtida após a extração dos dados do vídeo termográfico. Em posse dessa matriz, é possível dar prosseguimento e aplicar as técnicas de processamento para obter as imagens de amplitude e fase sintetizadas.

4.3.3 Técnicas e critérios para comparativo de imagens sintetizadas com as obtidas através dos ensaios

Utilizando as imagens de amplitude e fase obtidas através da matriz de temperatura do ajuste do modelo realizado, são feitos comparativos entre as imagens para verificar se o método proposto obtém resultados semelhantes às imagens obtidas com os dados experimentais. Sendo assim, também são utilizados os índices de similaridades (*SSIM* e *MS-SSIM*) para essa verificação.

Os índices de similaridade são obtidos ao utilizar duas imagens, uma de referência e outra para o comparativo. A imagem de referência é a obtida utilizando os dados do

Tabela 4.4 – Parâmetros utilizados para investigar sua influência nas imagens sintetizadas com dados provenientes do regime transitório dos ensaios *DLIT*

Parâmetro avaliado	Valores (quadros)	Objetivo	Método
Quantidade de dados para gerar uma imagem	8184, 13640 e 19096 (11 mHz) - 9000, 13200 e 19200 (50 mHz) - 9000, 13500 e 19200 (100 mHz)	Influência da quantidade de dados para sintetizar uma imagem	Imagens da quantidade de dados utilizadas são comparadas com a imagem obtida com um período no estado estável

ensaio no regime permanente, como exemplificado na seção 4.2.2 para a frequência e célula em questão. As imagens para comparação são geradas com os dados sintetizados. Servindo de comparação para avaliar a similaridade da imagem sintetizada em relação ao padrão, a quantidade de dados utilizados para ajustar a curva será utilizada como parâmetro, de forma a perceber quanto tempo é necessário para produzir imagens representativas. Na tabela 4.4 essas informações são resumidas.

4.3.4 Método para obtenção de imagens sintetizadas com dados do transiente

Tendo como base os procedimentos anteriores de análise e sintetização de imagens, propõe-se um método para aprimorar a síntese das imagens de amplitude e fase, utilizando os períodos mais semelhantes dentre os presentes em um período de tempo pré-definido do regime transitório.

A partir de um vídeo obtido de um ensaio com tempo reduzido, são realizados os seguintes passos para obtenção das imagens de amplitude e fase sintetizadas:

1. O vídeo do ensaio é repartido em períodos, de acordo com a sua frequência de excitação (07 para 11 mHz, 32 para 50 mHz e 64 para 100 mHz) em um total de 19200 quadros de informação de temperatura;
2. São obtidas imagens de amplitude e fase para cada período, utilizando a *FFT*;
3. Em seguida, cada imagem de um tipo (amplitude ou fase) é utilizada como referência e comparada com todas as outras para verificar sua similaridade. Dessa forma, é possível criar uma matriz com os valores desses índices, permitindo a análise;
4. Para cada coluna da matriz, é verificada a similaridade média da imagem para as outras, calculando a média dos índices. As maiores médias são escolhidas, na quantidade mínima de períodos para síntese (3, 15 ou 30 períodos, para 11, 50 e 100 mHz, respectivamente), e são armazenadas em um vetor;

5. Em seguida, as matrizes de temperatura dos melhores períodos escolhidos no passo anterior são concatenadas em ordem crescente da sua aparição no vídeo, de forma a criar um sinal melhorado, sem períodos em que as imagens obtidas foram dissimilares;
6. Um modelo é ajustado com base no sinal obtido no item anterior, utilizando os métodos anteriormente citados. Imagens de amplitude e fase são sintetizadas aplicando a *FFT* na matriz de temperatura proveniente do modelo ajustado;

Com base nesse método, as imagens obtidas serão comparadas com as imagens obtidas nos ensaios em regime permanente para verificar se a síntese obteve sucesso e a redução do tempo de ensaio fornece imagens representativas.

5 Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os ensaios e técnicas utilizadas. Nessa primeira parte, serão mostrados os resultados relativos aos ensaios utilizados, indicando também os problemas encontrados. Nas seções 5.2 e 5.3 são mostrados os comparativos realizados, sejam para os dados experimentais obtidos quanto para as imagens sintetizadas com os dados obtidos durante o regime transitório. Por fim, os resultados da aplicação do método de seleção de períodos em um vídeo curto são apresentados.

5.1 Imagens obtidas por termografia ativa modulada

Como indicado no capítulo de metodologia deste trabalho, os ensaios de termografia ativa modulada foram realizados em três células monocristalinas, que apresentam características distintas (uma considerada saudável e duas que apresentam defeitos). Através do ensaio de eletroluminescência realizado, foi possível obter imagens que indicam quais as áreas defeituosas das células, de forma que possibilite a análise dos ensaios de termografia realizados em relação às áreas defeituosas. Sendo assim, na figura 5.1 são indicadas as áreas que apresentam defeitos nas células 02 e 03 para essa verificação.

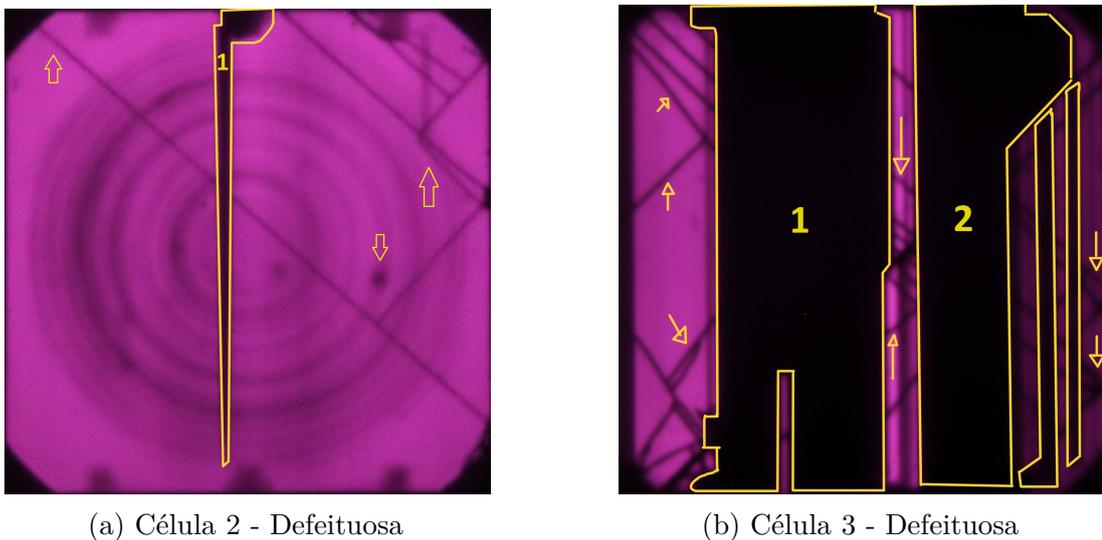


Figura 5.1 – Imagens de eletroluminescência das células defeituosas.

Observando as imagens em 5.1, tanto em a) quanto em b) é possível visualizar algumas regiões completamente escuras, que estão enumeradas. Essas regiões estão defeituosas, onde não ocorre a passagem de corrente elétrica e, portanto, não emitem a luminosidade que é detectada no ensaio de eletroluminescência (regiões de cor rosa nas

imagens). Dessa forma, nos ensaios de termografia, após o processamento, essas regiões devem apresentar uma diferença de perfil térmico em relação às áreas que estão visíveis nos ensaios de eletroluminescência. As outras regiões apontadas com setas, apresentam trincas que causam perdas no funcionamento do local delas, porém, não impedem a passagem da corrente por toda a região (haja visto que ao redor dessas trincas é possível visualizar a luminosidade característica do ensaio). Essas trincas podem ou não aparecer nos ensaios termográficos, a depender do tamanho e do efeito que causam na célula.

Partindo dessas informações, foram realizados 45 ensaios *DLIT* para a identificação dessas falhas e prosseguir com os estudos relativos ao objetivo desse trabalho. Há, portanto, um total de 45 vídeos ($3 \text{ células} \times 3 \text{ frequências de excitação} \times 5 \text{ repetições}$) e 45 imagens obtidas pela técnica convencional, através da análise dos dados provenientes do estado permanente. As imagens possuem dimensões de $200 \times 200 \text{ pixels}$, com a célula centralizada e tiveram seus valores mínimo e máximo ajustados para melhorar o contraste e, por consequência, a visualização (de acordo com o procedimento relatado em 4.2.2). Na tabela 5.1, essas informações estão resumidas.

Tabela 5.1 – Informações sobre o banco de imagens em regime permanentel geradas nos ensaios *DLIT* realizados.

Célula	Frequência (mHz)	Repetições
Célula 01 - Saudável	11	5
	50	5
	100	5
Célula 02 - Defeituosa	11	5
	50	5
	100	5
Célula 03 - Defeituosa	11	5
	50	5
	100	5
	Total	45

Utilizando as imagens obtidas após o processamento pelas técnicas indicadas, é possível avaliar situação com relação aos defeitos existentes. Como padrão para avaliação dessas falhas, é feita a análise dos resultados para a célula dita saudável. Na Figura 5.2, estão ilustradas três imagens de amplitude e três de fase da célula saudável, obtidas através da técnica da *FFT* e selecionadas nos vídeos, uma de cada frequência.

É possível perceber que a célula considerada saudável possui um padrão circular da distribuição térmica (no caso da imagem de amplitude) como também da distribuição de fase entre pontos adjacentes da imagem (no caso das imagens de fase). Para as células defeituosas, o padrão das imagens obtidas é diferente, destacando as regiões onde existe uma inatividade na célula, principalmente para as imagens de fase, como relatado em [43]. Essa informação pode ser visualizada ao se comparar com as regiões existentes nas

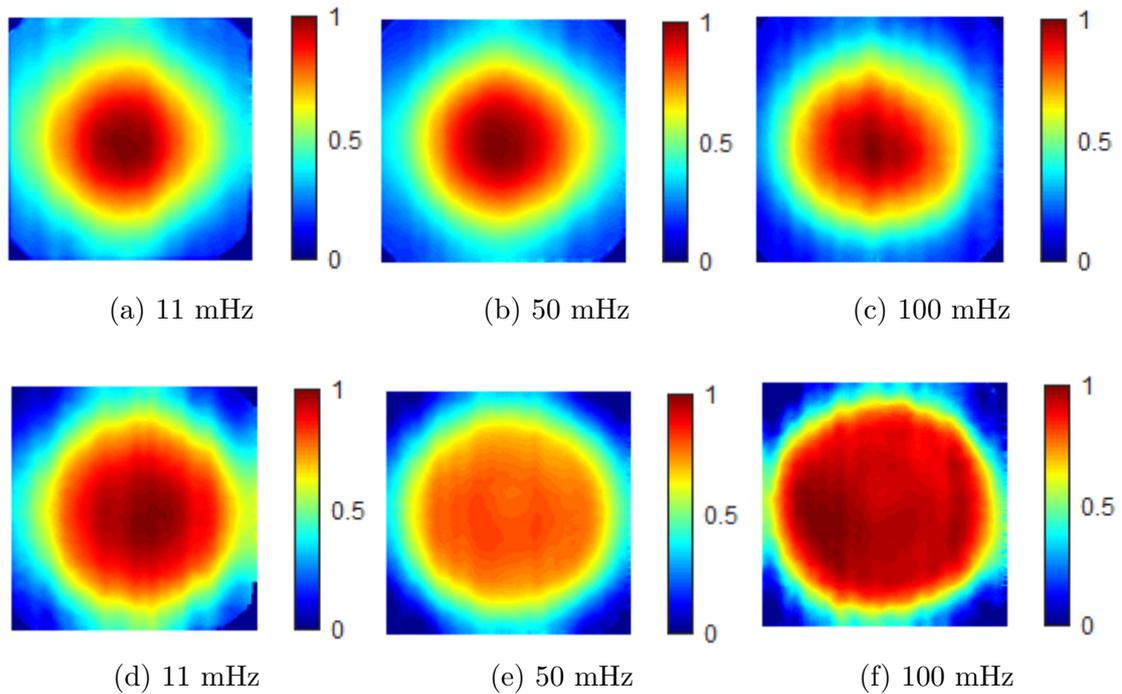


Figura 5.2 – Imagens de amplitude (a, b e c) e fase (d, e, f) obtidas para a célula saudável, em regime permanente e para as frequências em estudo.

imagens de eletroluminescência em que não ocorre a emissão de luz, indicando a área defeituosa, conforme visto na figura 5.1.

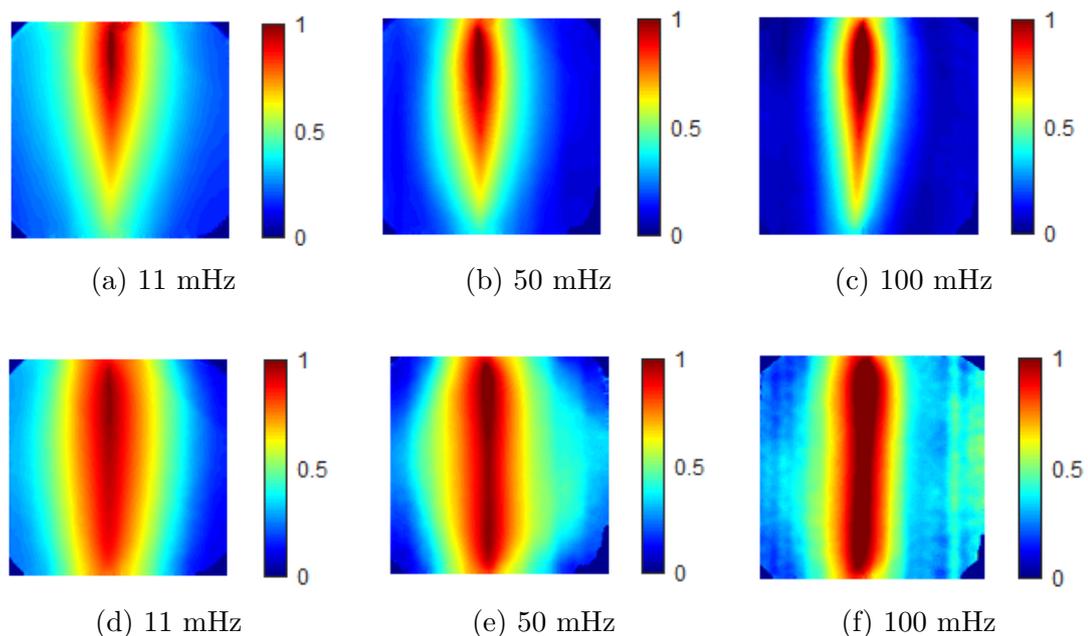


Figura 5.3 – Imagens de amplitude (a, b e c) e fase (d, e, f) obtidas para a célula 02 (defeituosa), em regime permanente e para as frequências em estudo.

Observando as imagens de fase presentes nas figuras 5.3 e 5.4, para as células 02 e 03 (defeituosas), respectivamente, é possível verificar que as regiões defeituosas estão destacadas. Na célula 02, a região 01 do ensaio de eletroluminescência aparece identificada

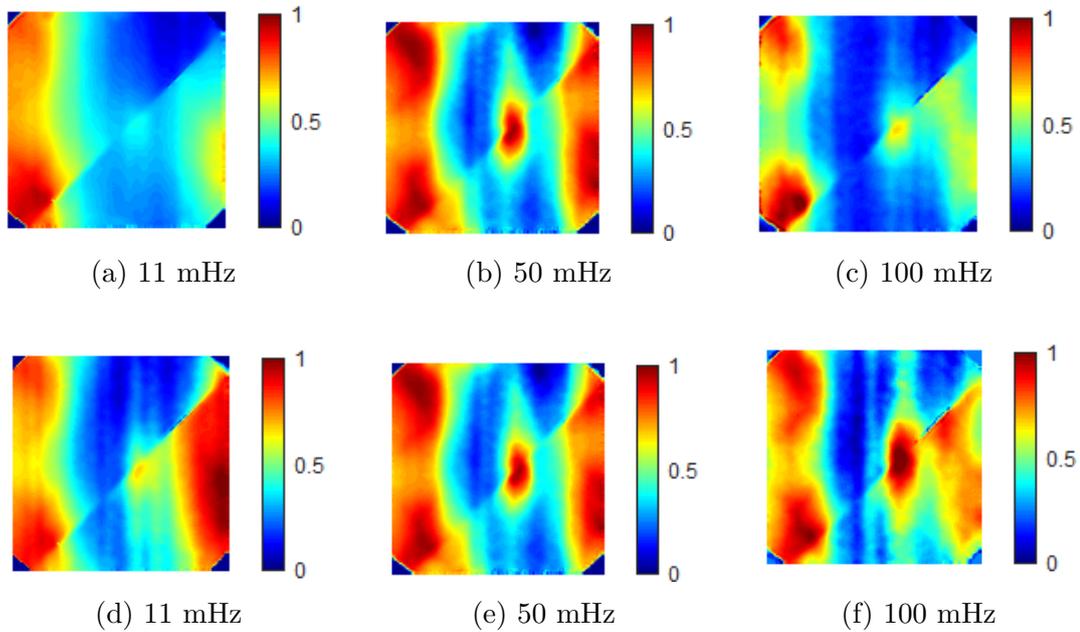


Figura 5.4 – Imagens de amplitude (a, b e c) e fase (d, e, f) obtidas para a célula 03 (defeituosa), em regime permanente e para as frequências em estudo.

em um tom vermelho escuro na imagem de termografia, principalmente na imagem para frequência de 100 mHz (5.3, (f)). Isso se deve ao fato que a variação de fase nessa região é bem maior do que no restante da célula, que possui um padrão térmico mais constante. Nas imagens de amplitude, a determinação da região defeituosa não é tão exata quanto à apresentada nas imagens de fase, identificando apenas a região com maior amplitude térmica.

Para a célula 03, a análise é semelhante. As regiões 01 e 02 da figura 5.1 (b) estão presentes nas imagens de fase da figura 5.4, principalmente em (e) e (f). O aumento da região em vermelho no lado esquerdo das imagens da célula, em relação a área funcional obtida nas imagens de eletroluminescência pode ser explicado devido ao espalhamento térmico nessa região, que está concentrando praticamente toda a corrente que passa pela célula. As trincas na parte central aparentemente influenciaram nos resultados, gerando apenas um aquecimento no ponto central da célula. Porém as trincas nas bordas lateral não tiveram tanta influência no funcionamento nessas regiões. Esses resultados estão de acordo com os relatados em [43].

De maneira geral, os ensaios realizados obtiveram imagens semelhantes às apresentadas nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4, com algumas pequenas diferenças identificadas (principalmente para as células defeituosas). Além disso, essas diferenças também foram observadas por [43]. Mais detalhes sobre estas imagens obtidas em outros períodos são apresentados na seção 5.2.

5.1.1 Problemas encontrados na obtenção das imagens processadas

Avaliando os ensaios, dois problemas foram encontrados que interferiram nos resultados encontrados. O primeiro deles foi a presença de descontinuidades dos valores de *pixels* adjacentes das imagens de fase geradas, principalmente utilizando a técnica da *FFT*, causando uma saturação das mesmas. Em alguns casos, mesmo utilizando a função *wrapTo2Pi()*, que ajusta os valores das imagens de fase para o intervalo de 0 até 2π , esse problema ocorre. Isso acaba por tornar a imagem pouco similar com a imagem de referência nos comparativos e, assim, atrapalhar a avaliação dos resultados. Na figura 5.5 (a) é possível visualizar um exemplo desse problema.

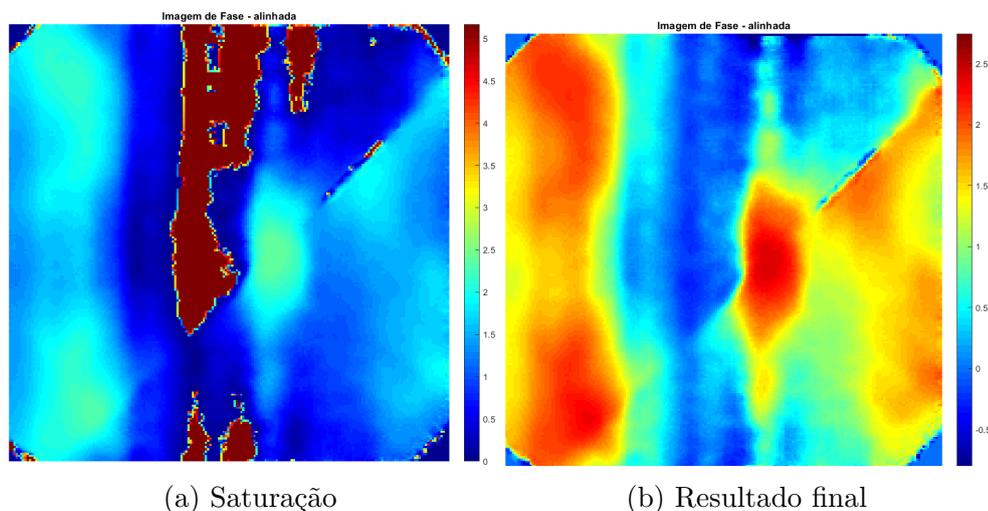


Figura 5.5 – Representação do problema encontrado de saturação das imagens de fase dos ensaios *DLIT* e sua resolução.

Uma solução encontrada foi substituir a função que ajusta os valores de fase da matriz pela função *wrapToPi()*, que remapeia os valores dos ângulos para o intervalo de $-\pi$ a π , em radianos, na tentativa de evitar essas descontinuidades. Utilizando essas duas funções, foi possível corrigir a grande maioria das imagens dos vídeos processados, como visto na figura 5.5 (b)), principalmente para os ensaios com frequências menores. Porém, em alguns casos, mesmo efetuando essas correções o resultado não ficou satisfatório e a imagem usada para comparação foi a que obteve a maior proximidade com o esperado.

Outro problema identificado foi que, em determinados momentos de alguns ensaios, houve uma descontinuidade do sinal térmico captado pela câmera. Na figura 5.6 é possível verificar esse problema no detalhe em vermelho. Observando a imagem, é possível perceber após o momento de descontinuidade, o sinal de saída parece estar defasado em relação ao momento anterior do problema, além de estar com um valor bem superior de temperatura.

Com relação à geração das imagens no regime permanente, esse problema só impacta se ocorrer no período final do vídeo, que é o utilizado na análise clássica da termografia. Caso ocorra, a solução seria utilizar outro período do regime permanente

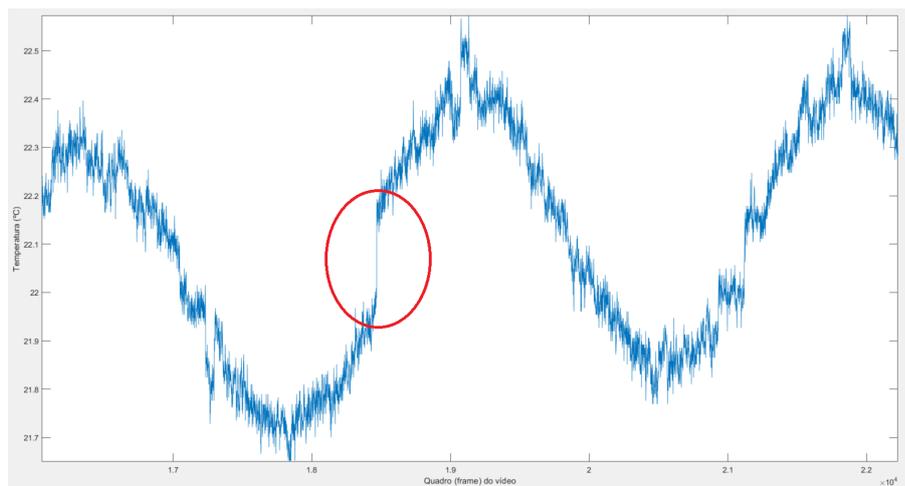


Figura 5.6 – Imagem de um sinal térmico modulado obtido de uma célula indicando região onde houve perda de quadros.

para gerar a imagem do ensaio. Porém, como será visto adiante, esse problema tem influência significativa no ajuste de um modelo aos dados obtidos em transitório, pelo fato de modificar o comportamento e frequência desse sinal térmico em análise.

Aparentemente, esse problema é causado devido à recalibração da câmera durante os ensaios, pois os momentos em que ocorre essa perda de quadros no sinal coincidiram com os sinais sonoros que a câmera emite ao efetuar essa função. Além disso, foram feitos alguns testes (utilizando o método *ThermalImage.ImageProcessing.GetPixelArray()* da biblioteca da fabricante) e verificado que os dados brutos dos *pixels* também apresentam esse problema, não sendo, portanto, um efeito do processamento para obter os valores de temperatura. No entanto, não foi possível configurar a câmera para evitar que esse ajuste fosse realizado durante o vídeo, não sendo possível resolver o problema neste trabalho.

5.2 Comparativo de imagens entre períodos de um mesmo vídeo

Após os resultados e análises sobre o arranjo experimental utilizado, deu-se início à análise de fato dos dados provenientes de todo o vídeo, para avaliar o comportamento não só do regime permanente como do transiente. Para tanto, foi realizado o comparativo entre as imagens obtidas no ensaio realizado por completo, ou seja, utilizando os dados presentes em todos os períodos dos vídeos. Essas imagens foram comparadas utilizando alguns parâmetros e seus resultados e discussões são apresentados a seguir.

Inicialmente, observando as imagens processadas obtidas para todos os períodos dos vídeos e analisando qualitativamente, é possível obter algumas informações. Com relação às imagens de amplitude, é visto que, de maneira geral para as frequências e células utilizadas, as imagens se assemelham durante quase todos os períodos dos vídeos, independente das frequências utilizadas e do estado da célula. Na figura 5.7 a) - d), são

representadas algumas imagens de quatro períodos subsequentes no regime permanente, onde todas elas possuem um formato semelhante, com listras verticais alterando um pouco o formato circular nas imagens (b) e (c).

Somente em algumas imagens que o comportamento muda um pouco, seja pela presença de algum ruído ou comportamento estranho durante o período de análise, como é possível ver na figura 5.7 c). E quanto menor a frequência utilizada, menor a ocorrência dessas imagens discrepantes, pelo maior tempo e quantidade de dados utilizados para gerar a imagem, diminuindo o efeito de pequenos ruídos que venham a atrapalhar a medição e processamento.

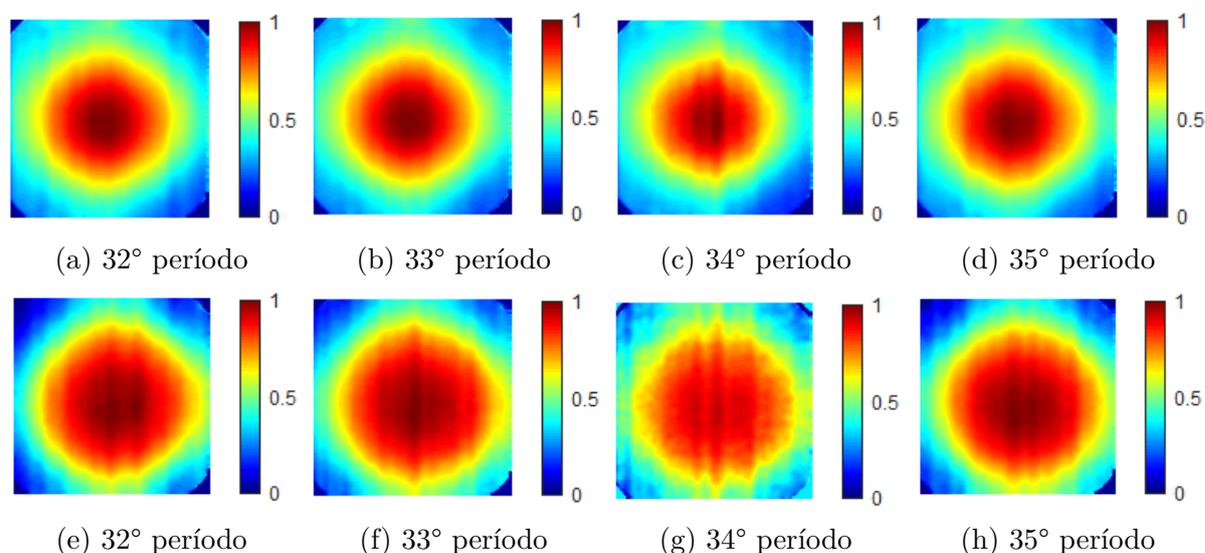


Figura 5.7 – Imagens de amplitude (a - d) e fase (e - h) da célula saudável em um ensaio de 11 mHz, em períodos do regime permanente.

Já em relação às imagens de fase, o comportamento difere em comparação com as de amplitude. As imagens apresentam variações entre os períodos, principalmente nas frequências maiores. Um dos motivos, inicialmente, foi o problema relatado na seção 5.1.1, que geravam imagens saturadas, destoantes do padrão esperado. Porém, mesmo realizando o ajuste da saturação, ainda é possível notar que existem diferenças entre elas, principalmente para as células defeituosas.

Dessa forma, para confirmar e quantificar essa similaridade identificada, foram utilizados os índices propostos nesse trabalho para a comparação e obtenção de dados numéricos que validem as avaliações qualitativas. Escolhendo uma imagem no regime permanente, que melhor represente o resultado do ensaio e comparando com as imagens de todos os períodos do vídeo gerados, são obtidos índices que indicam o quão próximo essas imagens estão no resultado do ensaio. Nas próximas subseções os resultados obtidos serão apresentados.

5.2.1 Célula 01 - Saudável

Para demonstrar os resultados dos comparativos realizados, foram gerados gráficos com o valor do índice de similaridade obtido na comparação da imagem de cada período do vídeo com a imagem de referência, assim como tabelas para resumir os dados e suas estatísticas. Além disso, são feitas discussões sobre os resultados obtidos.

Na figura 5.8 estão apresentados os valores dos índices *SSIM* e *MS-SSIM* para cada um dos 35 períodos do vídeo do ensaio 05, de frequência de 11 mHz realizado na célula saudável. É possível visualizar um comportamento padrão observado nos cinco ensaios realizados para esta frequência, onde a maior parte das imagens estão bem semelhantes à imagem de referência.

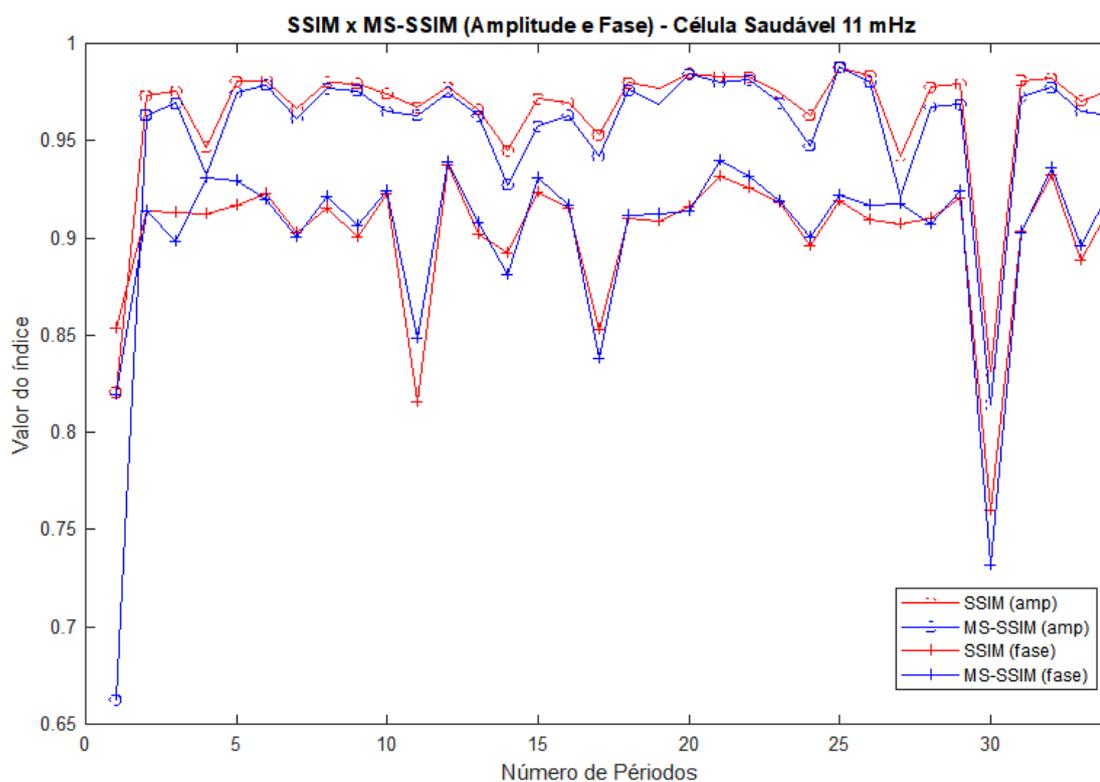
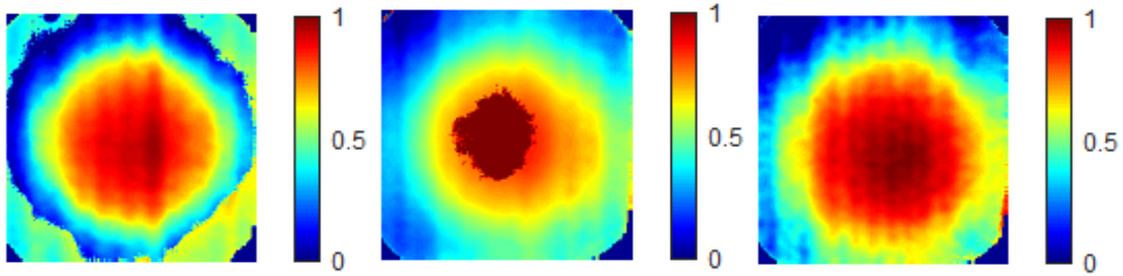


Figura 5.8 – Gráfico com os valores dos índices de similaridade para cada período do vídeo na frequência de 11 mHz da célula 01, utilizando imagens sem suavização.

Somente algumas poucas imagens saem do padrão, apresentando regiões saturadas ou manchas, provenientes de ruídos na medição, mesmo assim mantendo uma similaridade alta com relação à imagem de referência (no caso desse ensaio, a mais destoante apresenta valores *SSIM* de 0,84 e 0,70, amplitude e fase, respectivamente, ambas no 25º Período). Na figura 5.9 é possível ver exemplos de imagens destoantes dos ensaios de 11 mHz (na figura (a) é representada a imagem ruidosa para este ensaio analisado).

Com relação à comparação entre os índices, ao utilizar o índice *MS-SSIM* são obtidos resultados semelhantes ao *SSIM*. É possível verificar que, quando a imagem em



(a) Período 25° - Ensaio 05 (b) Período 22° - Ensaio 02 (c) Período 25° - Ensaio 02

Figura 5.9 – Representação das imagens de fase com menor similaridade obtidas nos ensaios 02 e 05 da célula 01, 11 mHz.

comparação é parecida com a referência, o índice $MS-SSIM$ fica com valor próximo ao $SSIM$. Porém, esse valor é significativamente menor quando não são tão semelhantes. É possível observar que, na maior parte dos casos, a média geral desse índice possui um valor menor do que 1% o do $SSIM$, porém mantendo o mesmo padrão ao analisar o valor em cada período. Esse comportamento também foi obtido nas análises feitas em [24], apesar de ter sido feita com um corpo de prova diferente.

Com relação ao filtros utilizados, é visto que as imagens com o filtro da mediana possuem índices bem semelhantes aos das imagens sem tratamento, apresentando apenas um pequeno acréscimo (<5%) (figura 5.10). Isso se deve ao fato que esse filtro apenas corrige algumas regiões com ruídos de alta frequência, mantendo a imagem, de maneira geral, bem próxima à imagem original e, para esses índices de similaridade utilizados, alterando pouco sua estrutura. É possível notar esse efeito comparando visualmente as imagens 5.11 (a) e (b).

Já as imagens com filtro gaussiano apresentam outro comportamento. Nelas, além de remover esse ruído, ela também borra a imagem, suavizando bastante as diferenças existentes na imagem que está sendo comparada em relação à imagem de referência, fazendo com que a similaridade aumente consideravelmente (em alguns casos, aumenta em até 10% do índice das imagens sem filtro). Esse é o comportamento mais comum porém, em alguns casos, a imagem suavizada evidencia as diferenças, fazendo com o que o valor do seu índice diminua. Analisando as imagens 5.11 (a), (c) e (d) é possível verificar que, nesse caso, imagem com o filtro gaussiano é visualmente mais semelhante que a original (sem filtro) e isso se reflete nos índices obtidos ($SSIM$ de 0,90 para imagem original e 0,955 para a filtrada). Dessa forma, os índices com o filtro gaussiano serão os utilizados nas próximas análises desse capítulo, evitando que ruídos do ensaio atrapalhem os resultados.

Essa análise pode ser corroborada ao analisar a tabela 5.2, onde é visto que a média dos índices é alta (para imagens de amplitude possui valor $SSIM$ de 0,9889 e para fase de 0,9514), sendo muito similares à imagem de referência. Além disso, o desvio padrão é baixo (0,0125 e 0,0517, para amplitude e fase, respectivamente), confirmando que os

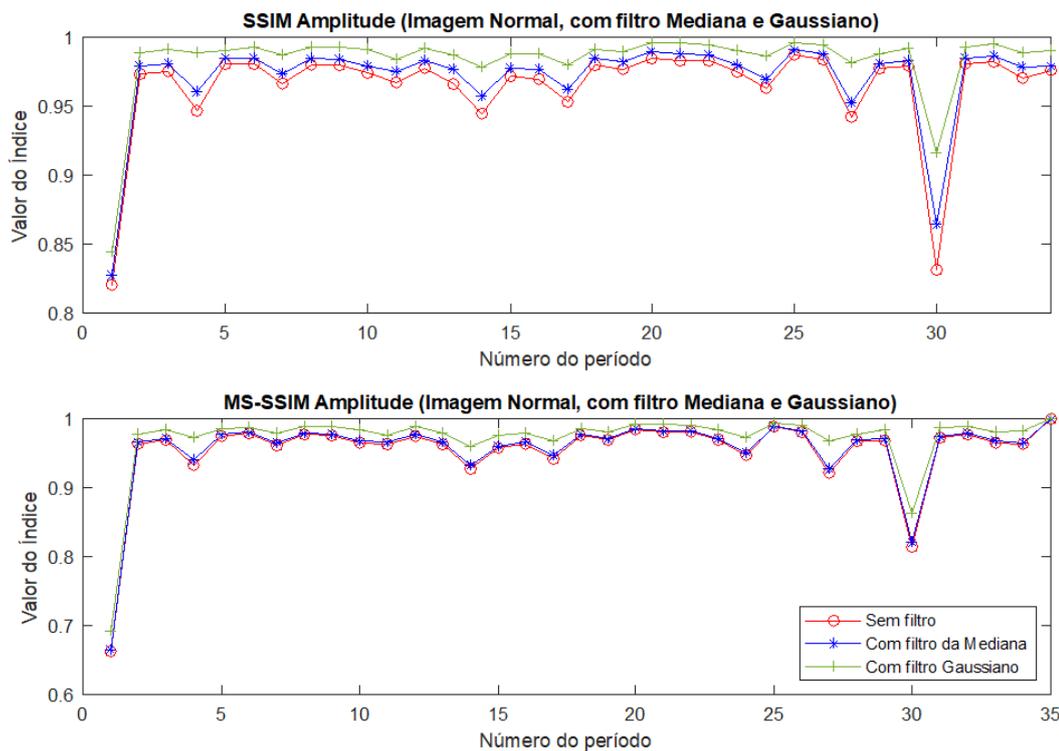


Figura 5.10 – Gráfico com os valores dos índices de similaridade para cada período do vídeo na frequência de 11 mHz da célula 01, utilizando as imagens com e sem suavização.

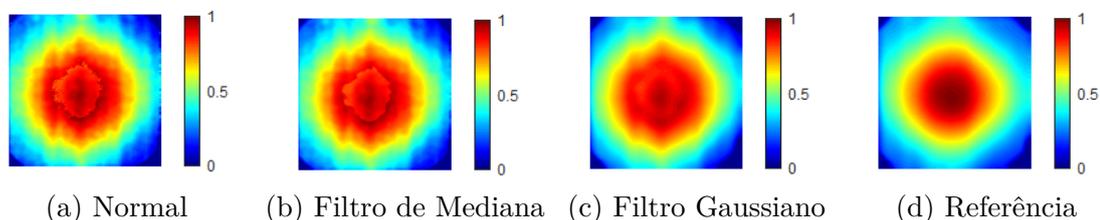


Figura 5.11 – Ilustração das imagens de amplitude obtidas no ensaio 02, 25° período, destacando um ruído existente e os resultados processados.

índices entre as imagens de cada período estão próximos. Também é possível perceber com esses valores que as imagens de fase variam mais e possuem uma similaridade menor que as de amplitude.

Para os vídeos na frequência de 50 mHz, o comportamento obtido foi semelhante ao de 11 mHz, como pode ser visto na figura 5.12 e nos índices obtidos e apresentados na tabela 5.2. Tomando como base este ensaio apresentado na figura, a maior parte das imagens obteve valor bem próximo do máximo, apenas algumas poucas divergentes, assim como para os ensaios de 11 mHz. Porém, essas imagens divergentes tiveram um índice bem inferior (pelo menos 50% menor) ao obtido para frequência anterior, ou seja, não possuíam mais as características esperadas. Mas, como nessa frequência a quantidade de imagens analisadas é bem superior (164 nesta contra 35 na anterior), a média geral dos índices não é severamente afetada, principalmente para as imagens de amplitude.

Tabela 5.2 – Estatísticas do índice de similaridade *SSIM* e *MS – SSIM* nas imagens obtidas para a célula 01 (11, 50 e 100 mHz), após uso do filtro Gaussiano.

Ensaio (11 mHz)	Média (SSIM)		Desvio Padrão (SSIM)		Média (MSSIM)		Desvio Padrão (MSSIM)	
	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Ensaio 01	0,9902	0,9669	0,0179	0,0227	0,9809	0,9604	0,0361	0,0392
Ensaio 02	0,9896	0,9664	0,0102	0,0288	0,9850	0,9619	0,0189	0,0362
Ensaio 03	0,9891	0,9378	0,0070	0,0720	0,9858	0,8954	0,0113	0,1643
Ensaio 04	0,9907	0,9247	0,0057	0,0919	0,9879	0,8821	0,0069	0,2081
Ensaio 05	0,9847	0,961	0,0219	0,0430	0,9765	0,9581	0,0415	0,0568
Média Geral	0,9889	0,9514	0,0125	0,0517	0,9832	0,9316	0,0229	0,1009
Ensaio (50 mHz)	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
	Ensaio 01	0,9856	0,9211	0,0608	0,0493	0,9791	0,9223	0,0930
Ensaio 02	0,9500	0,8750	0,0704	0,0727	0,9514	0,8693	0,1011	0,1264
Ensaio 03	0,9750	0,9036	0,0591	0,0548	0,9652	0,8845	0,0899	0,1288
Ensaio 04	0,9851	0,9528	0,0469	0,0333	0,9777	0,9574	0,0764	0,0520
Ensaio 05	0,9825	0,9378	0,0526	0,0628	0,9723	0,9283	0,0806	0,0963
Média Geral	0,9757	0,9181	0,0579	0,0552	0,9691	0,9124	0,0882	0,0860
Ensaio (100 mHz)	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
	Ensaio 01	0,9418	0,7810	0,0912	0,1856	0,9249	0,6914	0,1321
Ensaio 02	0,9397	0,8312	0,0827	0,1531	0,9248	0,7246	0,1225	0,3036
Ensaio 03	0,9511	0,8336	0,0507	0,1442	0,9417	0,7723	0,0678	0,2589
Ensaio 04	0,9450	0,8329	0,0781	0,1564	0,9322	0,7639	0,1116	0,2667
Ensaio 05	0,9486	0,8092	0,0756	0,1563	0,9323	0,7069	0,1154	0,2913
Média Geral	0,9452	0,8176	0,0757	0,1591	0,9312	0,7318	0,1099	0,2851

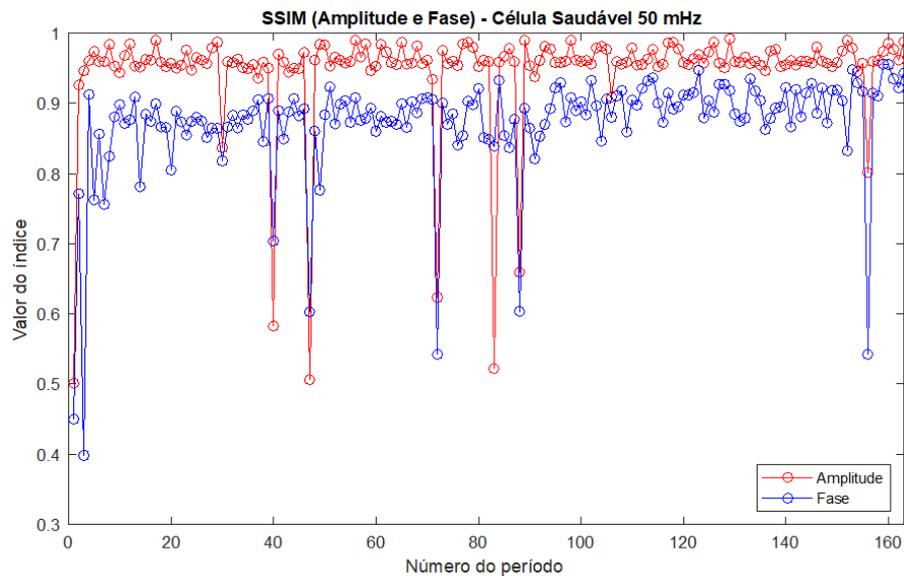


Figura 5.12 – Gráfico com os valores dos índices de similaridade para cada período do vídeo na frequência de 50 mHz da célula 01, analisando as imagens de amplitude e fase com filtro gaussiano.

Na frequência de 100 mHz, ocorreram mudanças no padrão dos índices. Para as imagens de amplitude a alteração não foi tão grande, com a maior parte das imagens de cada período sendo semelhante ao padrão do regime permanente. No entanto, como algumas poucas destoavam bastante, os índices de amplitude tiveram valor um pouco menor, causando uma pequena redução na média geral em relação às outras frequências.

Porém, para as imagens de fase, o efeito foi maior. Como é possível ver na figura 5.13, uma quantidade bem maior de imagens apresentou diferenças significativas para o padrão. Observando também o valor do desvio padrão, nota-se que seu valor mais do que dobra nesta frequência, indicando esta maior variação entre as imagens. Foi necessário corrigir diversas imagens que apresentaram os problemas relatados na seção 5.1.1 e mesmo assim os resultados nem sempre geraram imagens próximas ao padrão, fazendo com o o valor da média geral dos índices reduzisse bastante. Somente com o uso do filtro gaussiano que foi possível obter uma média geral acima de 0,8, indicando que houve a ocorrência de diversas imagens ruidosas.

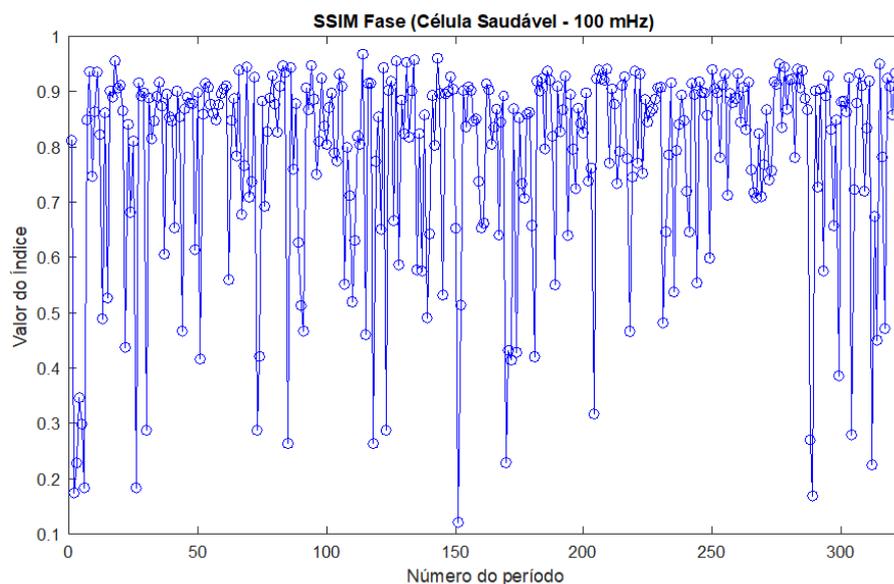


Figura 5.13 – Gráfico com os valores dos índices de similaridade para cada período do vídeo na frequência de 100 mHz da célula 01 (Ensaio 01), analisando as imagens de fase com filtro gaussiano.

5.2.2 Célula 02 - Defeituosa

Para a célula 2, utilizando a frequência de 11 mHz, foi identificado que os índices para cada período se mantiveram bem próximos, assim como identificado na célula saudável. E ao analisar os dados da tabela 5.3, foi verificado que houve uma maior similaridade entre as imagens dos períodos e a imagem referência do que para a célula saudável, visto tanto na média quanto no desvio padrão dos índices *SSIM* e *MS-SSIM*. Isso se deve ao perfil gerado pelo defeito nestas imagens processadas (5.3 (a) e (d)), onde a maior parte da imagem apresenta uma região homogênea, com a defeito modificando o comportamento da célula em uma parte da região central e havendo apenas pequenas alterações na região do defeito, de uma imagem para outra, diminuindo a chance de aparecer diferenças que impactassem nos índices.

Tabela 5.3 – Estatísticas do índice de similaridade *SSIM* e *MS-SSIM* nas imagens obtidas para a célula 02 (11, 50 e 100 mHz), após uso do filtro Gaussiano.

Ensaio (11 mHz)	Média (SSIM)		Desvio Padrão (SSIM)		Média (MSSIM)		Desvio Padrão (MSSIM)	
	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Ensaio 01	0,9966	0,9767	0,0032	0,0272	0,9958	0,9580	0,0047	0,0527
Ensaio 02	0,9917	0,9555	0,0038	0,0299	0,9873	0,9423	0,0040	0,0409
Ensaio 03	0,9895	0,9511	0,0236	0,0910	0,9908	0,9172	0,0119	0,1620
Ensaio 04	0,9988	0,9626	0,0019	0,1147	0,9987	0,9311	0,0018	0,1647
Ensaio 05	0,9972	0,9740	0,0044	0,0190	0,9952	0,9649	0,0099	0,0419
Média Geral	0,9948	0,9640	0,0074	0,0564	0,9935	0,9427	0,0065	0,0925
Ensaio (50 mHz)	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
	Ensaio 01	0,9480	0,8880	0,0624	0,1114	0,9480	0,8880	0,0624
Ensaio 02	0,9693	0,9233	0,0485	0,0991	0,9693	0,9233	0,0485	0,0991
Ensaio 03	0,8959	0,8306	0,1123	0,1588	0,8770	0,7212	0,1643	0,2591
Ensaio 04	0,8612	0,9003	0,0698	0,0914	0,9397	0,8103	0,0590	0,1695
Ensaio 05	0,9336	0,9069	0,0753	0,0836	0,9529	0,8496	0,0980	0,1457
Média Geral	0,9216	0,8898	0,0737	0,1088	0,9374	0,8385	0,0864	0,1569
Ensaio (100 mHz)	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
	Ensaio 01	0,8772	0,6574	0,1308	0,1447	0,8875	0,5055	0,1801
Ensaio 02	0,8837	0,7244	0,1116	0,1779	0,9143	0,5681	0,1361	0,3042
Ensaio 03	0,9033	0,7633	0,0845	0,1558	0,9358	0,6033	0,0882	0,2645
Ensaio 04	0,8528	0,7337	0,1115	0,1684	0,8661	0,5639	0,1564	0,2882
Ensaio 05	0,8927	0,7256	0,0879	0,2014	0,9069	0,5301	0,1004	0,3371
Média Geral	0,8820	0,7209	0,1052	0,1696	0,9021	0,5542	0,1323	0,2851

Apesar disso, para a frequência de 50 mHz, houve uma diminuição da similaridade média em comparação com a frequência menor. Foi observado que, principalmente nos ensaios 03 e 04, apareceram algumas imagens saturadas, que não foi possível realizar a correção adequada, que fizeram a média geral diminuir, tanto de amplitude como de fase. Afetou principalmente o índice *MS-SSIM* para as imagens de fase, onde várias dessas que estavam com problema tiveram um índice atribuído muito baixo, reduzindo bastante a média geral.

Para a frequência de 100 mHz, ocorreu um agravamento do que aconteceu para a célula saudável. Não só o problema de saturação ocorreu (que também não foi possível corrigir de todas as imagens), como o próprio padrão espacial do defeito na imagem se alterava (espalhamento térmico maior ou menor, regiões mais escuras, etc.), de um período para outro, mesmo nas imagens geradas no regime permanente. Apesar de, qualitativamente ser possível visualizar o defeito nessas imagens, isso ocasionou um valor menor dos índices, devido a essa alteração da estrutura da imagem. Na figura 5.14 é possível verificar essas alterações destacadas.

5.2.3 Célula 03 - Defeituosa

Para a célula 3, foi observado um comportamento geral bem semelhante ao obtido na análise da célula 02. Observando a tabela 5.4, é visto que para frequência de 11 mHz, o resultado se assemelha ao das outras células, imagens próximas entre si e parecidas com o padrão por todos os períodos (com exceção de algumas ruidosas). Para a frequência

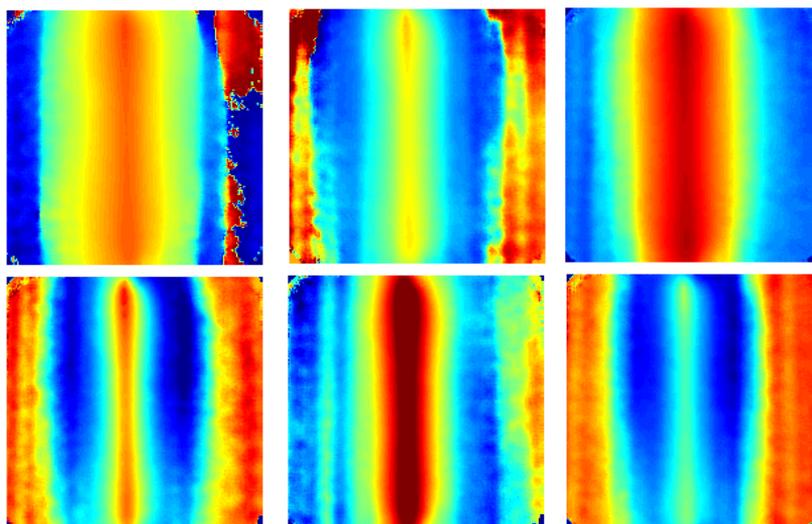


Figura 5.14 – Representação de imagens de fase da célula 02 (100 mHz), mostrando as diferenças encontradas nos vários períodos e que ocasionam a diminuição dos índices.

de 50 mHz, o resultado obtido é bem próximo do encontrado na análise da célula 02, algumas imagens com problemas de saturação e perfil diferente do padrão que diminuiram os índices, porém com a maior parte sendo próxima.

Tabela 5.4 – Estatísticas do índice de similaridade SSIM e MSSSIM nas imagens obtidas para a célula 03 (11, 50 e 100 mHz), após uso do filtro Gaussiano.

Ensaio (11 mHz)	Média (SSIM)		Desvio Padrão (SSIM)		Média (MSSSIM)		Desvio Padrão (MSSSIM)	
	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Ensaio 01	0,9691	0,9379	0,0114	0,0439	0,9713	0,9233	0,0151	0,0653
Ensaio 02	0,9839	0,9488	0,0277	0,0214	0,9708	0,9468	0,0533	0,0330
Ensaio 03	0,9753	0,8965	0,0174	0,0500	0,9447	0,8498	0,0372	0,0901
Ensaio 04	0,9666	0,8870	0,0184	0,0682	0,9358	0,8310	0,0365	0,1195
Ensaio 05	0,9618	0,8995	0,0281	0,0810	0,9267	0,8291	0,0597	0,1671
Média Geral	0,9713	0,9139	0,0206	0,0529	0,9499	0,8760	0,0404	0,0950
Ensaio (50 mHz)	Média (SSIM)		Desvio Padrão (SSIM)		Média (MSSSIM)		Desvio Padrão (MSSSIM)	
	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Ensaio 01	0,9830	0,9113	0,0127	0,0498	0,9633	0,9024	0,0233	0,0642
Ensaio 02	0,9664	0,8735	0,0482	0,0663	0,9388	0,8369	0,0892	0,1227
Ensaio 03	0,9425	0,8245	0,0448	0,0896	0,9049	0,7688	0,0688	0,1537
Ensaio 04	0,9237	0,7959	0,0617	0,1477	0,8575	0,7428	0,1004	0,2289
Ensaio 05	0,9299	0,7987	0,0953	0,1368	0,8602	0,7500	0,1993	0,2295
Média Geral	0,9491	0,8408	0,0525	0,0981	0,9049	0,8002	0,0962	0,1598
Ensaio (100 mHz)	Média (SSIM)		Desvio Padrão (SSIM)		Média (MSSSIM)		Desvio Padrão (MSSSIM)	
	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Ensaio 01	0,8711	0,6928	0,0865	0,2368	0,7673	0,5621	0,1730	0,3473
Ensaio 02	0,8962	0,7545	0,1198	0,1891	0,8117	0,6538	0,2291	0,3087
Ensaio 03	0,8740	0,7422	0,0997	0,2008	0,7674	0,6256	0,1733	0,3357
Ensaio 04	0,8448	0,7172	0,1161	0,1973	0,6982	0,5898	0,2131	0,3299
Ensaio 05	0,8580	0,6596	0,1123	0,1352	0,7419	0,5129	0,2192	0,2475
Média Geral	0,8688	0,7132	0,1069	0,1918	0,7573	0,5888	0,2015	0,3138

E para a frequência de 100 mHz, também foi obtido o mesmo comportamento encontrando na célula 02, com uma variação grande entre as imagens, que causou uma diminuição significativa dos índices. Foi observado que, assim como para a célula 02, o

índice $MS - SSIM$ de amplitude também teve seu valor bastante reduzido, devido ao perfil gerado na imagem pelo defeito nessa frequência, onde as regiões estão mais espaçadas por toda célula e suas diferenças são identificadas e pontuadas negativamente por esse índice. Na figura 5.15 são apresentadas algumas imagens para demonstrar essa questão identificada.

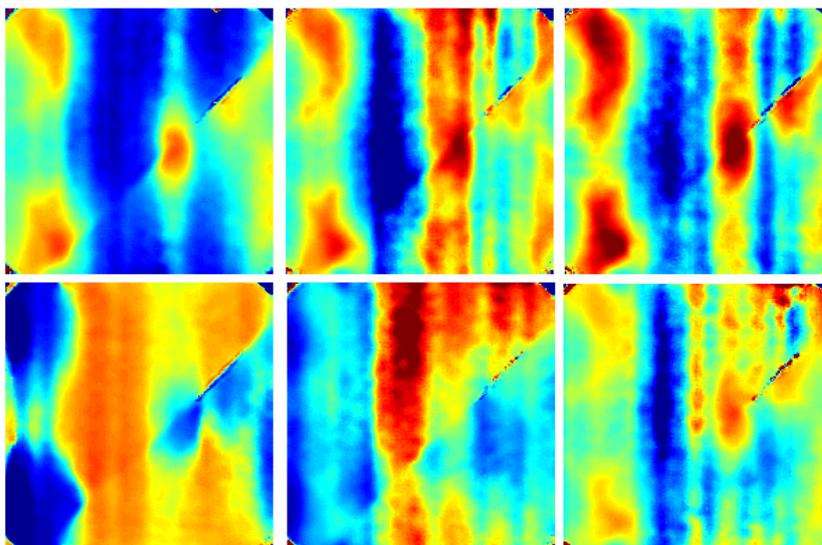


Figura 5.15 – Representação de imagens de fase da célula 3 (100 mHz), mostrando as diferenças encontradas nos vários períodos e que ocasionam a diminuição dos índices.

5.2.4 Análise do transitório através do comparativo entre imagens de diversos períodos do vídeo

Em busca de otimizar o tempo do ensaio e obter imagens representativas para os ensaios, foi realizada uma análise das informações presentes no regime transitório. Para verificar as informações contidas neste regime, foi definido como um intervalo de análise os primeiros 12 minutos, de forma que pudessem ser obtidos 07 períodos, para frequência de 11 mHz; 32, para 50 mHz e 64, para 100 mHz do vídeo, sendo considerado como regime permanente o tempo posterior.

Foi observado, analisando os sinais térmicos dos ensaios que, para a frequência menor, esse intervalo (12 minutos) era o período de tempo médio para a temperatura se aproximar do ponto de temperatura do regime permanente. Para as frequências maiores de ensaio esse período é menor, porém, com intuito de padronizar e permitir posteriores análises utilizando a mesma quantidade de dados, foi escolhido esse período de tempo. Na figura 5.16, é mostrado o perfil térmico no tempo de um ponto da célula saudável, com um detalhe em vermelho indicando o intervalo escolhido.

Com base nesse intervalo definido, foram analisadas qualitativamente e quantitativamente algumas imagens para verificar seu comportamento. Na análise qualitativa, foi

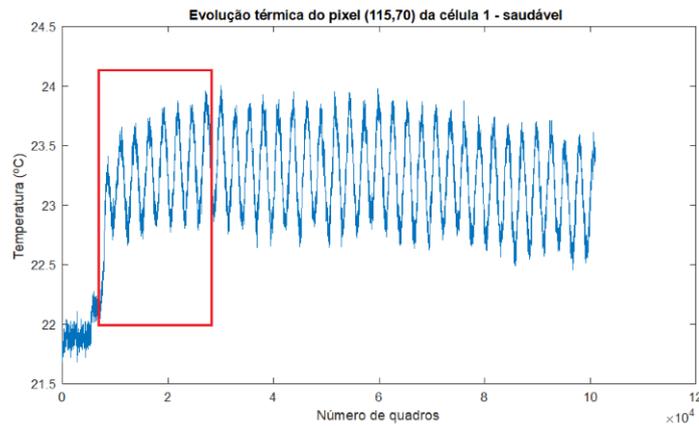


Figura 5.16 – Representação da evolução de um sinal térmico em um *pixel* da célula 1 - saudável. A forma em vermelho serve para indicar a região considerada de transiente.

possível verificar que as imagens de amplitude também são próximas entre elas. Inclusive, se parecem bastante com as imagens obtidas no regime permanente. É um comportamento visualizado nos diversos ensaios realizados. A diferença se dá para a imagem obtida do primeiro período, que geralmente não possui um perfil próximo ao esperado, principalmente para as frequências maiores. Uma representação destas imagens é visualizada nas imagens (a) - (d) da figura 5.17.

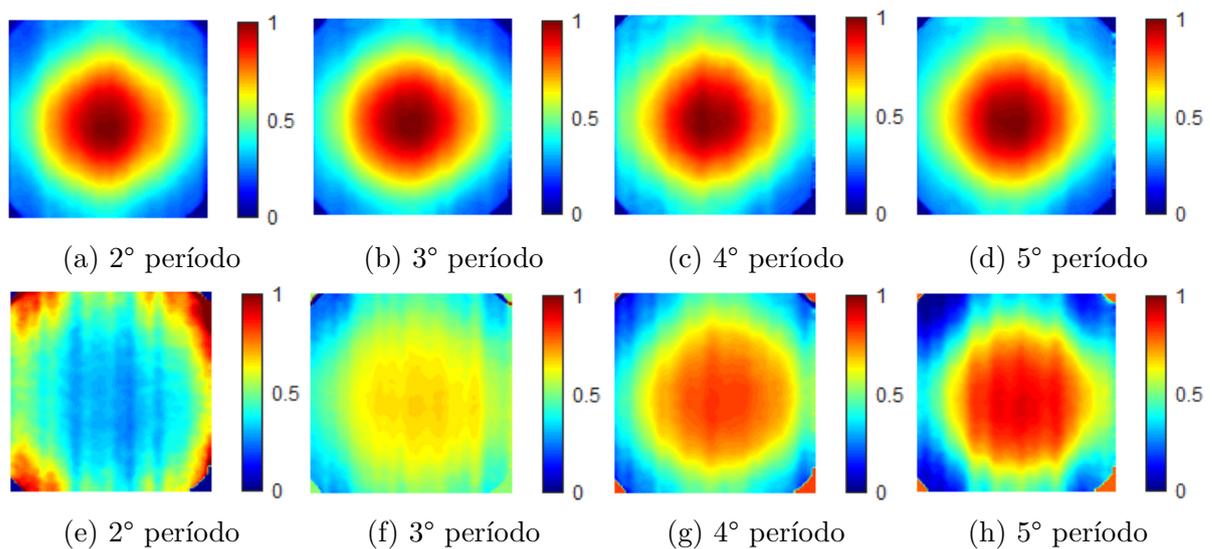


Figura 5.17 – Imagens de amplitude (a - d) e fase (e - h) da célula saudável em um ensaio de 11 mHz, em períodos do regime transiente.

Nas imagens de fase no transiente, as diferenças verificadas no regime permanente se acentuam, principalmente nos primeiros períodos do vídeo, como pode ser visto nas figuras 5.17 (e)-(h). Porém, a medida que vai se aproximando ao final do intervalo do transiente, as imagens já estão mais semelhantes, tanto entre elas, quanto às imagens do regime permanente (figura 5.17 (h)).

5.2.4.1 Análise através do comparativo de imagens no transiente

Para verificar quantitativamente as imagens encontradas no transiente, foram realizadas comparações utilizando os índices de similaridade propostos. Foram encontrados os valores analisando as imagens obtidas nos períodos de tempo definidos como regime transitório e permanente, comparando com as imagens de referência no regime permanente. Foi criada a tabela 5.5 para resumir esses dados, com os valores das médias dos índices para cada célula e suas frequências estudadas, permitindo uma análise do comportamento das imagens nestes dois períodos de tempo.

Tabela 5.5 – Estatísticas do índice de similaridade $SSIM$ e $MS - SSIM$ nos regimes transitório e permanente para as frequências (11, 50 e 100 mHz) das células estudadas, após uso do filtro Gaussiano.

Célula 01									
Frequência	Período	Média ($SSIM$)		Desvio Padrão ($SSIM$)		Média ($MSSIM$)		Desvio Padrão ($MSSIM$)	
		Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
11 mHz	Transitório	0,9868	0,9162	0,0066	0,0752	0,9837	0,8519	0,0090	0,1723
	Permanente	0,9913	0,9696	0,0053	0,0190	0,9831	0,9515	0,0103	0,0290
50 mHz	Transitório	0,9683	0,9167	0,0427	0,0609	0,9581	0,9102	0,0574	0,0817
	Permanente	0,9747	0,9199	0,0353	0,0510	0,9720	0,9123	0,0340	0,0648
100 mHz	Transitório	0,9351	0,8018	0,0629	0,1577	0,9136	0,7078	0,0874	0,2714
	Permanente	0,9483	0,8272	0,0485	0,1252	0,9360	0,7383	0,0568	0,2260
Célula 02									
Frequência	Período	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
11 mHz	Transitório	0,9903	0,9288	0,0119	0,0663	0,9917	0,8874	0,0081	0,1031
	Permanente	0,9960	0,9811	0,0052	0,0235	0,9931	0,9765	0,0094	0,0278
50 mHz	Transitório	0,9154	0,8816	0,0743	0,0987	0,9276	0,8328	0,0729	0,1481
	Permanente	0,9199	0,8927	0,0799	0,0960	0,9400	0,8392	0,0630	0,1442
100 mHz	Transitório	0,8625	0,7000	0,1086	0,1729	0,8783	0,5181	0,1337	0,2934
	Permanente	0,8865	0,7254	0,0880	0,1862	0,9087	0,5642	0,0903	0,2710
Célula 03									
Frequência	Período	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
11 mHz	Transitório	0,9641	0,8789	0,0220	0,0757	0,9332	0,8155	0,0444	0,1413
	Permanente	0,9722	0,9275	0,0189	0,0515	0,9485	0,8909	0,0434	0,0901
50 mHz	Transitório	0,9460	0,8418	0,0451	0,0846	0,8927	0,8038	0,0916	0,1297
	Permanente	0,9401	0,8286	0,0585	0,1023	0,8892	0,7808	0,1026	0,1598
100 mHz	Transitório	0,8575	0,7131	0,1113	0,1819	0,7329	0,5894	0,2107	0,2855
	Permanente	0,8708	0,7181	0,0971	0,1777	0,7570	0,5990	0,1760	0,2864

Observando os dados, de maneira geral, é visto que as médias dos índices $SSIM$ e $MS-SSIM$ para as imagens de amplitude e fase diminuem durante o período do transitório. Essa informação diverge da análise qualitativa para as imagens de amplitude, porém, vai de encontro com o que havia sido encontrado para as imagens de fase. Além disso, os desvios padrões aumentaram durante o transitório, mostrando que as imagens não são uniformes, devido ao efeito deste período de tempo no comportamento das células.

Em alguns casos, esse padrão de queda dos índices no transitório é alterado. No ensaio de 50 mHz da célula 02, os índices são praticamente iguais (índice das imagens de amplitude 0,5% menor e 1,2% para as imagens de fase). Para a célula 03, na frequência de 50 mHz, as médias e os desvios padrões estão opostos ao padrão esperado. Nesses ensaios, principalmente as imagens de fase apresentaram problemas e variaram bastante, inclusive

no regime permanente, diminuindo a média e causando variações não só no início como no final do ensaio.

Analisando essas informações, percebe-se que, para frequências mais baixas, como a de 11 mHz, é possível obter uma imagem representativa do ensaio tanto no regime permanente quanto no transitório, devido a maior uniformidade das imagens geradas nos testes. Esse efeito é proveniente do maior espalhamento térmico que ocorre para as frequências mais baixas, tanto para amplitude quanto para fase, gerando zonas mais uniformes. As imagens do regime permanente possuem maior proximidade com o padrão porém as obtidas no transitório estão muito próximas.

Porém, para as frequências de 50 e 100 mHz, o mesmo comportamento não é observado. Principalmente nas células defeituosas, tanto as imagens no transitório quanto em regime permanente apresentaram variações e nem sempre são representativas, gerando uma dificuldade na obtenção de uma imagem do ensaio e necessidade de análise de qual o momento do vídeo é o ideal para obter as imagens de amplitude e fase que representem o ensaio realizado. Somente para a célula saudável que esse efeito não interfere tanto, sendo possível obter imagens inclusive durante o regime transiente.

5.2.5 Comparativo entre imagens geradas com quantidade de períodos utilizados diferentes

Outra avaliação realizada foi com relação ao uso de mais de um período do vídeo para processamento dos dados e obtenção de imagens de amplitude e fase. Isso foi feito objetivando verificar se são obtidas imagens mais semelhantes às imagens de referência tradicionalmente utilizadas (obtidas com o uso de somente um período presente no regime permanente).

Esta análise foi realizada para cada célula, em cada uma das frequências utilizadas. Após geradas as imagens, um comparativo entre elas e a imagem de referência foi realizado aplicando o índice *SSIM*. Dos nove testes realizados, em seis deles (66,6%) houve uma diminuição do índice à medida que eram adicionados mais períodos para gerar as imagens, em um perfil como o representado na figura 5.18, em concordância com o visto em [24]. As imagens de amplitude não variavam muito nesses casos, principalmente quando analisado no regime permanente. A maior variação nos índices era obtida com as imagens de fase, principalmente no transitório.

Analisando alguns dos testes realizados, é possível entender mais sobre esse fenômeno observado. Observando a figura 5.19, para a célula saudável na frequência de 100 mHz, à medida que são utilizado mais dados (figuras (b), (c), (d) e (e)), as imagens se tornam mais ruidosas, distorcendo o formato em comparação com a imagem de referência e mudando quase totalmente o perfil. Isso se traduz no valor menor dos índices na comparação. Esse

Tabela 5.6 – Comportamento da similaridade *SSIM* nos regimes transitório e permanente para as frequências (11, 50 e 100 mHz) das células estudadas, com relação ao acréscimo de períodos para obter as imagens.

Frequência	Período	Célula 01		Célula 02		Célula 03	
		Similaridade		Similaridade		Similaridade	
		Amp.	Fase	Amp.	Fase	Amp.	Fase
11 mHz	Transitório	Diminuiu	Diminuiu	Diminuiu*	Diminuiu*	Aumentou	Aumentou
	Permanente	Diminuiu	Diminuiu*	Igual	Diminuiu	Diminuiu	Diminuiu
50 mHz	Transitório	Diminuiu	Diminuiu	Diminuiu	Oscilou	Diminuiu	Oscilou
	Permanente	Diminuiu	Diminuiu	Oscilou	Diminuiu	Diminuiu	Diminuiu
100 mHz	Transitório	Diminuiu	Diminuiu	Igual	Diminuiu	Diminuiu	Diminuiu
	Permanente	Diminuiu*	Diminuiu*	Diminuiu*	Diminuiu*	Diminuiu	Diminuiu

efeito também foi observado em [24], sendo atribuído ao aumento do ruído dos dados utilizados no processamento.

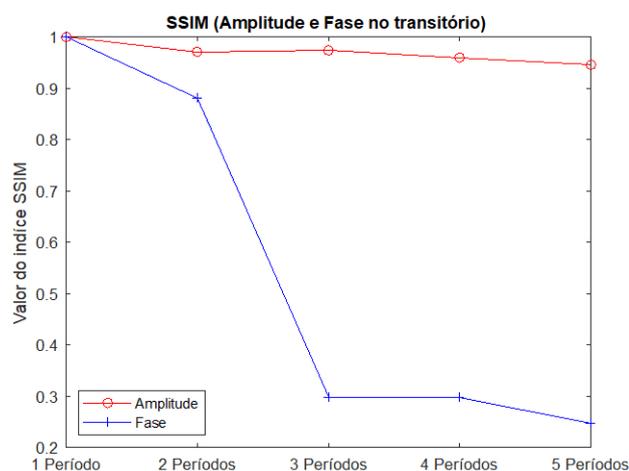


Figura 5.18 – Comparativo entre imagens de fase geradas utilizando uma quantidade maior de períodos com a imagem referência, utilizando o índice *SSIM* como métrica.

Observando outro ensaio, também da célula saudável porém com a frequência de 11 mHz, é possível avaliar também através do espectro de amplitude gerado ao aplicar a técnica da *FFT*. É possível perceber que o perfil da imagem de referência 5.20 (a) apresenta um pico na frequência de excitação (0,011 Hz), bem superior aos outros pontos encontrados, comprovando que nessa imagem a maior contribuição foi relativa à excitação da célula. Além disso, possui uma redução expressiva da contribuição das frequências subsequentes na imagem.

Já para os espectros das imagens obtidas adicionando outros períodos (5.20 (b)), é possível visualizar a presença de outras frequências com valor absoluto maior do que a de excitação, alterando a distribuição da contribuição das frequências, comprovando a influência de ruídos nas imagens e causando esse dissimilaridade encontrada nas imagens da figura 5.21.

Nos outros casos, houve uma oscilação ou até uma maior similaridade à medida

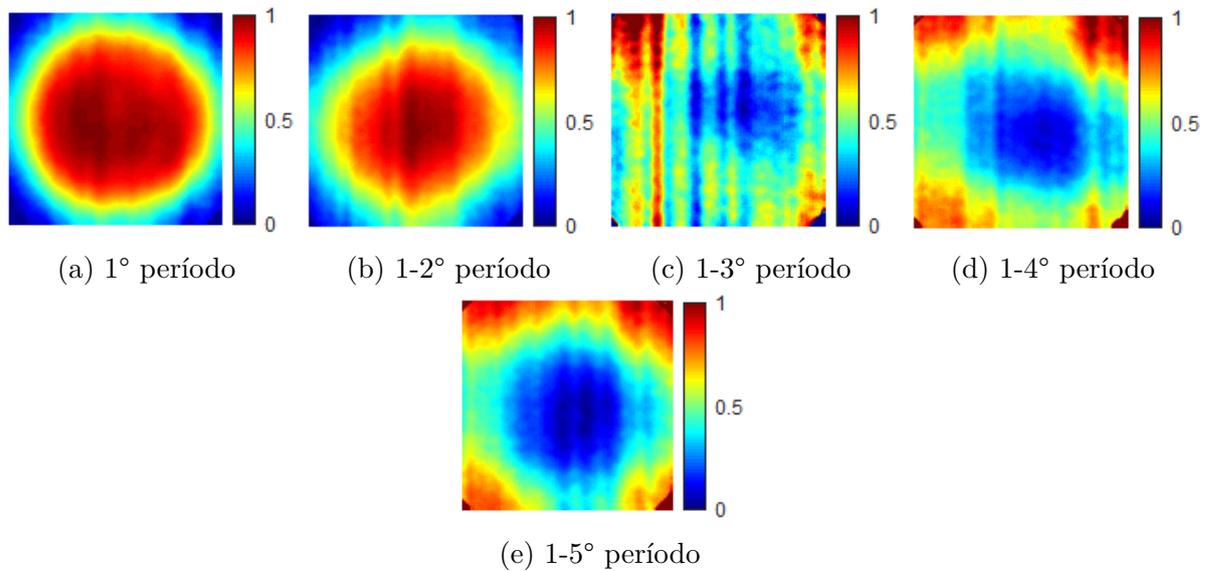


Figura 5.19 – Imagens de fase da célula saudável em um ensaio de 100 mHz, em períodos do regime transiente, processadas utilizando um ou mais períodos do vídeo.

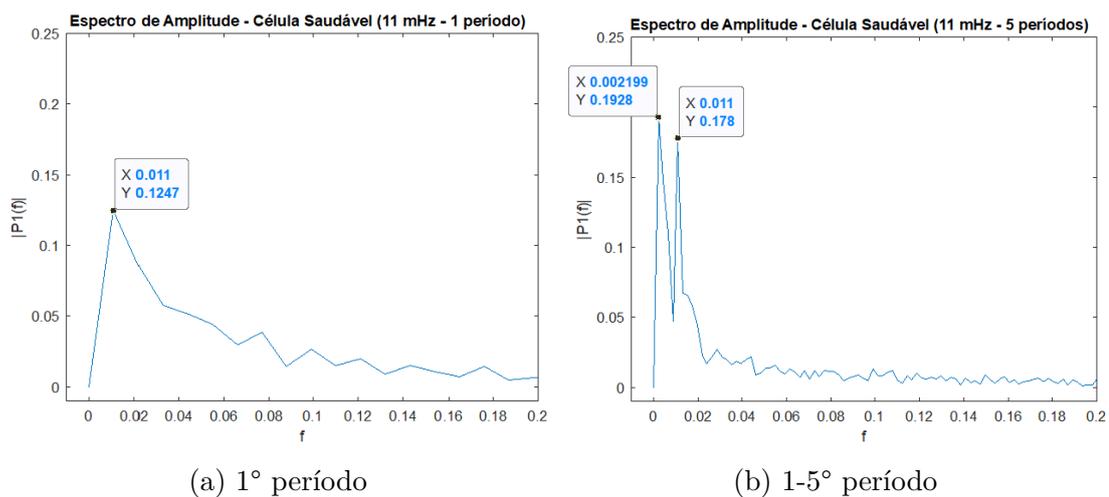


Figura 5.20 – Espectro de amplitude obtidos após o processamento pela *FFT* para as imagens da célula saudável em um ensaio de 11 mHz, obtidas utilizando um ou mais períodos do vídeo.

que se usavam mais períodos para gerar as imagens. Foi possível verificar que nesses casos, o primeiro ou um dos primeiros períodos utilizados para gerar a imagem apresentou um comportamento fora do esperado para a imagem de referência, o que gerou imagens utilizando um ou dois períodos pouco similares. Porém, à medida que foram adicionados períodos compatíveis com o padrão, as imagens foram se aproximando da referência, fazendo com que o índice de similaridade aumentasse o seu valor. Um exemplo desse caso é apresentado na figura 5.22, onde o primeiro período (5.22 (a)) apresentou regiões com manchas, que foram sendo suavizadas à medida que foram adicionados períodos para gerar as imagens. Essa suavização também foi relatada em [24], indicando imagens mais borradas à medida que se adicionavam mais períodos na análise.

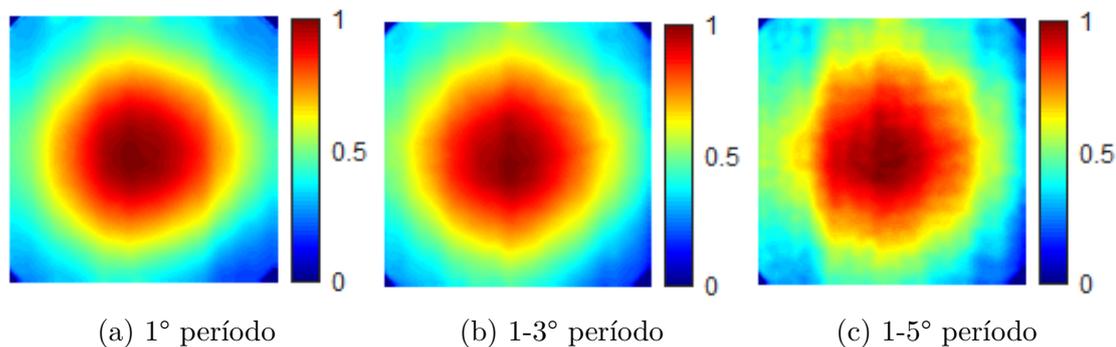


Figura 5.21 – Imagens de amplitude da célula saudável, na frequência de 11 mHz, à medida que foram adicionados períodos para seu processamento, adicionando ruídos.

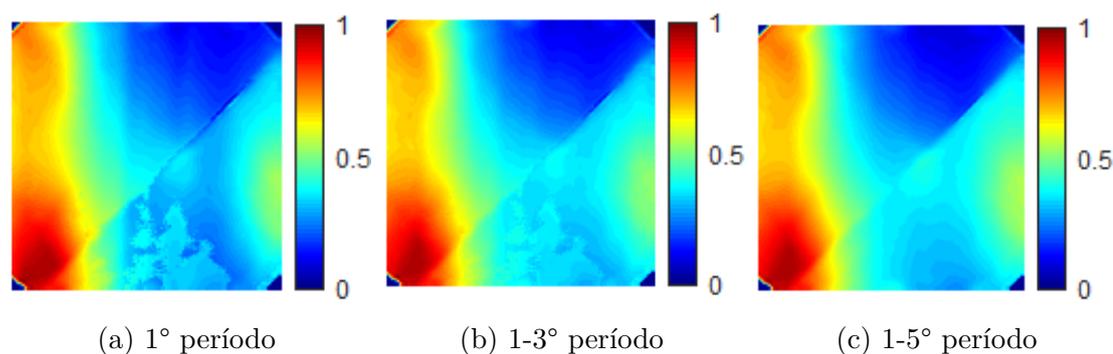


Figura 5.22 – Imagens de amplitude da célula 03 em um ensaio de 11 mHz, obtidas utilizando um ou mais períodos do vídeo, reduzindo o ruído à medida que se adicionam períodos para gerar a imagem.

Sendo assim, percebe-se que o uso de vários períodos na geração das imagens de amplitude e fase dificilmente gera uma imagem mais representativa da célula ou mais próxima do padrão, pois tende a introduzir ruídos. Somente quando a imagem obtida utilizando um período é pouco similar à de referência e, suas subsequentes estão similares, é que existe uma vantagem no uso de mais períodos na obtenção da imagem. Nesse caso, o ruído/distorção encontrado na primeira acaba sendo suavizado pelas outras.

Dessa forma, tentar obter uma imagem mais próxima à referência através da junção de períodos não se apresenta como uma solução razoável. Uma possível forma de se obter um melhor resultado seria testar a semelhança entre algumas imagens dos primeiros períodos entre si e excluir as que os índices obtidos fossem muito diferentes da média desses índices gerados.

5.3 Estimação de imagens no estado permanente através de dados obtidos no regime transiente

Tendo em vista que nem sempre é possível obter uma imagem representativa nas obtidas no regime transiente, assim como o uso de mais períodos não apresentou resultados

satisfatórios, uma solução mais robusta proposta foi a estimação de uma imagem em regime permanente com os dados do transitório. (Após obtenção e análise dos resultados obtidos com relação aos dados do transitório) Para tanto, foi implementado um procedimento para sintetizar imagens de amplitude e fase tendo como base esses dados para obter imagens semelhantes às obtidas com os dados em regime permanente.

Seguindo os procedimentos definidos na seção 5.3 da metodologia, foram obtidas imagens de amplitude e fase para as células estudadas, utilizando as três frequências definidas e variando a quantidade de dados para criar essas imagens. Além disso foram verificadas as diferenças causadas pela variação dos parâmetros utilizados.

Utilizando os 45 vídeos, foi possível, para cada um deles, seis imagens (três quantidades de dados diferentes para cada uma das duas funções de ajuste utilizadas). Devido a quantidade de dados gerada, são apresentadas tabelas reduzidas para demonstrar os resultados nas próximas subseções.

5.3.1 Comparativo entre as imagens sintetizadas e as obtidas experimentalmente

Inicialmente, realizando uma avaliação qualitativa das imagens sintetizadas, é possível perceber que elas se assemelham bastante às imagens de referência, obtidas experimentalmente no regime permanente. Nas imagens da figura 5.23 são visualizadas diversas imagens sintetizadas para as células utilizadas, indicando o perfil de aquecimento e as regiões de defeitos de acordo com o esperado.

Entretanto, também é possível ser visualizado na 5.23 (f) um exemplo de uma imagem sintetizada com a presença de saturação, bem dissimilar à referência. A depender das informações existentes nos dados utilizados para gerar a imagem, pode-se sintetizar uma imagem como essa, que não está de acordo com o esperado e não representa perfeitamente o defeito da célula. No levantamento realizado, é visto que essas imagens são exceção, sendo a maior parte delas significativas para demonstrar os defeitos na célula. Mesmo assim, um procedimento para solucionar este problema está descrito em 4.3.4 e seus resultados serão abordados na subseção 5.3.2.

Outro fato interessante é que, analisando o espectro de amplitude das imagens sintetizadas, é possível verificar que a única contribuição é da frequência de excitação, no caso, a utilizada na equação de ajuste do modelo. Na figura 5.24 é apresentado o espectro da célula 03, para a frequência de 100 mHz, onde é possível visualizar essa informação. Devido a isso, as imagens geradas não possuem influência de ruídos que não sejam relativos ao aquecimento da célula como os que aparecem em alguns imagens obtidas com os dados diretos do vídeo (5.19 (c), 5.21 (c)). Além disso, elas tendem a ser mais suavizadas também, possivelmente devido à suavização realizada nos dados antes de realizar o ajuste

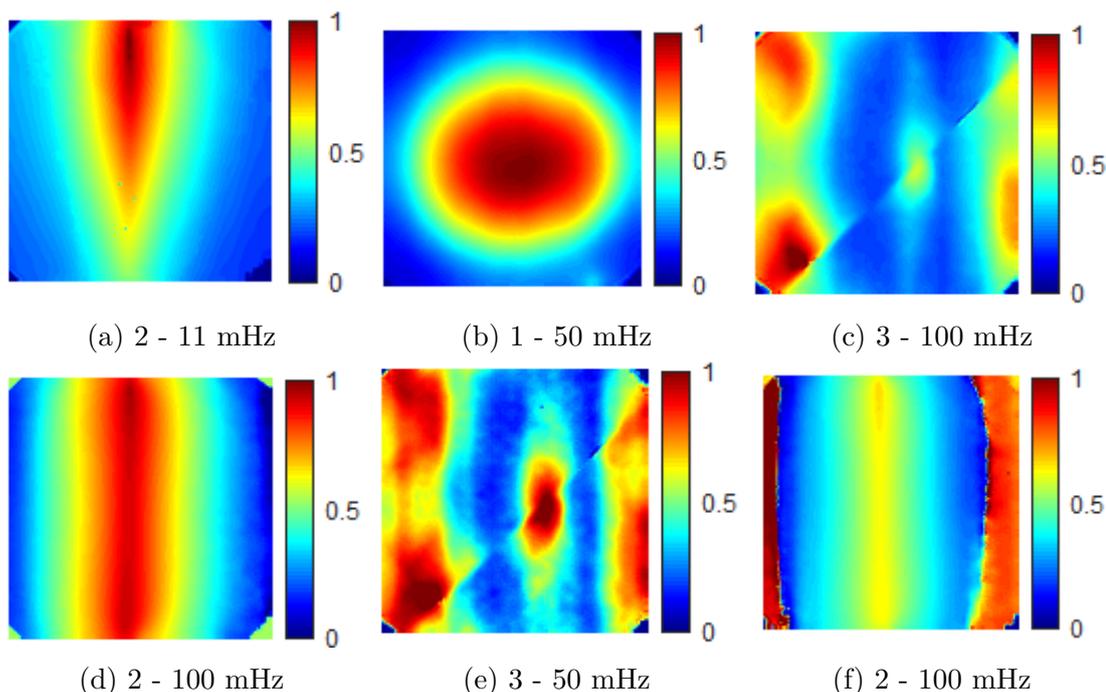


Figura 5.23 – Imagens sintetizadas de amplitude (a - c) e fase (d - f) das células, projetadas para o regime permanente. O número inicial da legenda de cada imagem se refere ao número da célula utilizado para gerar a imagem.

do modelo.

Para o ajuste do modelo, foram utilizadas as funções *fit* e *lsqcurvefit*, presentes na biblioteca do *software* MATLAB. Foi possível perceber que as imagens geradas por ambas eram bem semelhantes, com exceção de três casos onde a função *lsqcurvefit* não forneceu uma imagem representativa do fenômeno. Também foi identificado que ela possui um tempo de execução menor do que a função *fit*, em alguns casos sendo cinco vezes mais rápida (no ajuste realizado para a maior quantidade de dados).

Ainda com relação à qualidade do ajuste do modelo, um dos problemas encontrados foi a perda de quadros relatada na seção 5.1.1. Essa questão faz com o sinal ajustado pelo modelo, que possui uma frequência fixa determinada pela equação do modelo, se defase com relação aos dados obtidos, gerando um ajuste menos preciso aos dados. É possível visualizar este problema utilizando a figura 5.25, onde, a partir do ponto indicado com a seta verde, em que ocorreu uma perda de quadros pela câmera, o modelo passa a ficar defasado com relação ao sinal gerado pelos dados termográficos, diminuindo o coeficiente de ajuste e aumentando o erro quadrático. Ainda nesta figura, utilizando o *Subplot 2*, estão presentes os resíduos do ajuste, que aumentam a partir do momento da perda, indicando o aumento do erro quadrático médio.

Já foi relatado em [10], que esse problema tem efeito negativo sobre a reconstrução do sinal através do modelo, ao introduzir ruídos em relação ao sinal original. Foi possível observar que, nos casos que esse efeito ocorreu, os valores dos coeficientes de ajuste e de

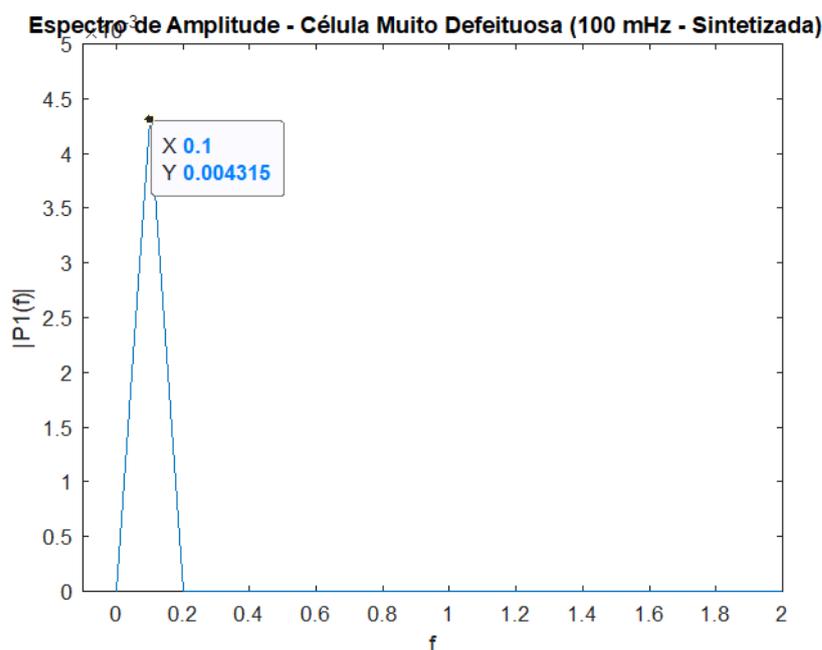


Figura 5.24 – Espectro de amplitude de imagem sintetizada, da célula 03 obtida para a frequência de 100 mHz, indicando a contribuição apenas da frequência fundamental da equação utilizada no ajuste.

erro quadrático médio para imagem sintetizada foram inferiores aos casos em que não ocorreu esse problema, como relatado na referência.

Para verificar e confirmar essas informações levantadas, são usados os índices de similaridade para comparação das imagens sintetizadas com as obtidas pelo método tradicional. Nas próximas subseções, os resultados quantitativos das análises são apresentados para cada célula.

5.3.1.1 Célula 01 - Saudável

Em cada ensaio realizado, são obtidas três imagens de amplitude, sendo uma para cada quantidade de dados utilizada no ajuste, e três de fase, em um total de seis. Isso é feito para os cinco ensaios de cada uma das três frequências, obtendo o total de 90 imagens para cada célula e 270 no total. Na tabela 5.7 estão reunidos os índices obtidos nos comparativos realizados.

Verificando as informações presentes nesta tabela, é possível visualizar que, para as frequências de excitação utilizadas, as imagens são bem semelhantes. Nas imagens de amplitude, o menor valor médio *SSIM* obtido nos ensaios foi de **0,9895** (11 e 50 mHz) e **0,9666** (100 mHz), com desvio padrão máximo de **0,0090** (11 mHz), **0,0043** (50 mHz) e **0,0237** (100 mHz). Nas de fase, a média mínima foi de **0,9423** (11 mHz), **0,8998** (50 mHz) e **0,9423** (100 mHz), e desvio padrão máximo de **0,0314** (11 mHz), **0,0518** (50 mHz) e **0,0234** (100 mHz). Dessa forma, portanto, se vê que os valores são bem próximos

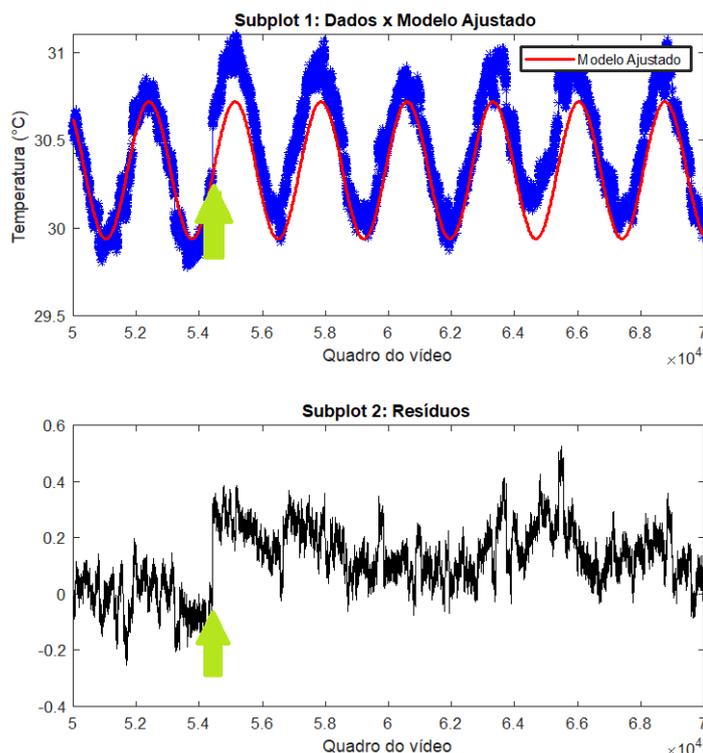


Figura 5.25 – Ajuste dos dados térmicos dos ensaios à um modelo, no caso onde existe uma descontinuidade do sinal, gerando um ajuste menos preciso. Na tela de cima, comparativo entre os dados e o modelo ajustado. Na tela inferior, os resíduos do modelo.

Tabela 5.7 – Estatísticas do índice de similaridade *SSIM* nas imagens sintetizadas para a célula 01 (11, 50 e 100 mHz)

Ensaio		11 mHz			50 mHz			100 mHz		
		03 Per.	05 Per.	07 Per.	15 Per.	22 Per.	32 Per.	30 Per.	45 Per.	64 Per.
Ensaio 01	Amp	0,9955	0,9947	0,9955	0,9973	0,9977	0,9979	0,9730	0,9635	0,9710
	Fase	0,9182	0,9133	0,9359	0,9459	0,9452	0,9068	0,9227	0,9072	0,8866
Ensaio 02	Amp	0,9915	0,9931	0,9939	0,9897	0,9872	0,9898	0,9809	0,9768	0,9709
	Fase	0,9685	0,9686	0,9693	0,9164	0,8683	0,8660	0,9182	0,9348	0,9104
Ensaio 03	Amp	0,9937	0,9966	0,9973	0,9898	0,9895	0,9898	0,9662	0,9830	0,9837
	Fase	0,9584	0,9668	0,9693	0,8473	0,8437	0,8449	0,8995	0,9113	0,9014
Ensaio 04	Amp	0,9932	0,9966	0,9973	0,9951	0,9947	0,9946	0,9433	0,9266	0,9383
	Fase	0,9332	0,9444	0,9572	0,9707	0,9683	0,9675	0,8908	0,8784	0,9039
Ensaio 05	Amp	0,9739	0,9746	0,9754	0,9948	0,9949	0,9948	0,9846	0,9831	0,9688
	Fase	0,9669	0,9749	0,9750	0,9476	0,9127	0,9138	0,9344	0,9353	0,9255
Média	Amp	0,9895	0,9906	0,9915	0,9933	0,9928	0,9934	0,9696	0,9666	0,9666
	Fase	0,9423	0,9536	0,9609	0,9256	0,9076	0,8998	0,9131	0,9134	0,9060
Desvio padrão	Amp	0,0088	0,0090	0,0090	0,0034	0,0043	0,0035	0,0163	0,0237	0,0167
	Fase	0,0314	0,0253	0,0154	0,0478	0,0518	0,0474	0,0177	0,0234	0,0134

nas três frequências, havendo uma maior variação à medida que se aumenta a frequência.

Na figura 5.26 são apresentadas algumas imagens sintetizadas na frequência de 11 mHz. É possível verificar a semelhança indicada pelos índices e comprovar que foi possível obter uma imagem representativa para o ensaio de acordo com a metodologia aplicada. A diferença nas imagens que mais impactou no índice foi o ruído que gera padrões verticais e algumas distorções nas imagens, o qual não aparece ou com menor influência do que na

imagem obtida experimentalmente (presente na figura 5.26 (c), porém quase imperceptível na figura (d)).

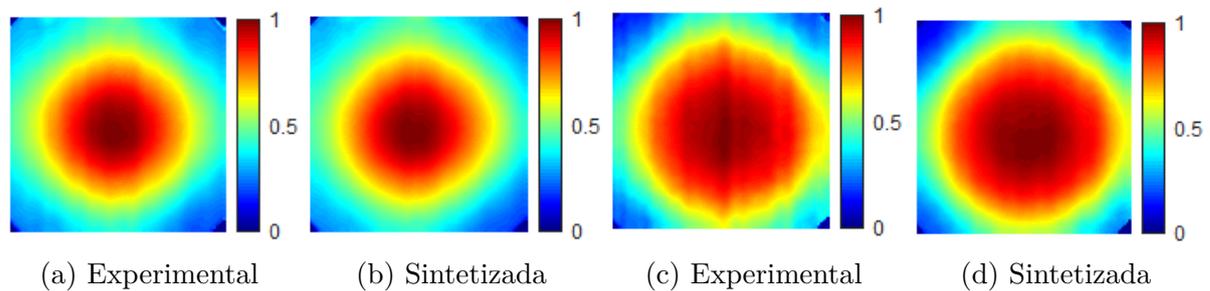


Figura 5.26 – Imagens sintetizadas de amplitude (a - b) e fase (c - d) da célula saudável.

Para o ajuste do modelo utilizando a função *fit*, foram obtidos valores que demonstram a sua qualidade. Os valores médios do coeficiente de determinação R^2 , obtidos para os ensaios realizados, são maiores do que 0,9 para as frequências utilizadas. Esses valores foram obtidos para cada *pixel* da imagem e feita uma média geral. Já o erro quadrático médio, variou entre 0,09 °C e 0,16 °C, com o maior erro para os ajustes realizados utilizando os sete períodos iniciais do vídeo (maior quantidade de dados). Estes valores demonstram que foi possível realizar um bom ajuste do modelo, com coeficiente alto aliado à um erro quadrático baixo, visto que a variação de temperatura nos ensaios possui valores maiores do que 1,5°C (erro de 10%, no pior caso).

Comparando os resultados das médias dos índices obtidos para síntese das imagens (Tabela 5.7), com os índices obtidos na avaliação das imagens experimentais no regime transiente e permanente (Tabela 5.5), é possível verificar que, apesar de serem semelhantes, a média do índice das imagens sintetizadas é superior à média das imagens obtidas no regime transiente ou no permanente. A exceção se faz para as imagens de fase obtidas no regime permanente com frequência de 11 mHz, que tem maior média do que para as sintetizada (diferença de 0,0085, no caso da síntese com sete períodos). Na figura 5.27 está representada essa análise, indicando que, fora este caso específico, existe maior probabilidade de obter uma imagem mais representativa e próxima do efeito utilizando alguma forma de síntese do que escolher uma das geradas no regime transitório ou permanente.

5.3.1.2 Célula 02 - Defeituosa

Para a célula 02, os resultados encontrados estão presentes na tabela 5.8. Verificando os índices obtidos, é visto que o comportamento de similaridade observado na célula 01 se repete para esta célula, na frequência de 11 mHz. As médias dos índices estão bem próximas do valor máximo, contudo, para as de fase no ensaio 02, foram obtidas algumas imagens não tão próximas, causando um aumento do desvio padrão.

Porém, para as frequências de 50 e 100 mHz, existe uma maior variação entre as imagens obtidas nos ensaios, com o desvio padrão maior em até dez vezes com relação

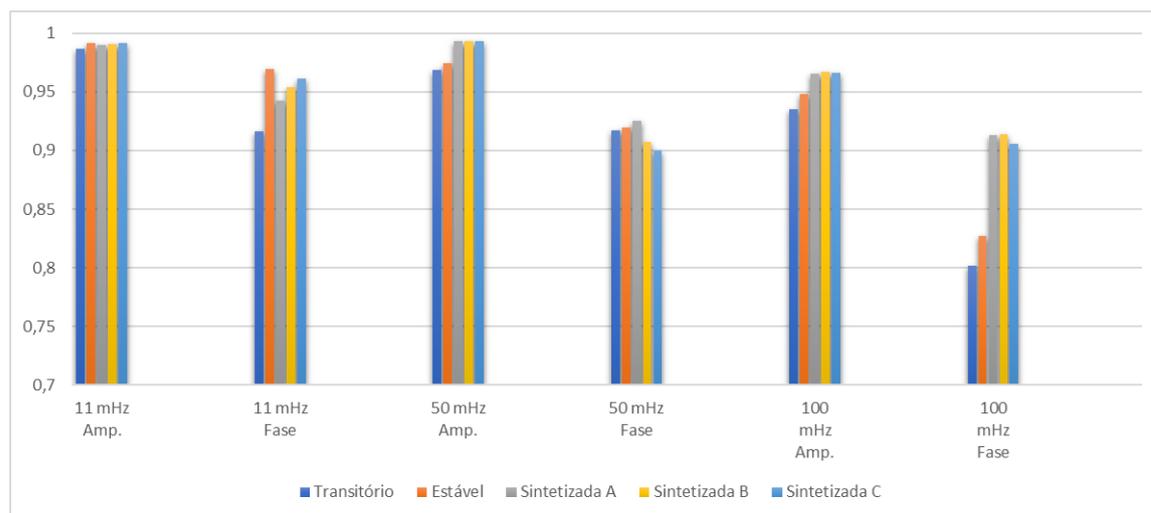


Figura 5.27 – Gráfico das médias dos índices *SSIM* para imagens de amplitude e fase, no regime transitório, permanente e sintetizadas, da célula 01. A letra do Sintetizada (A, B ou C) indica a quantidade de períodos, A (3, 15 ou 30 períodos), B (5, 22 ou 45 períodos) e C (7, 32 ou 64 períodos), a depender da frequência.

Tabela 5.8 – Estatísticas do índice de similaridade *SSIM* nas imagens sintetizadas para a célula 02 (11, 50 e 100 mHz)

Ensaio		11 mHz			50 mHz			100 mHz		
		03 Per.	05 Per.	07 Per.	15 Per.	22 Per.	32 Per.	30 Per.	45 Per.	64 Per.
Ensaio 01	Amp	0,9870	0,9865	0,99865	0,9617	0,9546	0,9495	0,8138	0,8819	0,9203
	Fase	0,9739	0,9785	0,9774	0,9565	0,9580	0,9617	0,3543	0,2938	0,4212
Ensaio 02	Amp	0,9951	0,9964	0,9968	0,9793	0,9967	0,9978	0,7836	0,7892	0,9567
	Fase	0,9520	0,9178	0,8924	0,8711	0,9730	0,9892	0,3863	0,2768	0,8592
Ensaio 03	Amp	0,9981	0,9995	0,9995	0,9244	0,9739	0,9695	0,8694	0,8782	0,8874
	Fase	0,9641	0,9668	0,9687	0,9288	0,9658	0,9638	0,8679	0,888	0,8855
Ensaio 04	Amp	0,9967	0,9982	0,9989	0,9941	0,9978	0,9962	0,8856	0,7729	0,808
	Fase	0,9758	0,9766	0,9768	0,9832	0,9843	0,9827	0,93	0,5409	0,3738
Ensaio 05	Amp	0,9975	0,9983	0,9985	0,9221	0,9412	0,9168	0,843	0,9017	0,917
	Fase	0,9742	0,9763	0,9718	0,9473	0,9679	0,9644	0,8542	0,9372	0,9699
Média	Amp	0,9949	0,9958	0,996	0,9563	0,9728	0,9659	0,8308	0,8448	0,8979
	Fase	0,968	0,9632	0,9574	0,9374	0,9698	0,9723	0,6785	0,5873	0,702
Desvio padrão	Amp	0,0045	0,0053	0,0054	0,0322	0,0251	0,034	0,0413	0,0591	0,0559
	Fase	0,01	0,0258	0,0365	0,042	0,0097	0,0126	0,2830	0,3152	0,2814

ao calculado para a frequência mais baixa. Apesar disso, as imagens ainda possuem altos índices e conseguem caracterizar a falha presente, como pode ser visto na figura 5.28 (a)-(b). As exceções estão nas obtidas em três ensaios com frequência de 100 mHz, que geraram imagens saturadas e que não conseguiram representar a falha presente, conforme visto em 5.28 (d).

Com relação ao ajuste do modelo, os valores de R^2 obtidos foram semelhantes aos valores da célula 01, para a frequência de 11 mHz. Para as outras frequências, eles foram mais baixos (entre **0,75** e **0,84** para 50 mHz e entre **0,80** e **0,90**, para 100 mHz) e erro quadrático médio maior (valor médio de **0,26** para 50 mHz e **0,18** para 100 mHz). Dessa forma, houve uma maior dificuldade no ajuste para estas frequências, explicando o porque de algumas imagens não serem representativas da falha.

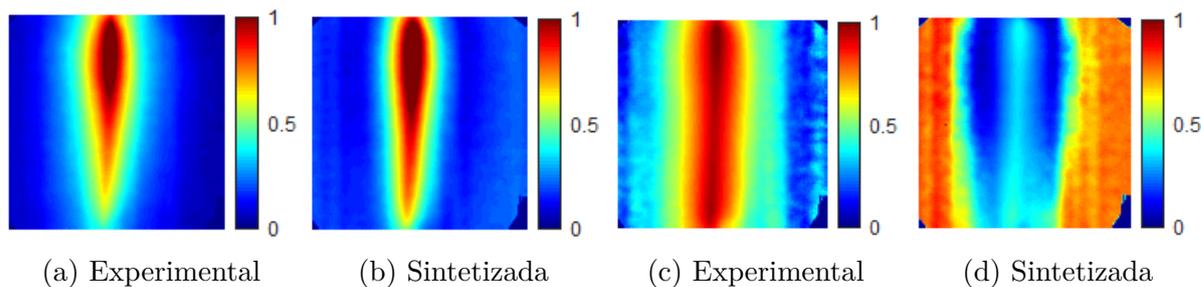


Figura 5.28 – Imagens obtidas experimentalmente e sintetizadas de amplitude (a-b) e fase (c-d) da célula 02 - defeituosa, na frequência de 100 mHz do ensaio 04.

Para a célula 02, ao comparar os resultados das tabelas 5.8 e 5.5, é possível perceber que, na maior parte dos casos, as imagens sintetizadas apresentam uma probabilidade maior de encontrar uma representação próxima do ideal, conforme visto na figura 5.29. Porém, para as imagens de fase obtidas no regime permanente com frequência de 11 mHz, o índice é superior do que para a melhor imagem sintetizada obtida com a maior quantidade de dados. Além disso, é visto que, para as imagens de fase em 100 mHz, o índice das imagens obtidas tanto no regime transiente quanto no permanente, é superior às imagens sintetizadas, devido ao fato de que imagens destoantes foram geradas na síntese dos ensaios 01 e 02, o que gerou índices baixos na comparação.

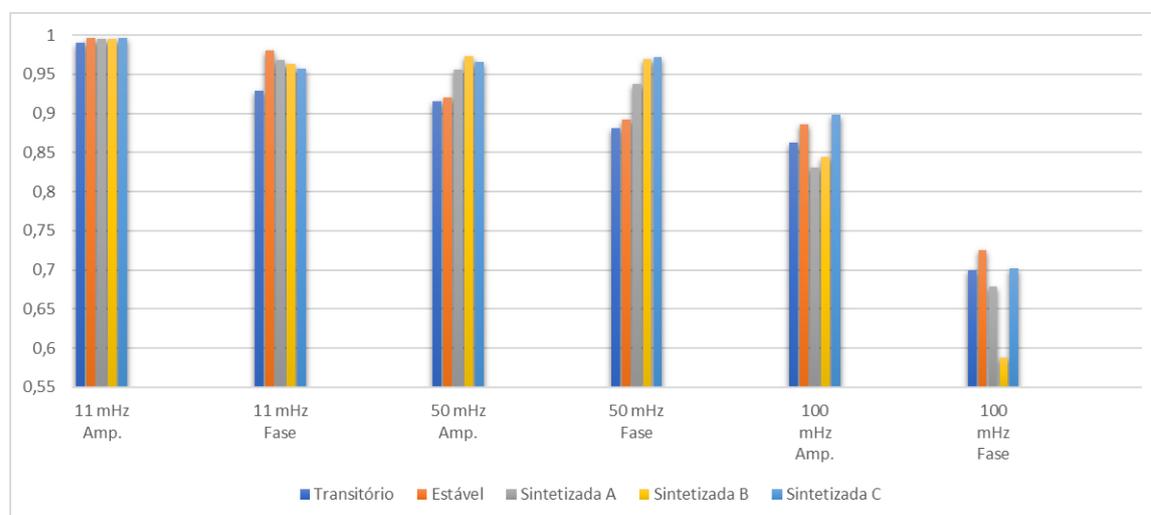


Figura 5.29 – Gráfico das médias dos índices *SSIM* para imagens de amplitude e fase, no regime transitório, permanente e sintetizadas da célula 02. A letra do Sintetizada (A, B ou C) indica a quantidade de períodos, A (3, 15 ou 30 períodos), B (5, 22 ou 45 períodos) e C (7, 32 ou 64 períodos), a depender da frequência.

5.3.1.3 Célula 03 - Defeituosa

Na tabela 5.9 estão demonstrados os resultados para a célula 03. Observa-se uma alta similaridade entre as imagens para as frequências de 11 e 50 mHz, com um desvio

padrão baixo. Entretanto, para frequência de 100 mHz, houve uma diminuição dos índices, principalmente para as imagens ajustadas pela quantidade mínima e máxima de dados.

Tabela 5.9 – Estatísticas do índice de similaridade *SSIM* nas imagens sintetizadas para a célula 03 (11, 50 e 100 mHz)

Ensaio		11 mHz			50 mHz			100 mHz		
		03 Per.	05 Per.	07 Per.	15 Per.	22 Per.	32 Per.	30 Per.	45 Per.	64 Per.
Ensaio 01	Amp	0,9538	0,9540	0,9555	0,9912	0,9890	0,9894	0,9460	0,9645	0,9763
	Fase	0,9396	0,9518	0,9546	0,9204	0,9128	0,9203	0,9077	0,7146	0,7916
Ensaio 02	Amp	0,9951	0,9961	0,9958	0,9932	0,9932	0,9930	0,9642	0,8978	0,8875
	Fase	0,9545	0,9584	0,9617	0,9328	0,9344	0,9352	0,9512	0,8910	0,8877
Ensaio 03	Amp	0,9804	0,9863	0,9884	0,9596	0,9596	0,9600	0,6762	0,9396	0,6762
	Fase	0,8843	0,9158	0,9099	0,8800	0,8800	0,8733	0,4963	0,9054	0,4963
Ensaio 04	Amp	0,9752	0,9756	0,9801	0,9886	0,9907	0,9916	0,9136	0,9434	0,9308
	Fase	0,9472	0,9522	0,9458	0,8835	0,9293	0,9248	0,8765	0,9157	0,9112
Ensaio 05	Amp	0,9630	0,9617	0,9619	0,9886	0,9922	0,9913	0,9549	0,9578	0,9611
	Fase	0,9207	0,9110	0,9110	0,9119	0,9339	0,9318	0,8549	0,8527	0,8437
Média	Amp	0,9735	0,9747	0,9763	0,9843	0,9850	0,9850	0,891	0,9406	0,8864
	Fase	0,9292	0,9378	0,9366	0,9057	0,9181	0,9171	0,8173	0,8559	0,7861
Desvio padrão	Amp	0,016	0,0173	0,0172	0,0139	0,0142	0,0141	0,1216	0,026	0,1223
	Fase	0,0281	0,0225	0,0245	0,0231	0,023	0,0251	0,183	0,0825	0,1683

No ensaio 03, os índices de similaridade obtidos possuem valores baixos, indicando que as imagens apresentaram algum problema. Avaliando as imagens, foi possível perceber que, para a síntese utilizando 30 e 64 períodos, as imagens obtidas se mostraram muito ruidosas, não apresentando o comportamento do defeito nem para amplitude e nem fase, conforme visto na figura 5.30 (b) e (d). No entanto, para 45 períodos, a imagem foi representativa, indicando as áreas onde as falhas estão presentes (5.30 (a) e (c)).

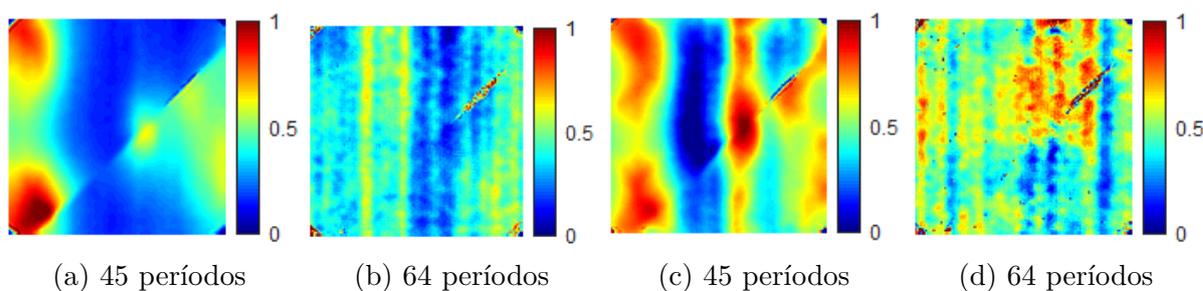


Figura 5.30 – Imagens sintetizadas de amplitude (a - b) e fase (c - d) da célula 03 - defeituosa, na frequência de 100 mHz do ensaio 03.

Para esta célula, os valores obtidos relativos ao ajuste do modelo para o R^2 tiveram valores mais baixos e variaram de acordo com a frequência. Os valores médios foram de **0,84** (11 mHz), **0,77** (50 mHz) e **0,83** (100 mHz), relatando uma maior dificuldade para ajuste do que para as outras células. O erro quadrático médio variou entre 0,1 °C e 0,19 °C, valores bem próximos dos encontrados nas outras células. Apesar dos valores menores dos coeficientes de ajuste, a maior parte das imagens obtidas foram representativas, como comentado anteriormente.

Para a célula 03, comparando as tabelas 5.9 e 5.5, é visto que as imagens sintetizadas apresentam um desempenho bem superior no fornecimento de uma representação próxima

do ideal, como pode ser visto na figura 5.31. O detalhe é que, na frequência de 100 mHz, a síntese com a quantidade intermediária de dados foi bem superior, devido aos problemas encontrados na geração das imagens para os ensaios dessa frequência, relatados na figura 5.30.

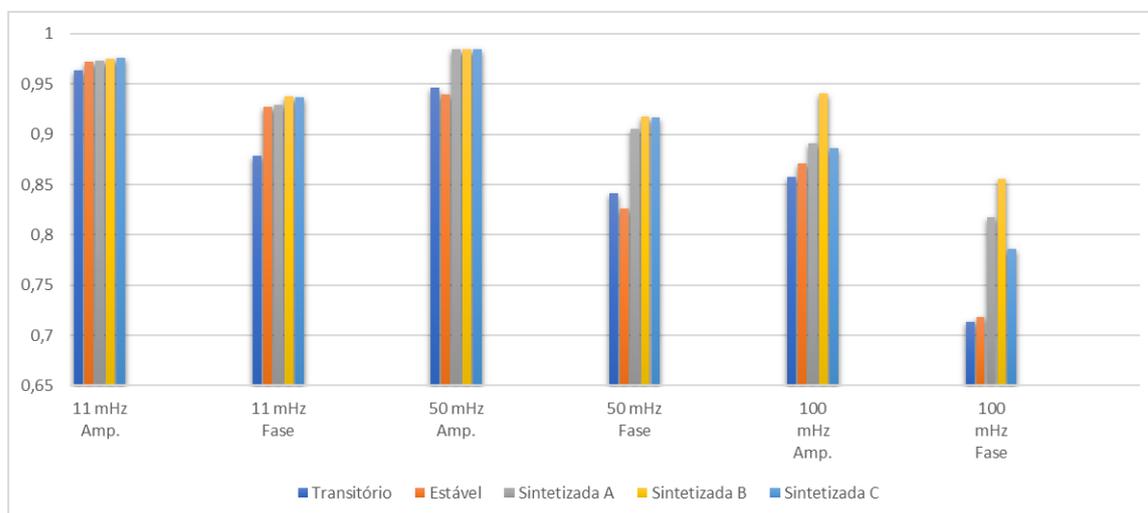


Figura 5.31 – Gráfico das médias dos índices SSIM para imagens de amplitude e fase, no regime transitório, permanente e sintetizadas da célula 03. A letra do Sintetizada (A, B ou C) indica a quantidade de períodos, A (3, 15 ou 30 períodos), B (5, 22 ou 45 períodos) e C (7, 32 ou 64 períodos), a depender da frequência.

5.3.1.4 Comparativo entre imagens de acordo com a quantidade de quadros utilizados

Outra avaliação realizada foi a influência da quantidade de dados utilizados para realizar o ajuste do modelo. Foram geradas imagens com três quantidade de quadros, de acordo com a tabela 5.10. As imagens geradas foram comparadas com a imagem referência obtida com os dados dos vídeos, para o regime permanente, e seus índices comparados entre si para verificar qual se aproximava mais da referência.

Tabela 5.10 – Quantidade de quadros utilizadas para ajuste dos modelos de acordo com a quantidade de períodos.

	11 mHz	50 mHz	100 mHz
Quadros	8184 (03 Períodos)	9000 (15 Períodos)	9000 (30 Períodos)
	13640 (05 Períodos)	13200 (22 Períodos)	13500 (45 Períodos)
	19096 (07 Períodos)	19200 (32 Períodos)	19200 (64 Períodos)

De acordo com [10], à medida que se aumenta a quantidade de ciclos (períodos) no ensaio, mais energia está sendo depositada na peça e a relação sinal-ruído aumenta. Então, o aumento da quantidade de dados deve produzir imagens mais próximas do esperado no estado permanente. Observando as imagens e avaliando, de maneira qualitativa, é possível perceber este efeito. É possível verificar nas imagens de fase da célula 01, presentes nas

figuras 5.32 (e)-(h), que a medida que é utilizada uma quantidade maior de dados, a imagem sintetizada se assemelha a imagem de referência (e).

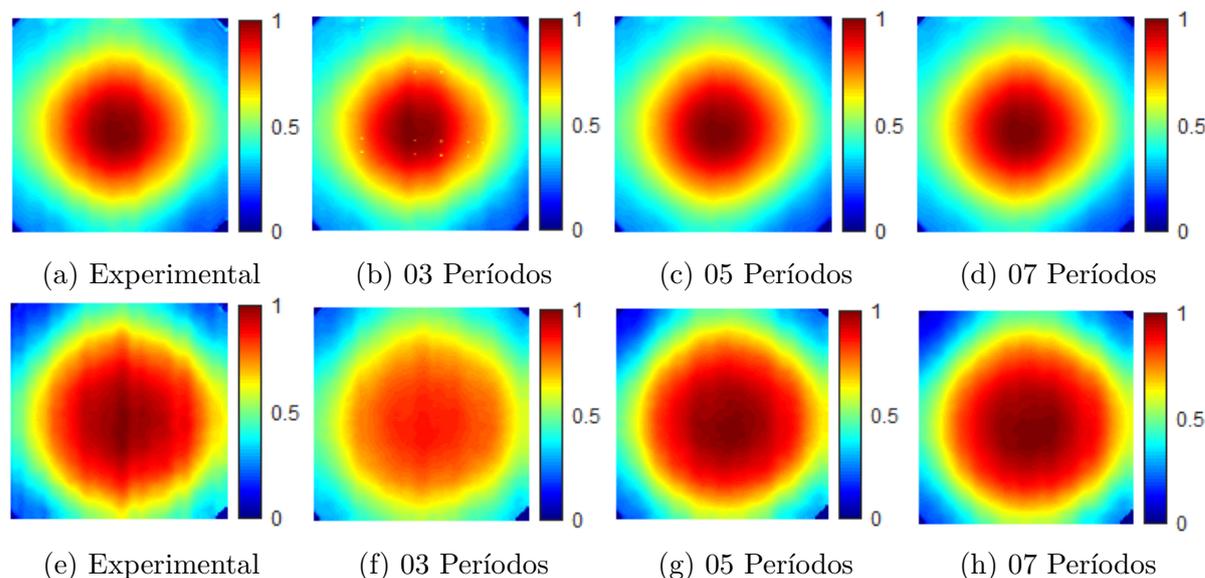


Figura 5.32 – Imagens sintetizadas de amplitude (a - d) e fase (e - h) da célula saudável em um ensaio de 11 mHz, em períodos do regime permanente.

Analisando as médias dos índices obtidos, de acordo com as tabelas 5.7, 5.8 e 5.9, verifica-se que, ao utilizar mais dados na frequência 11 mHz, é identificado o aumento dos índice em cada ensaio e da média geral deles. Já para as frequências de 50 e 100 mHz, esse comportamento é até encontrado em alguns ensaios, porém existe uma variação maior, com a oscilação do índice ou mesmo diminuição ao aumentar a quantidade de dados. Na figura 5.33 esse comportamento está indicado utilizando um gráfico com os valores e desvios padrões das células nas frequências de 11 e 100 mHz.

Com relação a essa diminuição, em alguns casos a variação do índice é bem pequena, ocasionada pela presença de um ruído ou pequena variação na área defeituosa, devido ao formato ou característica do defeito. Por exemplo, nos casos para a frequência de 11 mHz, a diferença do índice para o ajuste com a menor quantidade de dados para maior é de 0,007 (11 mHz, imagem de amplitude do ensaio 02), menor do que 1% do valor do índice, imperceptível à visão.

Apesar disso, a variação que ocorre não causa perda na capacidade de identificar a falha. Nos casos que a queda do índice é maior, observadas nas imagens das células defeituosas, o problema se deve às questões relatadas de saturação/perda de quadros, e que geram imagens bem distantes do padrão esperado.

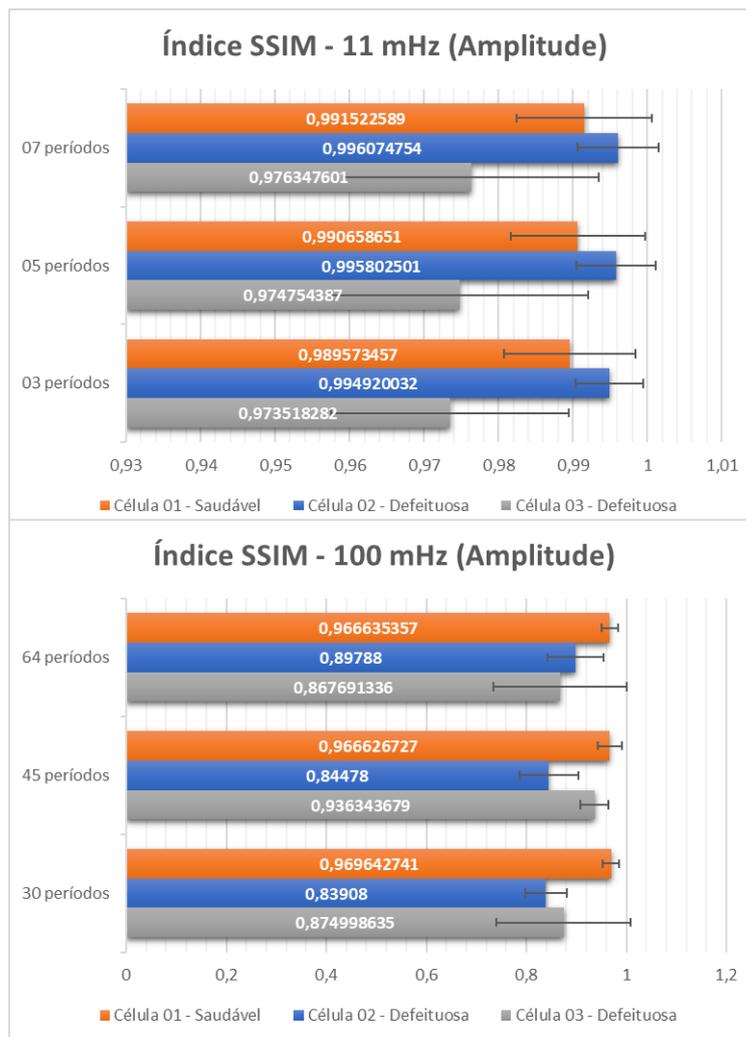


Figura 5.33 – Representação gráfica dos índices *SSIM* para imagens de amplitude e fase, indicando a média e o desvio padrão das imagens sintetizadas para a quantidade de dados (períodos) definida.

5.3.2 Aplicação do método para obtenção das imagens sintetizadas em vídeo de tamanho reduzido

Com base nos resultados obtidos até aqui, um método proposto para obtenção das imagens sintetizadas nos casos de uso de um vídeo de tamanho reduzido foi aplicado e seus resultados são mostrados nesta seção.

Utilizando os ensaios anteriormente realizados e aplicando o método para obtenção das imagens de amplitude e fase em ensaios mais curtos (utilizando os dados de 12 minutos de vídeo), foi possível obter imagens que representam bem o comportamento da célula com relação ao esperado em seu regime permanente, como representado em alguns exemplos da figura 5.34. Avaliando qualitativamente os resultados encontrados, é visto que na maior parte do ensaios foram obtidos resultados satisfatórios, destacando os defeitos. A exceção ocorreu em apenas três dos quarenta e cinco ensaios, onde nesses as imagens sintetizadas não tiveram boa definição dos defeitos, sem destacar com muita clareza a região do defeito.

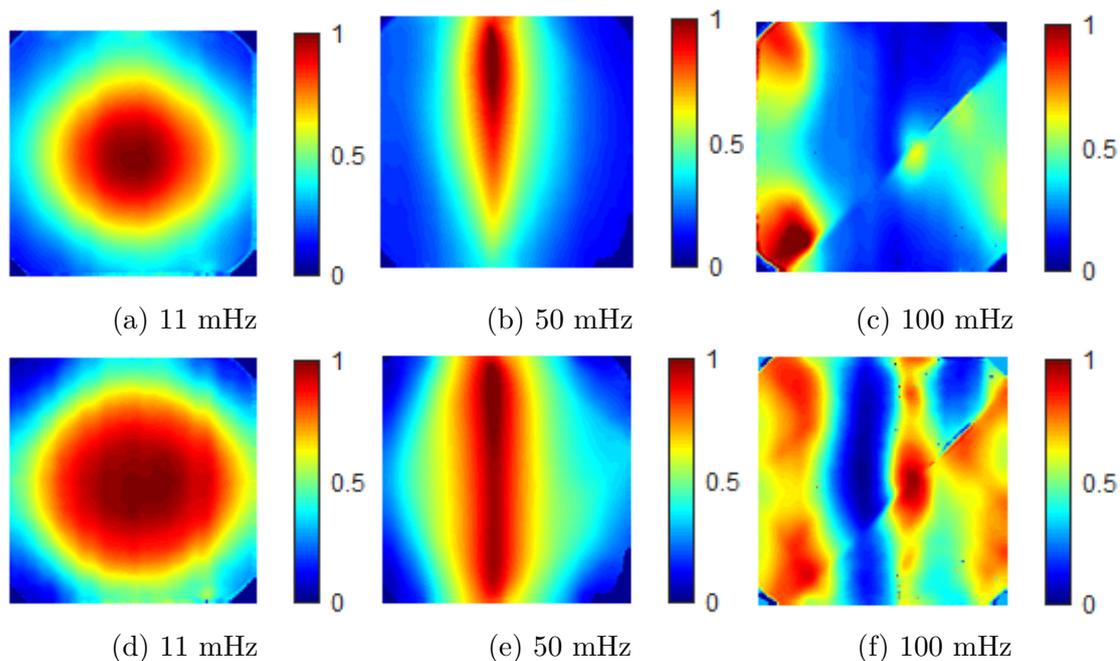


Figura 5.34 – Imagens de amplitude (a - c) e fase (d - f) sintetizadas das três células, utilizando o método proposto para obter a imagem em um ensaio curto.

Comparativos foram feitos utilizando os índices de similaridade entre a imagem sintetizada e a imagem de referência deste ensaio, no regime permanente. Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 5.11, com destaques em cinza para os resultados superiores obtidos pelo método e em preto para os problemas identificados.

Na célula 01, foi possível verificar que as imagens para todas as células e frequências obtiveram índice de similaridade acima de 0,9, indicando imagens bem semelhantes à de referência no regime permanente. Destaca-se também que, para esta célula, os índices de similaridade para imagens de amplitude não só foram bem próximos do valor máximo como também foram superiores à síntese sem utilizar o método proposto, apenas utilizando os trinta primeiros períodos subsequentes. Das quinze imagens sintetizadas, onze tiveram resultados melhores (73,33%). Para a frequência de 100 mHz, especificamente, quase todos os resultados obtidos para o método foram superiores, com exceção da imagem de fase para o ensaio 01.

Para as células defeituosas, as imagens de fase foram as que obtiveram resultados melhores, sendo doze (80%) e nove (60%) melhores para as células 02 e 03, respectivamente. Isso ocorre pelo fato de que, como visto nos resultados da seção 5.2.4, as imagens de fase para estas frequências maiores apresentam uma variação entre períodos subsequentes, com algumas imagens dissimilares aparecendo durante o transiente e inserindo ruídos nos dados. Como o método utilizado busca selecionar as imagens semelhantes para ajustar o modelo, esse efeito foi reduzido, eliminando alguns destes períodos dissimilares.

Em alguns casos, a síntese utilizando o método proposto obteve um resultado muito

Tabela 5.11 – Estatísticas do índice de similaridade *SSIM* das imagens sintetizadas pelo método proposto em caso de vídeo reduzidos, comparando com a síntese que utiliza os primeiros períodos sem análise ("Normal", na tabela), para as frequências (11, 50 e 100 mHz) das células estudadas, após uso do filtro Gaussiano.

Ensaio (11 mHz)	Síntese	Célula 01		Célula 02		Célula 03	
		Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Ensaio 01	Normal	0,9955	0,9182	0,9870	0,974	0,9538	0,9396
	Método	0,9957	0,9837	0,9857	0,9767	0,9569	0,9465
Ensaio 02	Normal	0,9915	0,9684	0,9951	0,952	0,9951	0,9545
	Método	0,9901	0,9631	0,9954	0,9688	0,9933	0,9611
Ensaio 03	Normal	0,9937	0,9585	0,9981	0,9642	0,9804	0,8843
	Método	0,9956	0,9598	0,9984	0,9681	0,9865	0,9118
Ensaio 04	Normal	0,9932	0,9332	0,9967	0,9759	0,9753	0,9473
	Método	0,9946	0,9242	0,9985	0,9761	0,9732	0,9374
Ensaio 05	Normal	0,9739	0,9670	0,9976	0,9743	0,963	0,9207
	Método	0,9731	0,9713	0,9958	0,9798	0,9584	0,8976
Ensaio (50 mHz)	Síntese	Célula 01		Célula 02		Célula 03	
		Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Ensaio 01	Normal	0,9974	0,9459	0,9617	0,9565	0,9913	0,9205
	Método	0,9981	0,9458	0,9546	0,9570	0,9786	0,9241
Ensaio 02	Normal	0,9897	0,9165	0,9793	0,8711	0,9932	0,9328
	Método	0,9903	0,8794	0,9962	0,9858	0,9910	0,9500
Ensaio 03	Normal	0,9898	0,8473	0,9245	0,9289	0,9597	0,8800
	Método	0,9900	0,8513	0,9188	0,9280	0,9619	0,8754
Ensaio 04	Normal	0,9952	0,9707	0,9941	0,9833	0,9886	0,8836
	Método	0,9896	0,9575	0,9924	0,9836	0,9928	0,9349
Ensaio 05	Normal	0,9949	0,9476	0,9221	0,9473	0,9886	0,9119
	Método	0,9932	0,9127	0,9520	0,9803	0,9914	0,9230
Ensaio (100 mHz)	Síntese	Célula 01		Célula 02		Célula 03	
		Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Ensaio 01	Normal	0,9731	0,9469	0,7820	0,6877	0,9460	0,9077
	Método	0,9754	0,9040	0,8139	0,7875	0,9170	0,7197
Ensaio 02	Normal	0,9809	0,9183	0,7836	0,3863	0,9642	0,9512
	Método	0,9875	0,9323	0,9637	0,6757	0,8592	0,8080
Ensaio 03	Normal	0,9663	0,8995	0,8694	0,8679	0,6762	0,4963
	Método	0,9889	0,9092	0,8761	0,8392	0,9204	0,8666
Ensaio 04	Normal	0,9266	0,8783	0,8856	0,9300	0,9136	0,8765
	Método	0,9630	0,9267	0,7296	0,7667	0,9337	0,9200
Ensaio 05	Normal	0,9846	0,9345	0,8430	0,8542	0,9630	0,9207
	Método	0,9912	0,9447	0,8887	0,9581	0,9684	0,9076

superior, destacado pelos índices encontrados. Exemplos identificados foram os obtidos para a frequência de 100 mHz, nos ensaios 02 e 05 da célula 02 e nos ensaios 03 e 04 da célula 03. Esse comportamento também devido à escolha dos períodos mais semelhantes na hora do ajuste do modelo, sendo que, provavelmente nestes ensaios, os trinta primeiros períodos não possuíam boa similaridade com a imagem de referência, e com a possibilidade de escolher os melhores dentre todo o transiente foi possível eliminá-los na seleção dos dados para o ajuste.

Em três ensaios, as imagens obtidas utilizando o método proposto não apresentaram uma definição tão clara do defeito existente, refletindo nos índices mais baixos (células em negrito) na tabela 5.11. Analisando esses ensaios e as tabelas 5.3 e 5.4, é possível ver

que o índice de similaridade nesses ensaios foi menor, indicando a presença de imagens dissimilares. Para célula 02, no ensaio 04 o índice da imagem de amplitude foi de 0,8528. Para fase, nos ensaios 02 e 04, os índices foram de 0,7244 e 0,7356, respectivamente, mais baixos que de outros ensaios. Além disso, o desvio padrão foi mais alto neles para as imagens de amplitude e fase. Com base nesses dados e avaliando as imagens dos primeiros períodos destes ensaios, foi verificado que boa parte delas apresentavam comportamento diferente do esperado e muito ruidosas, o que impactou negativamente na síntese utilizando o método.

Para contornar este problema, foi feita uma adaptação no método, diminuindo a quantidade de períodos utilizados para sintetizar as imagens nestes casos, de 30 para 15. Percebeu-se que houve uma melhora nos índices, como visto para célula 02, nos ensaios 01 (amplitude, de 0,8139 para 0,9475, e fase, de 0,7875 para 0,8285) e 04 (amplitude, de 0,7296 para 0,7111, e fase, de 0,7667 para 0,8968), assim como para célula 03 (amplitude, de 0,9710 para 0,9799, e fase, de 0,7197 para 0,9077). A exceção foi para o ensaio 02 da célula 02, onde não foi possível obter uma imagem representativa mesmo com essas alterações. Mesmo assim, em linhas gerais, foi possível obter imagens mais próximas, sem a presença de tantos ruídos, devido ao fato de ter reduzido mais ainda a participação dos dados que apresentavam esses problemas na geração das imagens. Na figura 5.35, estão representadas as imagens desses problemas e suas resoluções.

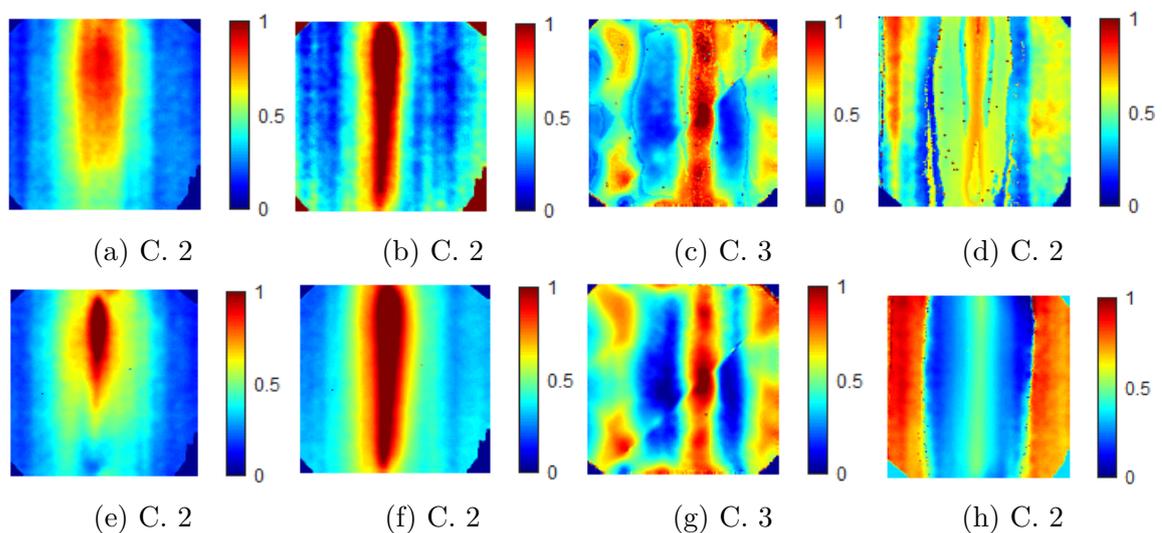


Figura 5.35 – Diferença entre as imagens sintetizadas utilizando o método proposto, variando a quantidade de períodos utilizada na síntese. Para gerar as imagens (a - d), foi feito o uso de 30 períodos e em (e - h), feito o uso de 15 períodos, com os dados dos ensaios de 100 mHz. Na legenda de cada imagem está indicada de qual célula ela foi obtida.

6 Conclusões

Nesta dissertação foi investigada uma forma de reduzir o tempo dos ensaios de termografia ativa modulada aplicada em células fotovoltaicas, utilizando informações obtidas durante o transiente térmico de aquecimento. Trabalhos relacionados ([12], [13] e [10]) mostraram a possibilidade de uso de dados do transiente para melhoria dos resultados e redução do tempo de ensaio, motivando a aplicação desse método em células fotovoltaicas.

Inicialmente, foi realizada a implementação de um arranjo experimental para obter imagens de termografia ativa modulada das células estudadas. Os resultados obtidos foram compatíveis com os observados por Vieira [28], representando o comportamento das células, tanto saudáveis como defeituosas, assim como para os ensaios de eletroluminescência realizados. Alguns problemas foram detectados na geração das imagens durante os testes realizados (saturação e perdas de quadros) porém, utilizando algumas estratégias definidas, foi possível corrigir a maior parte dos casos e gerar resultados menos ruidosos. Dessa forma, reforça-se a aplicabilidade do método e sua eficácia para que seja utilizado como base nas análises feitas nesse trabalho.

Foram obtidas imagens de amplitude e fase de diversos períodos no vídeo produzido no ensaio para verificar a possibilidade do uso de imagens no transiente através de um comparativo com índices de similaridade. Foi possível perceber que as imagens de amplitude apresentam uma alta similaridade (>90%) na maior parte dos casos, indicando uma grande chance de uso do transitório na sua obtenção. Porém, as imagens de fase apresentaram grande oscilação no seu perfil, indicada nos índices mais baixos e também nas análises qualitativas realizadas. Modificando a frequência de excitação, foi visto que quanto maior a frequência, mais difícil se tornava obter uma imagem representativa, com grande variação das regiões identificadas entre os períodos e distantes do padrão obtido no regime permanente. Outro ponto avaliado pelo trabalho foi o uso de diversos períodos do regime transiente para obtenção de imagens mais fiéis às obtidas no regime permanente. Assim como relatado na literatura [24], esse método não causou uma maior similaridade em comparação com o padrão do regime permanente. Desta forma, é possível notar que apenas escolher um período durante o transiente ou realizar a concatenação de vários não garante que as imagens obtidas são representativas ou indicam corretamente o comportamento da célula.

Os dois índices mostraram resultados, em geral, próximos (variação média de 10%), destoando bastante apenas quando as imagens comparadas eram bem diferentes da imagem de referência, onde o valor do índice *MS-SSIM* apresentou valor muito menor (menos da metade do valor para o índice *SSIM*). Além disso, eles apresentaram um comportamento

semelhante, aumentando ou diminuindo seu valor à medida que se comparava imagens mais ou menos semelhantes, respectivamente, conforme encontrado em [24]. Desta forma, percebe-se que o índice multi-escala se mostra mais sensível às alterações na imagens, em comparação com o tradicional. Ademais, o uso destes índices mostrou-se uma ferramenta importante neste tipo de análise quantitativa, sendo um complemento para avaliações qualitativas, que é a forma mais comum de análise de imagens obtidas em ensaios de termografia.

O ajuste dos dados do transiente para obtenção dos modelos obteve sucesso para sintetizar imagens tanto de amplitude quanto de fase. Nas análises qualitativas, as imagens obtidas apresentavam regiões mais homogêneas do que as obtidas nos experimentos, com uma grande redução de ruídos na imagem, como visto em outros trabalhos estudados [12], [13], [10]. Observando as médias dos índices do comparativo entre estas imagens e a do regime permanente obtidas experimentalmente, nota-se que as baseadas no modelo não só conseguem identificar os defeitos como tem índice maior de similaridade com relação ao padrão, mostrando-se uma forma mais confiável de obtenção do resultado do ensaio. Além disso, diminui o tempo de ensaio pois só utiliza, no máximo (para o caso onde utiliza a maior quantidade de dados) 12 minutos de ensaio, diferente dos 55 minutos que é geralmente usado (redução de 78,2% do tempo). Ainda sobre o ajuste, foi possível identificar que o uso de uma maior quantidade de quadros para criar o modelo de ajuste dos dados geralmente fornece um melhor ajuste e imagens mais próximas da referência obtida experimentalmente. Porém, caso os dados que se localizam entre a quantidade menor de períodos e a maior apresentem ruídos, o uso dessa quantidade maior gera imagens mais distantes do padrão, apresentando distorções ou saturadas. Nestes casos, o uso de um algoritmo para identificar quais períodos são os mais ruidosos, ao realizar uma comparação entre eles e excluindo os menos similares, permite mitigar esses efeitos, gerando imagens semelhantes ao padrão do regime permanente.

Sendo assim, foi implementado um método para seleção dos períodos e obtenção da imagem que represente o resultado esperado em regime permanente porém usando os dados de um ensaio de tempo curto. O método foi testado nos ensaios realizados anteriormente e foi percebido que, na maioria dos casos, fazer a escolha dos períodos ao comparar a similaridade das imagens entre si permitiu gerar imagens mais próximas do padrão esperado no regime permanente, excluindo ou diminuindo a influência das imagens dissimilares. Em três casos, as imagens obtidas utilizando o método não tiveram um bom resultado, provavelmente pelo fato de uma boa parte dos períodos do transiente do vídeo não ter o padrão esperado no regime permanente. Como solução, foi proposto o uso de uma menor quantidade de quadro do que a definida (9000), e isso gerou imagens melhores em dois deles. Em apenas um dos 45 testes que não foi possível obter uma imagem representativa, mesmo após todos os pós-processamentos propostos, provavelmente por conta da baixa qualidade do ensaio realizado.

Dessa forma, após o estudo e aplicação das técnicas e métodos neste trabalho assim como a análise dos resultados obtidos, sugere-se a utilização do método proposto para ajuste dos dados e seleção de períodos como forma de geração das imagens de amplitude e fase utilizando *FFT*, como forma de redução do tempo de ensaio de termografia ativa modulada para células fotovoltaicas. Analisando as estatísticas para os diversos ensaios realizados, foi possível perceber que este método gerou imagens mais próximas da representação do comportamento das células, em comparação com os outros métodos testados (sintetizar imagens com os primeiros períodos do vídeo - sem selecionar os períodos, concatenar vários períodos para gerar as imagens ou escolher um período aleatório no regime transitório para gerar as imagens). Aplicando a metodologia proposta, foi possível obter imagens semelhantes ao regime permanente em 72,2 % dos casos. Uma melhoria identificada na análise dos resultados foi na escolha do número de períodos utilizados para o ajuste do modelo, sugerindo, portanto, aproximadamente 20 % do número de períodos, sendo sempre no mínimo 03.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se um melhor pré-processamento dos dados utilizados na *FFT*, de forma que seja possível remover os ruídos encontrados nas análises realizadas neste trabalho. O uso de uma técnica que permita identificar e corrigir a defasagem e *offset* no sinal, que ocorre na perda de quadros existentes em alguns vídeos, a suavização nos dados das medições feitas para poderem gerar imagens mais precisas das células, resolvendo os problemas identificados neste trabalho. Essa correção também pode ser feita para auxiliar o ajuste do modelo e obtenção de melhores imagens sintetizadas. Outro ponto seria realizar outro método de processamento, ao invés de utilizar a *FFT*, para verificar se os resultados obtidos são menos ruidosos para as frequências maiores. Com relação ao método proposto para seleção dos períodos em um vídeo curto, sugere-se o teste de outras técnicas ou outros parâmetros para escolha dos períodos, para melhorar ainda mais a escolha dos dados para o ajuste do modelo.

Outra sugestão seria avaliar a metodologia desenvolvida neste trabalho em módulos fotovoltaicos, verificando a obtenção e sintetização de imagens durante o transiente térmico de aquecimento deles. Por fim, outra sugestão seria a utilização de alguma técnica de aprendizado de máquina para desenvolver modelos que possam identificar o estado das células ou sintetizar imagens mais precisas sobre o comportamento da célula. Para este fim, podem ser utilizados os dados de temperatura, os valores dos índices de similaridade ou as imagens obtidas nos ensaios e as sintetizadas.

Referências

- 1 ABSOLAR. *Energia Solar Fotovoltaica no Brasil - Infográfico ABSOLAR*. [S.l.], 2024. Citado na página 1.
- 2 IRENA; CPI. *Global landscape of renewable energy finance*. [S.l.], 2023. Citado na página 1.
- 3 IEA. *Solar PV*. [S.l.], 2023. Citado na página 1.
- 4 KINGMA, A. et al. Study of the physical and chemical origin of features observed in luminescence and thermography images of cu(in,ga)se2. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 230, p. 111145, 2021. ISSN 0927-0248. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024821001872>>. Citado na página 2.
- 5 MELLIT, A.; TINA, G.; KALOGIROU, S. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 1–17, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118301370>>. Citado na página 2.
- 6 GUO, X.; CAI, J. Optical stepped thermography of defects in photovoltaic panels. *IEEE Sensors Journal*, v. 21, n. 1, p. 490–497, 2021. Citado na página 2.
- 7 BREITENSTEIN, W. W. O.; LANGENKAMP, M. *Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*. 2nd. ed. [S.l.]: Springer Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-02416-0, 978-3-642-02417-7. Citado 7 vezes nas páginas 2, 5, 6, 14, 15, 17 e 18.
- 8 TSAI, D.-M.; WU, S.-C.; LI, W.-C. Defect detection of solar cells in electroluminescence images using fourier image reconstruction. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 99, p. 250–262, 2012. ISSN 0927-0248. 9th International Meeting on Electrochromism. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702481100688X>>. Citado na página 2.
- 9 DEITSCH, S. et al. Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images. *Solar Energy*, v. 185, p. 455–468, 2019. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19302014>>. Citado na página 2.
- 10 MATARRESE, T.; PALUMBO, D.; GALIETTI, U. Comparison in the transient regime of four lock-in thermography algorithms by means of synthetic and experimental data on cfrp. *NDT & E International*, v. 139, p. 102925, 2023. ISSN 0963-8695. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869523001408>>. Citado 7 vezes nas páginas 2, 8, 17, 68, 75, 81 e 82.
- 11 PITARRESI, G. Lock-in signal post-processing techniques in infra-red thermography for materials structural evaluation. *Experimental Mechanics*, v. 55, p. 667–680, 04 2015. Citado na página 3.

- 12 CHATTERJEE, K.; TULI, S. Image enhancement in transient lock-in thermography through time series reconstruction and spatial slope correction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 61, n. 4, p. 1079–1089, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 3, 7, 81 e 82.
- 13 LUO, Z.-T. et al. Nondestructive inspection of subsurface defects in metals by transient lock-in thermography. In: IEEE. *2023 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*. [S.l.], 2023. p. 66–70. Citado 4 vezes nas páginas 3, 7, 81 e 82.
- 14 IBARRA-CASTANEDO, C.; TARPANI, J. R.; MALDAGUE, X. P. Nondestructive testing with thermography. *European Journal of Physics*, IOP Publishing, v. 34, n. 6, p. S91, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 13.
- 15 SPAGNOLO, G. S. et al. A review of ir thermography applied to pv systems. In: *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 879–884. Citado na página 5.
- 16 VIEIRA, T. M. et al. Diagnóstico de células fotovoltaicas por termografia ativa modulada. In: *COEMI SE, Aracaju, SE, BRA, Dezembro 12, 2022*. [S.l.: s.n.], 2022. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- 17 MOUSTAKIDIS, S. et al. Excitation-invariant pre-processing of thermographic data. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, v. 232, n. 4, p. 435–446, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1748006X18770888>>. Citado na página 6.
- 18 BREITENSTEIN, O. et al. Can luminescence imaging replace lock-in thermography on solar cells and wafers? In: *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 000062–000062. Citado na página 6.
- 19 BREITENSTEIN, O. et al. On the detection of shunts in silicon solar cells by photo- and electroluminescence imaging. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 16, n. 4, p. 325–330, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.803>>. Citado na página 6.
- 20 RAMSPECK, K. et al. Recombination current and series resistance imaging of solar cells by combined luminescence and lock-in thermography. *Applied Physics Letters*, v. 90, n. 15, p. 153502, 04 2007. ISSN 0003-6951. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.2721138>>. Citado na página 6.
- 21 HALWACHS, M. *Development of a Dark Lock-in thermography (DLIT) system and its application for characterizing thin film and crystalline photovoltaic generators*. Dissertação (Mestrado) — TU Wien, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 6, 13, 16, 17 e 36.
- 22 STOYNOVA, A. V.; BONEV, B. B. Improvement the post-processing quality in lock-in thermography. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIRCUITS, SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, 2019*. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:225060962>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 15.

- 23 MOHAMED, D. et al. Enhancing defect detection using lock in thermography. In: *25th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–9. Citado na página 8.
- 24 SAPIETA, M. et al. The impact of excitation periods on the outcome of lock-in thermography. *Materials*, v. 16, n. 7, 2023. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/16/7/2763>>. Citado 8 vezes nas páginas 9, 41, 54, 63, 64, 65, 81 e 82.
- 25 WANG, Z. Applications of objective image quality assessment methods [applications corner]. *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 28, n. 6, p. 137–142, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 23.
- 26 SARA, U.; AKTER, M.; UDDIN, M. S. Image quality assessment through fsim, ssim, mse and psnr—a comparative study. *Journal of Computer and Communications*, v. 07, p. 8–18, 01 2019. Citado na página 9.
- 27 SMETS, A. et al. *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. Bloomsbury USA, 2016. ISBN 9781906860325. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=as3JEAAAQBAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- 28 VIEIRA, T. M. *DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE MONITORAMENTO E DETECÇÃO DE DEFEITOS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS UTILIZANDO TERMOGRAFIA ATIVA MODULADA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Sergipe, 2023. Citado 6 vezes nas páginas 11, 12, 16, 29, 33 e 81.
- 29 PASIN, D. G. *RESPOSTA ESPECTRAL E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE CÉLULA SOLAR DE TRIPLA JUNÇÃO*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. Citado na página 11.
- 30 NETO, J. R. D. A.; CANUTO, J.; RIFFEL, D. End em células fotovoltaicas por eletroluminescência: Câmeras de baixo custo. In: *22ª IEV – Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 34.
- 31 COMMUNICATIONS, A. *O uso do infravermelho em aplicações de vigilância*. [S.l.], 2018. Citado na página 14.
- 32 HE, Y. et al. Infrared machine vision and infrared thermography with deep learning: A review. *Infrared Physics & Technology*, v. 116, p. 103754, 2021. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449521001262>>. Citado na página 14.
- 33 SCHMIDT, C.; ALTMANN, F.; BREITENSTEIN, O. Application of lock-in thermography for failure analysis in integrated circuits using quantitative phase shift analysis. *Materials Science and Engineering: B*, v. 177, n. 15, p. 1261–1267, 2012. ISSN 0921-5107. MicroTherm2011 – Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510712000931>>. Citado na página 15.

- 34 GONZALEZ, R.; WOODS, R. *Digital Image Processing*. Pearson, 2018. ISBN 9780133356724. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=0F05vgAACAAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 21 e 22.
- 35 MATÉRIA, T. *Espectro Eletromagnético: o que é, frequências e comprimentos de onda*. 2024. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/>>. Citado na página 19.
- 36 RUSS, J. *The Image Processing Handbook: Third Edition*. CRC-Press, 1998. ISBN 9780849325328. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ovpRAAAAMAAJ>>. Citado na página 18.
- 37 JÄHNE, B. *Digital Image Processing*. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. ISBN 3-540-67754-2. Citado na página 20.
- 38 QUEIROZ, J.; GOMES, H. Introdução ao processamento digital de imagens. *RITA*, v. 13, p. 11–42, 01 2006. Citado na página 20.
- 39 WANG, Z. et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 13, n. 4, p. 600–612, 2004. Citado na página 23.
- 40 WANG, Z.; SIMONCELLI, E.; BOVIK, A. Multiscale structural similarity for image quality assessment. In: *The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, 2003*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 1398–1402 Vol.2. Citado na página 25.
- 41 MATHWORKS, I. T. *Curve Fitting Toolbox*. Natick, Massachusetts, United State, 2004. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/curvefitting.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- 42 TESTING, A.-. N. *Ensaaios não destrutivos - Termografia infravermelha - Princípios gerais*. [S.l.], 2021. Citado na página 36.
- 43 VIEIRA, T. M. et al. A novel experimental procedure for lock-in thermography on solar cells. *AIMS Energy*, v. 11, n. 3, p. 503–521, 2023. ISSN 2333-8334. Disponível em: <<https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/energy.2023026>>. Citado 3 vezes nas páginas 36, 47 e 49.
- 44 FLIR, T. *FLIR Desktop Atlas SDK*. 2024. Disponível em: <<https://www.flir.com/products/flir-atlas-sdk/>>. Citado na página 37.