

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

Proponente:

**Thiago Mota Vieira**

Professor Orientador:

**Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.**

Professor Coorientador:

**Douglas Bressan Riffel, D. Sc.**





## SUMÁRIO

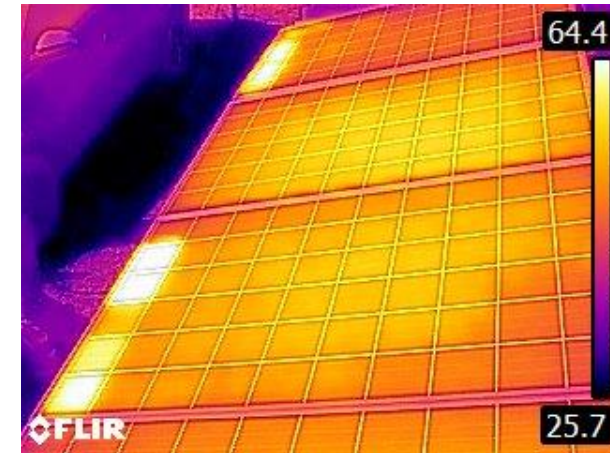
- 01** INTRODUÇÃO
- 02** METODOLOGIA
- 03** RESULTADOS
- 04** CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

## MONITORAMENTO DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

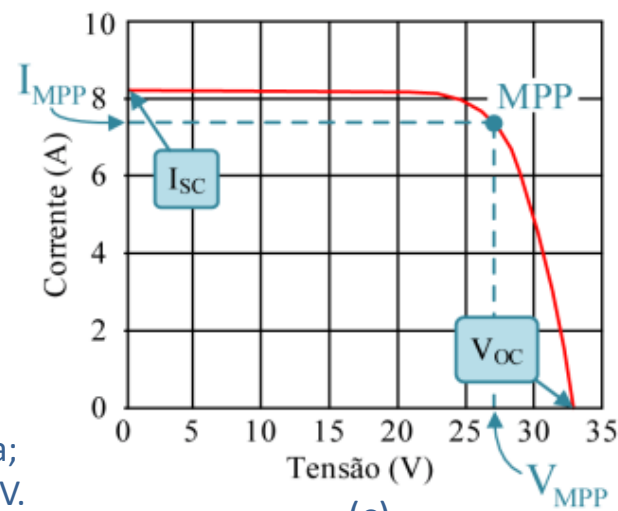
- Avaliação do desempenho;
- Detecção de defeitos;
- Prolongamento da vida útil;
- Técnicas de monitoramento:
  - Termografia infravermelha;
  - Eletroluminescência;
  - Curva I-V.



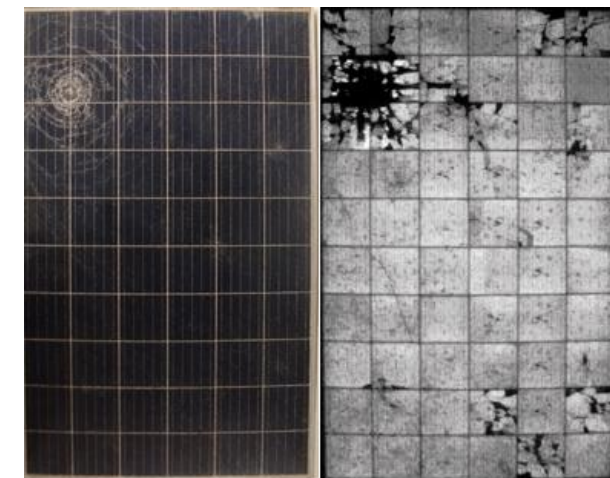
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1 – (a) Módulos FV e (b) sua imagem térmica; (c) exemplo de curva I-V.

## TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

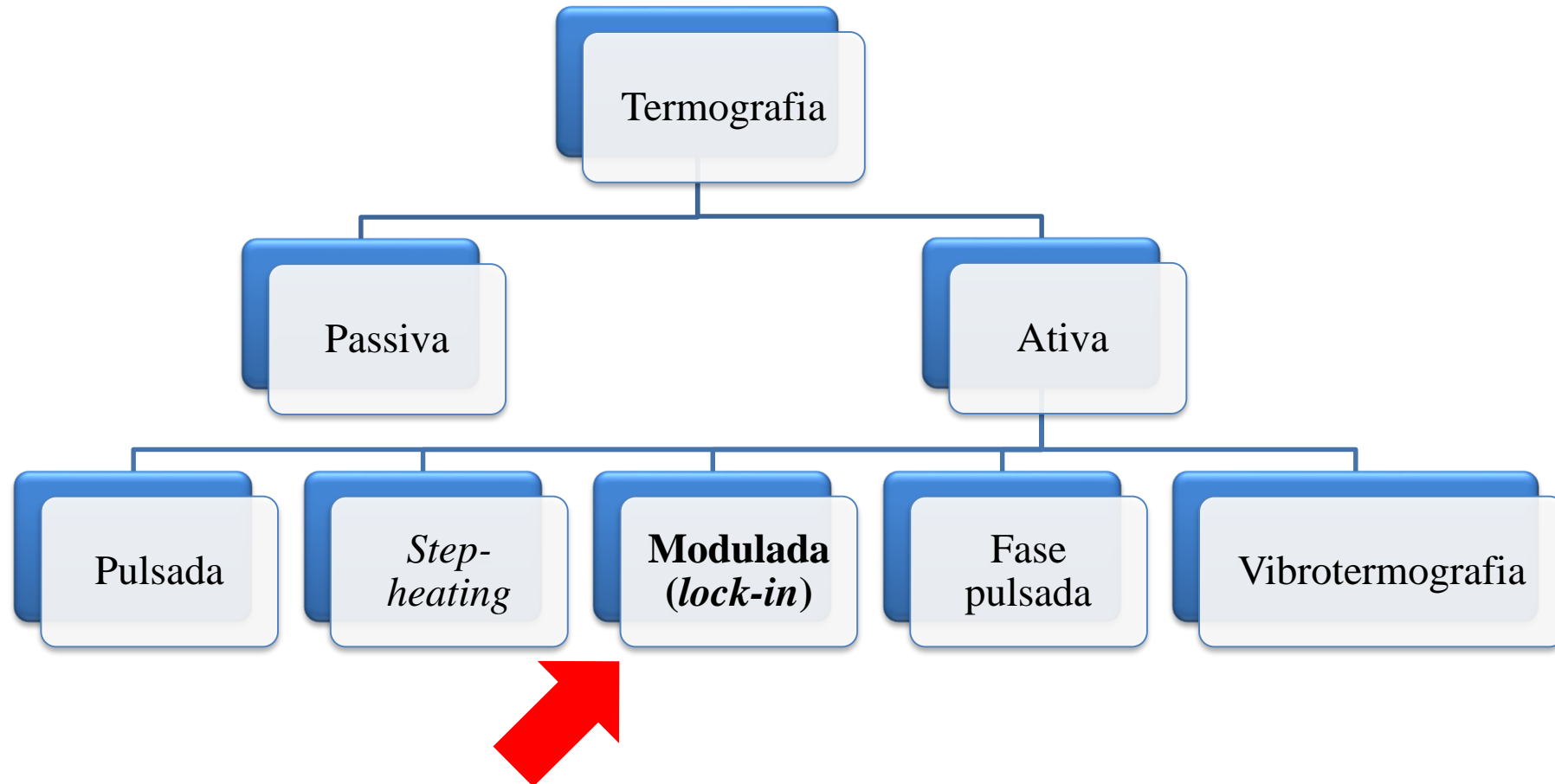


Figura 2 – Tipos de termografia.

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

- Forma genérica do sinal de excitação:

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

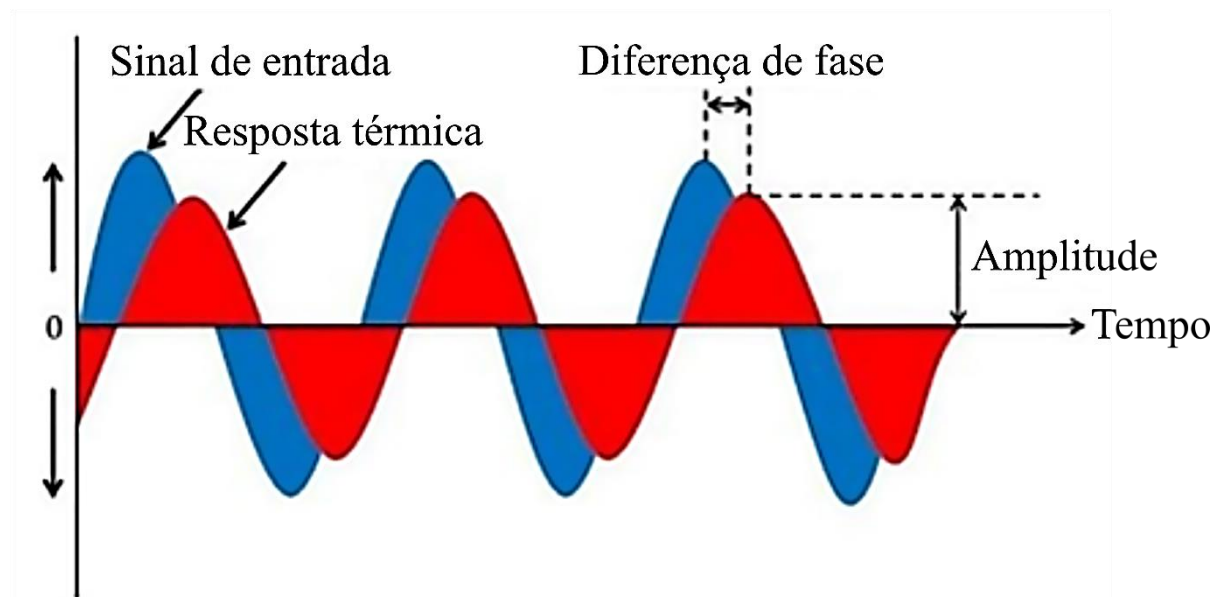
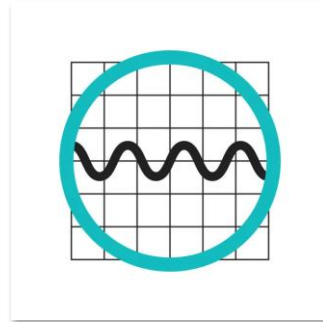


Figura 3 – Comparação entre o sinal de entrada e a resposta térmica de um ensaio de LIT.

## ESTE TRABALHO

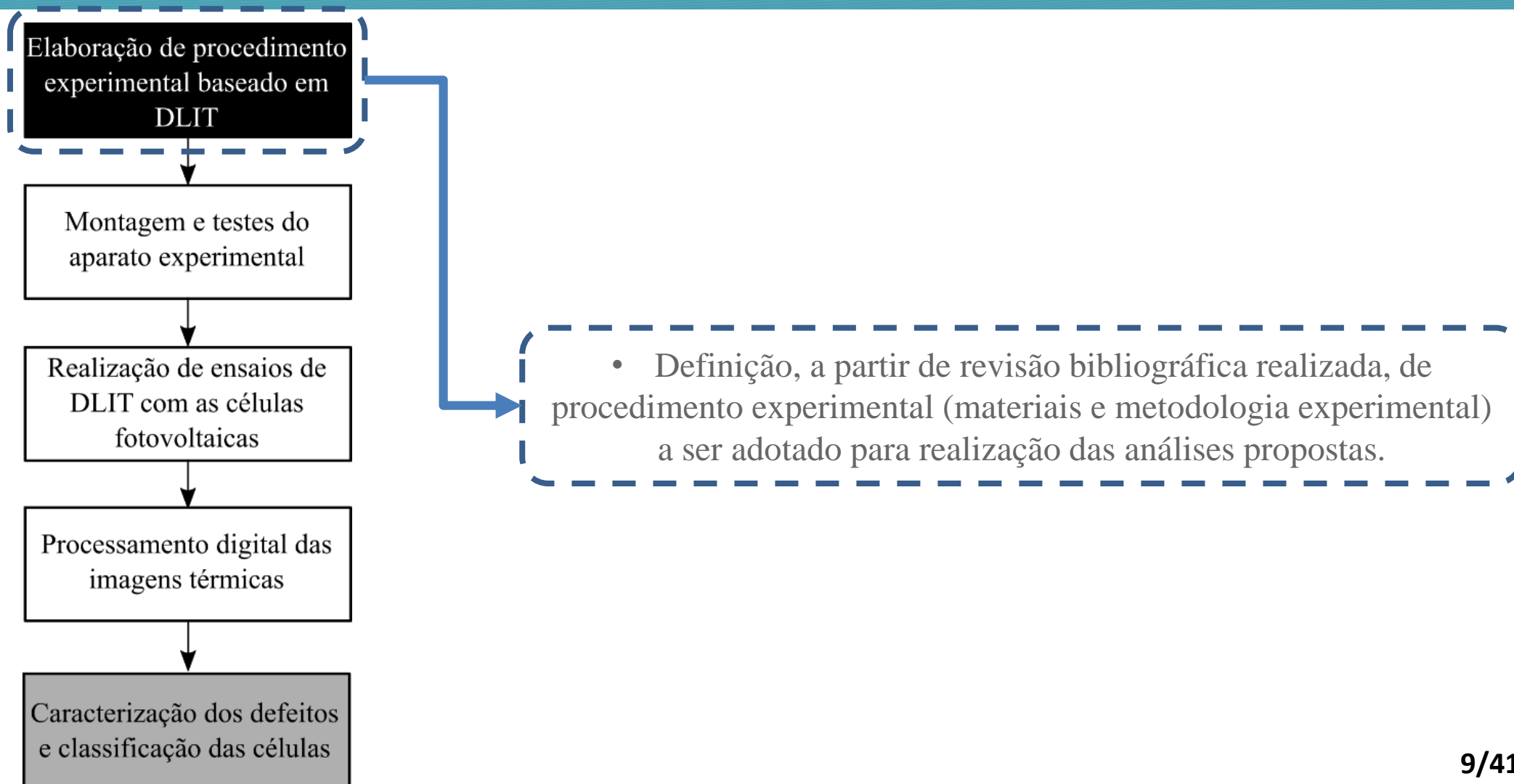


### Sinal de tensão elétrica senoidal para excitação da amostra

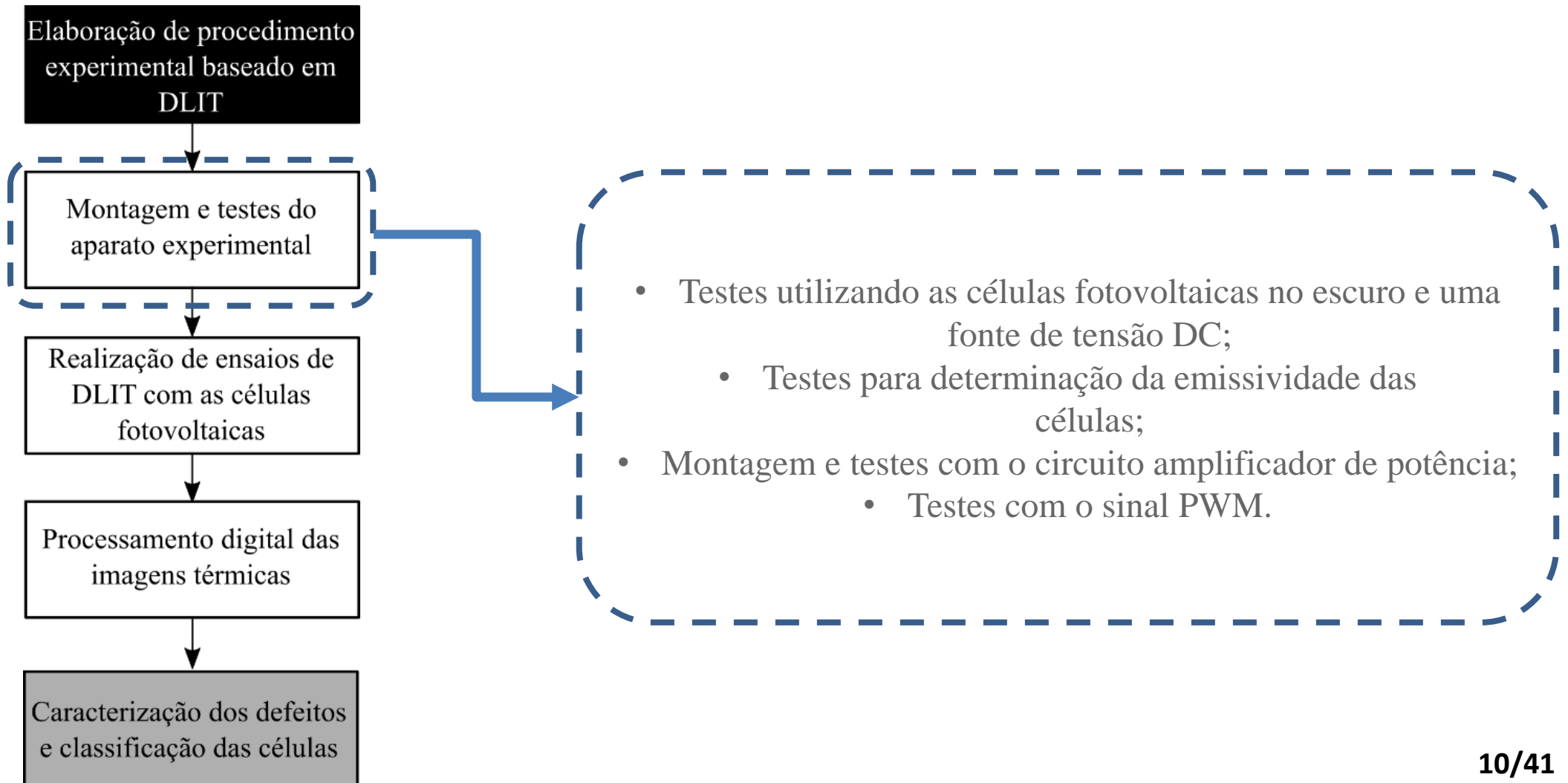
Detecção e caracterização de defeitos em células fotovoltaicas por DLIT com uso de excitação por sinal de tensão elétrica senoidal.

Ampliação da faixa de pontos operacionais da célula durante o ensaio e avaliação do impacto deste último na detecção e caracterização de defeitos.

### ETAPAS DA PESQUISA

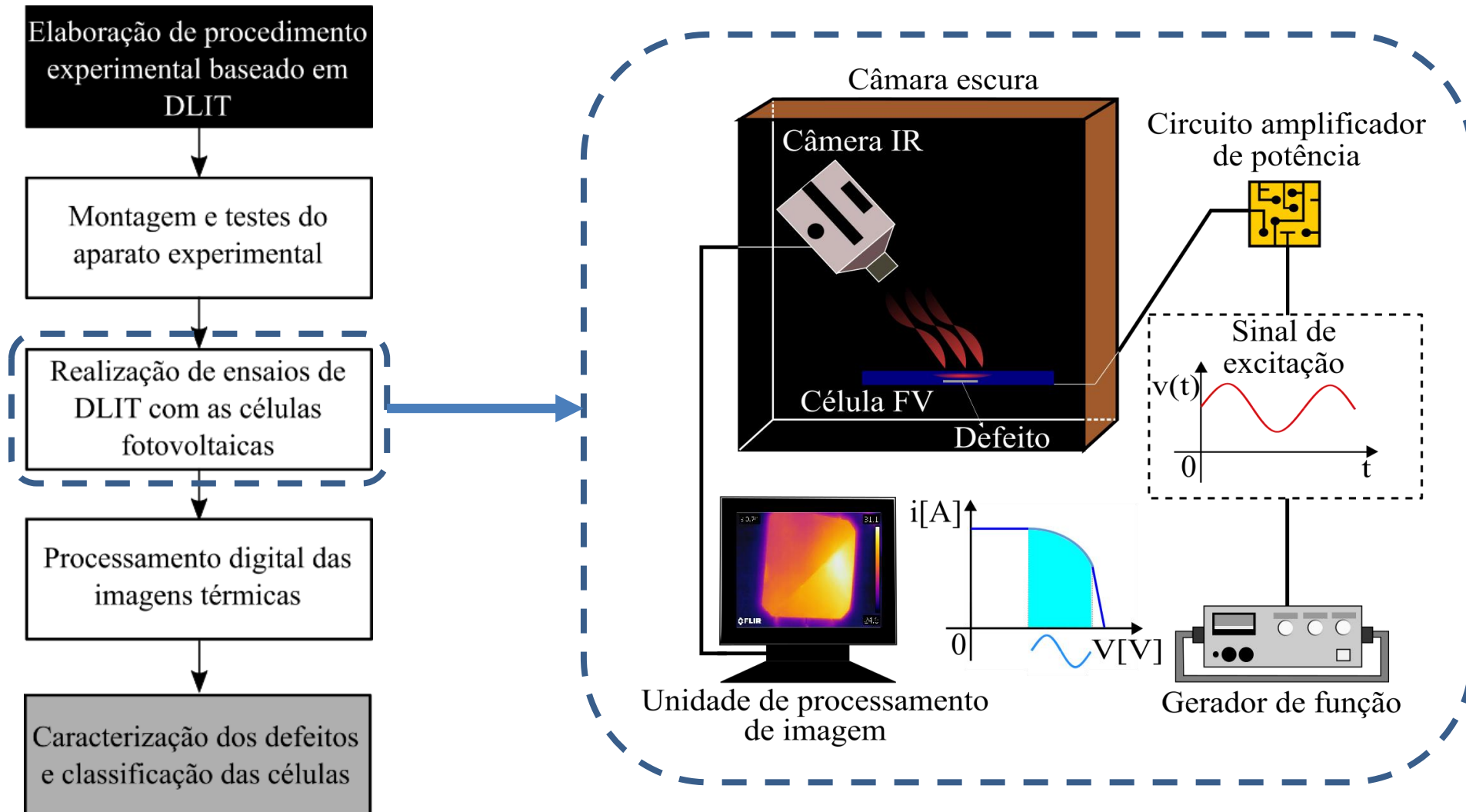


# ETAPAS DA PESQUISA

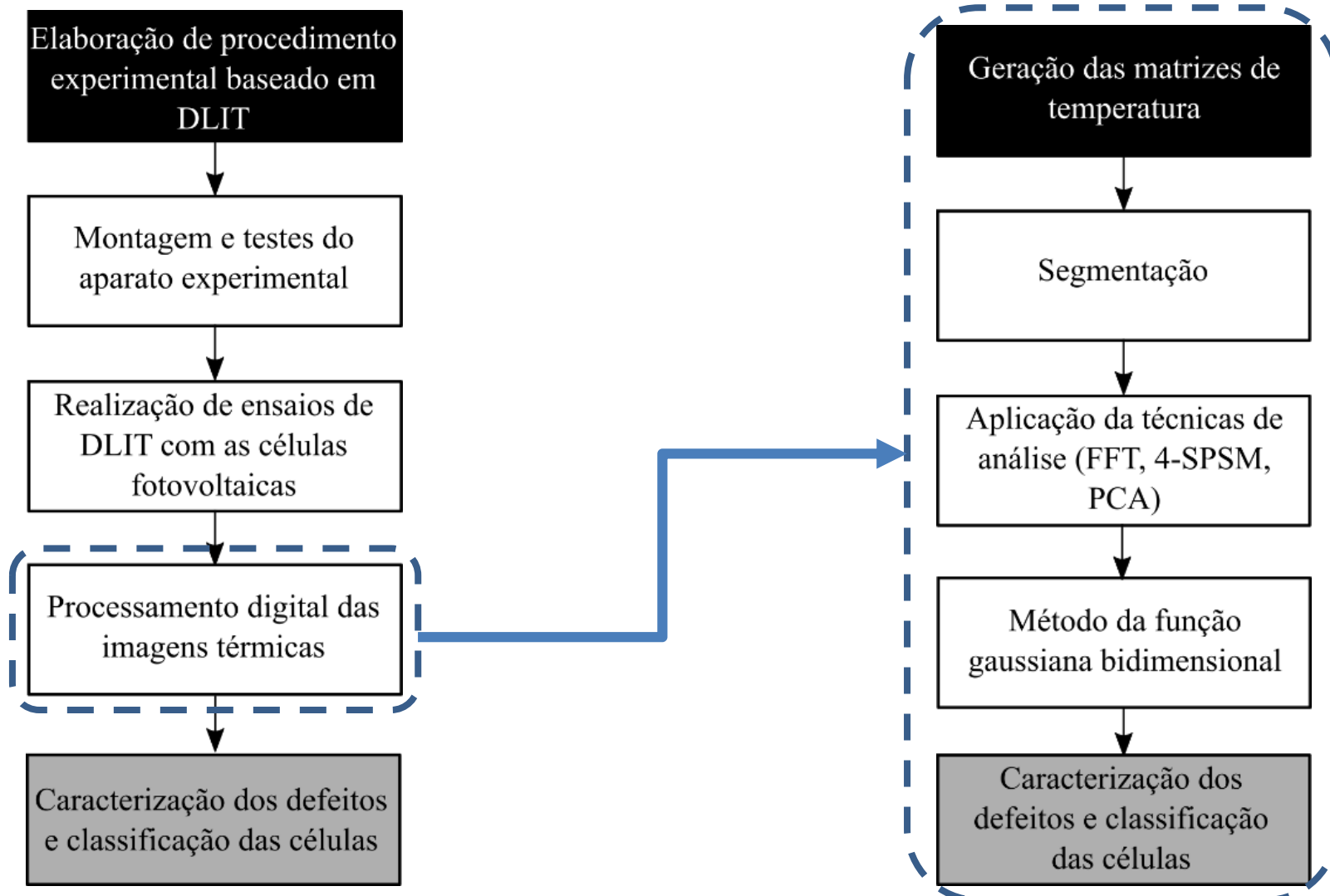




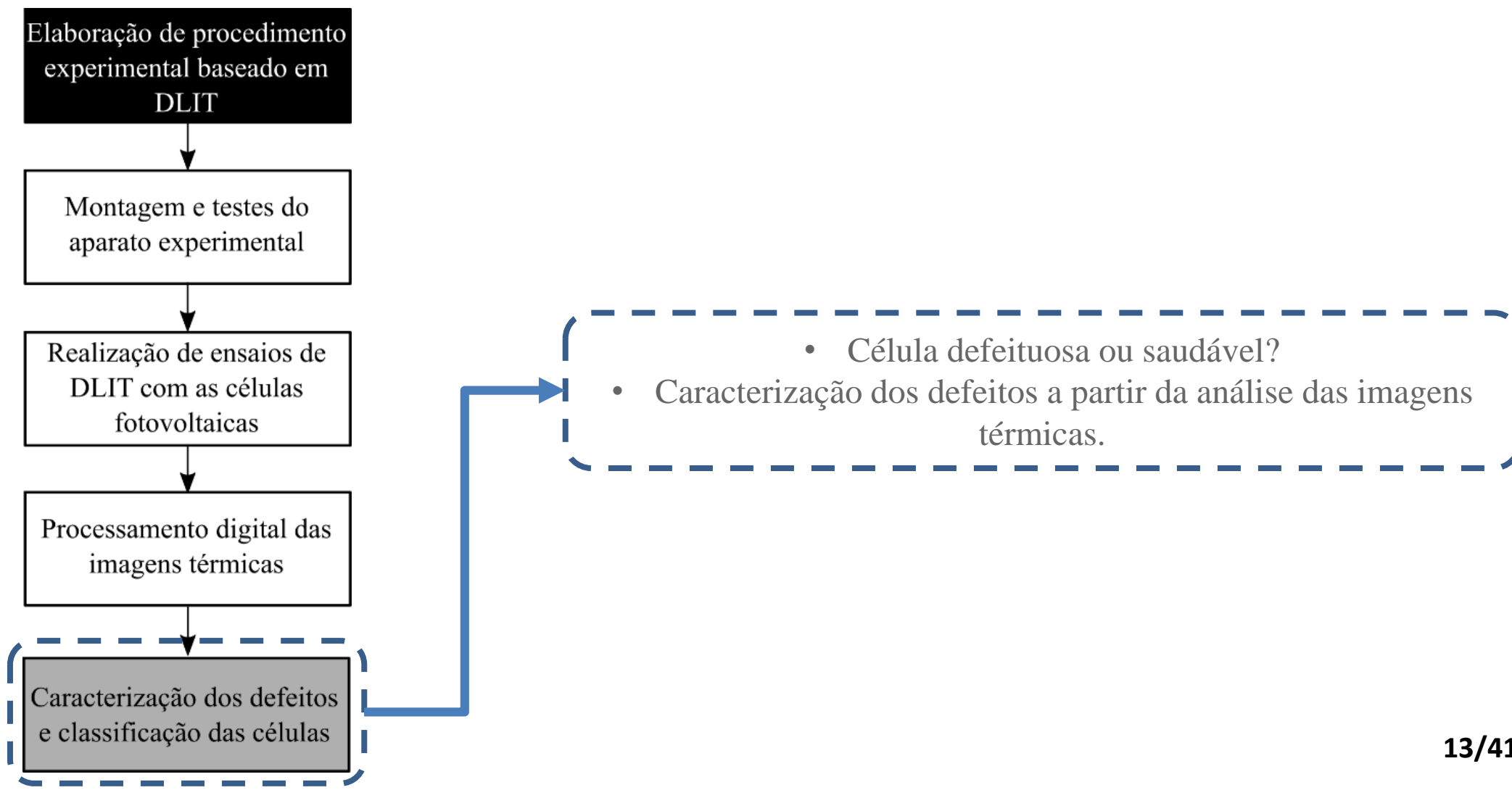
### ETAPAS DA PESQUISA



### ETAPAS DA PESQUISA



### ETAPAS DA PESQUISA



## CONSTRUÇÃO E TESTES DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA OS ENSAIOS DE DLIT

Tabela 1 – Valores dos parâmetros do sinal de excitação da célula.

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

Figura 4 – Fotografia da parte interna da câmara escura usada no experimento mostrando a câmera IR e o posicionamento da célula fotovoltaica



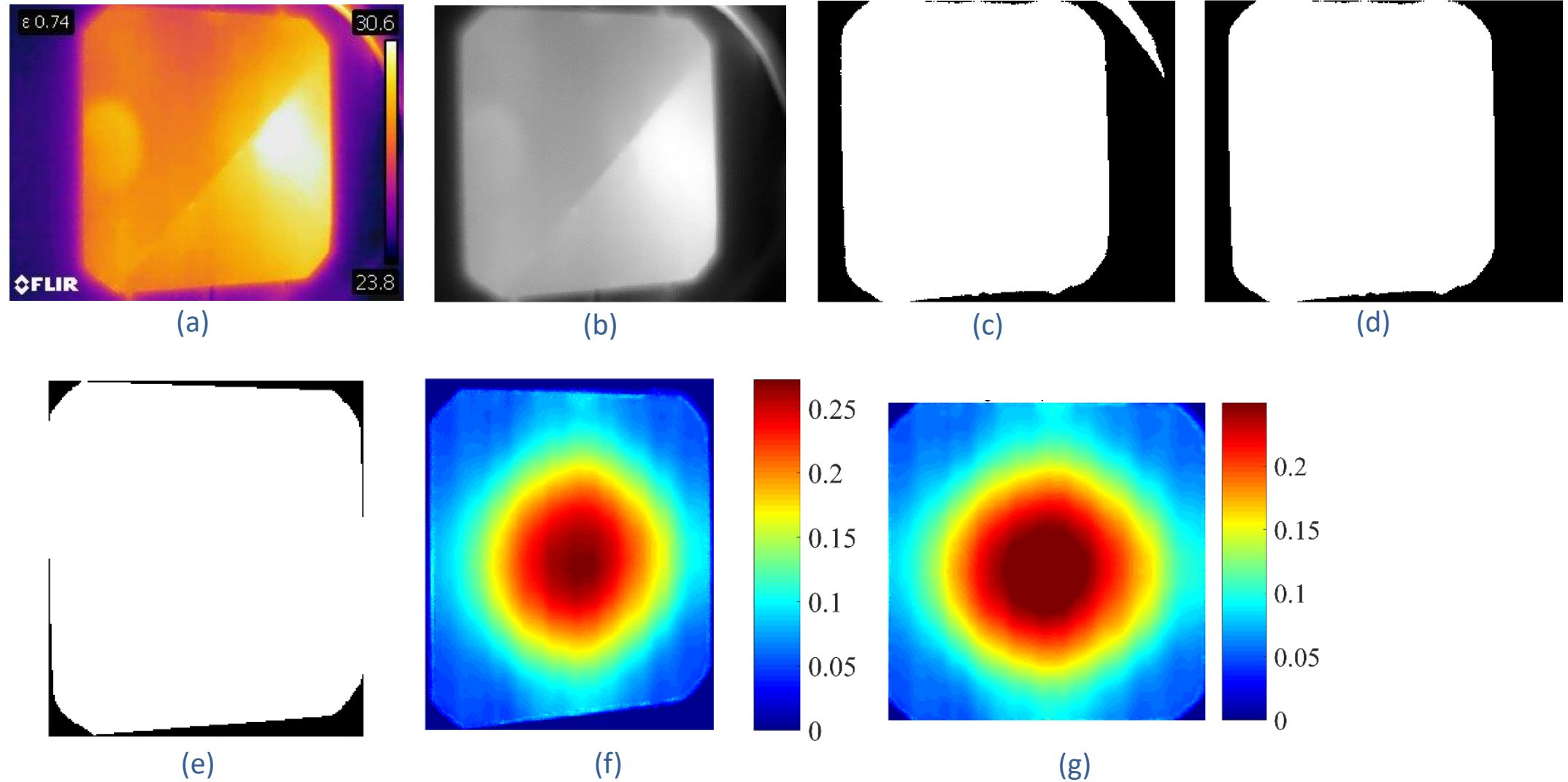


Figura 5 – Etapas centrais dos algoritmos de PDI.



## **ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS**

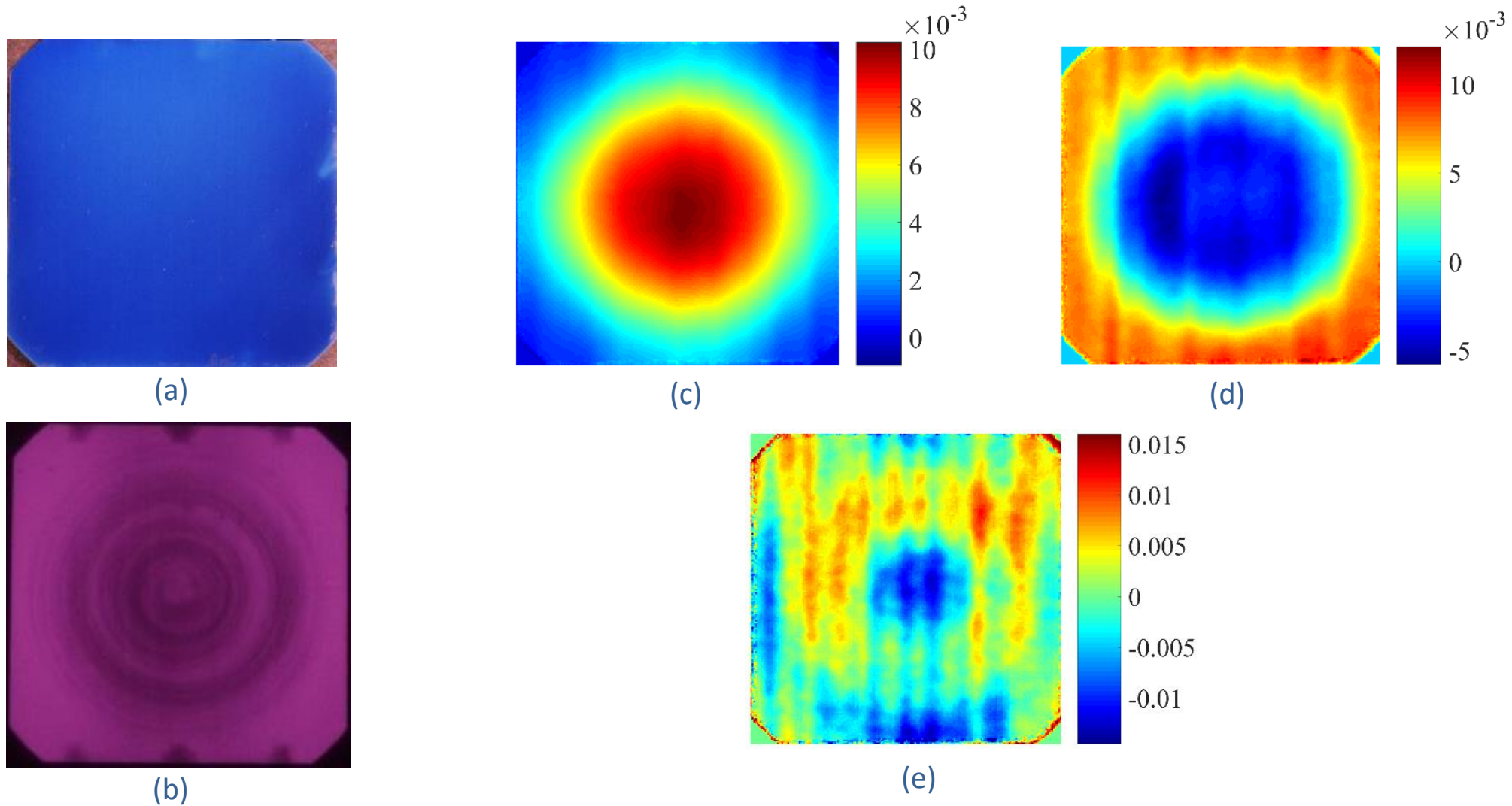


Figura 6 – Fotografia (a), (b) imagem eletroluminescente, (c) 1ª, (d) 2ª e (e) 3ª componentes principais a uma frequência de 50 MHz relativo à célula saudável 01.

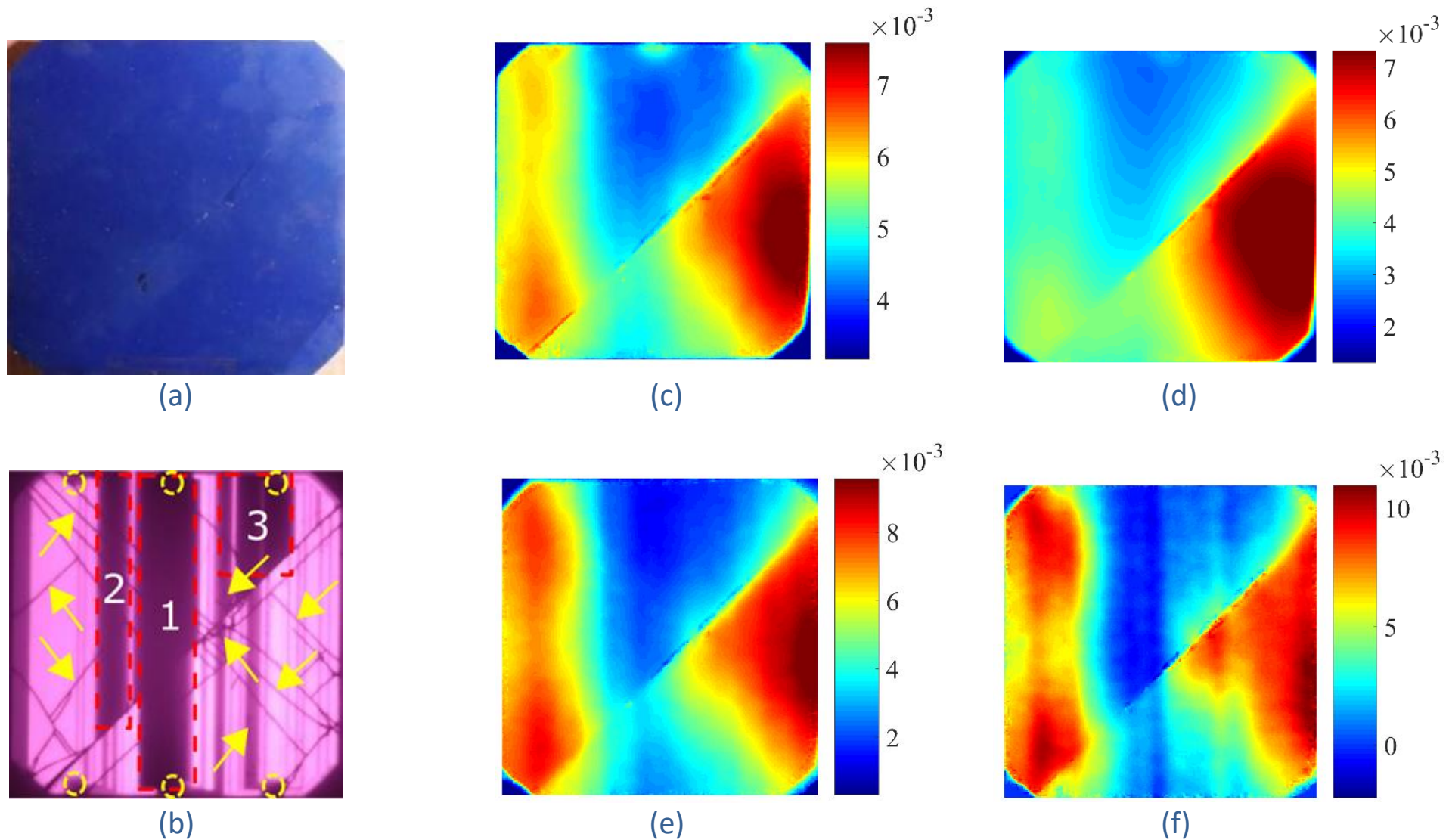


Figura 7 – (a) Fotografia, imagem (b) eletroluminescente, 1ª componente principal dos testes realizados a (c) 6 mHz, (d) 11 mHz, (e) 50 mHz e (f) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.



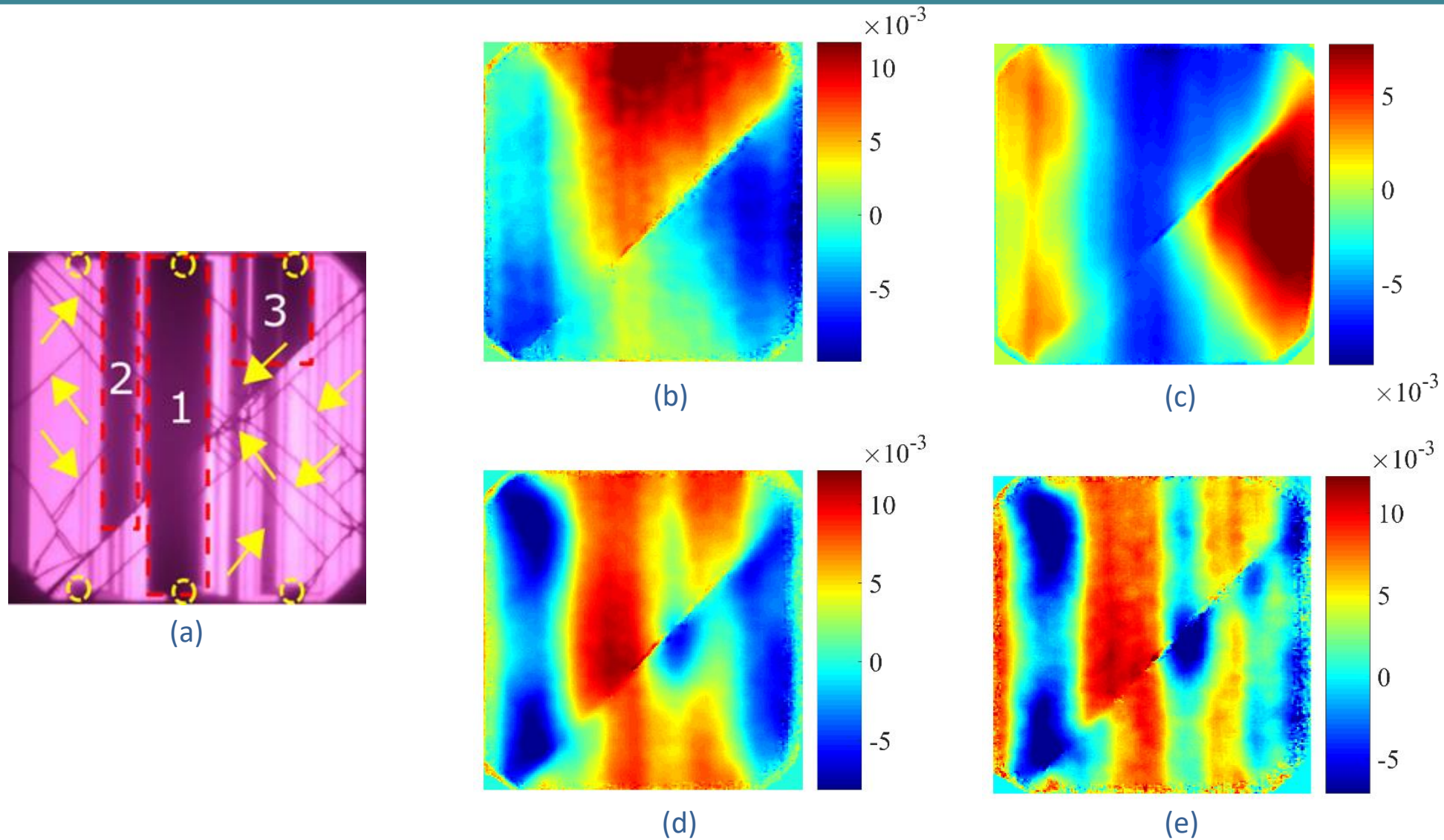


Figura 8 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens da 2ª componente principal dos testes realizados a (b) 6 MHz, (c) 11 MHz, (d) 50 MHz e (e) 100 MHz para a célula defeituosa 01.

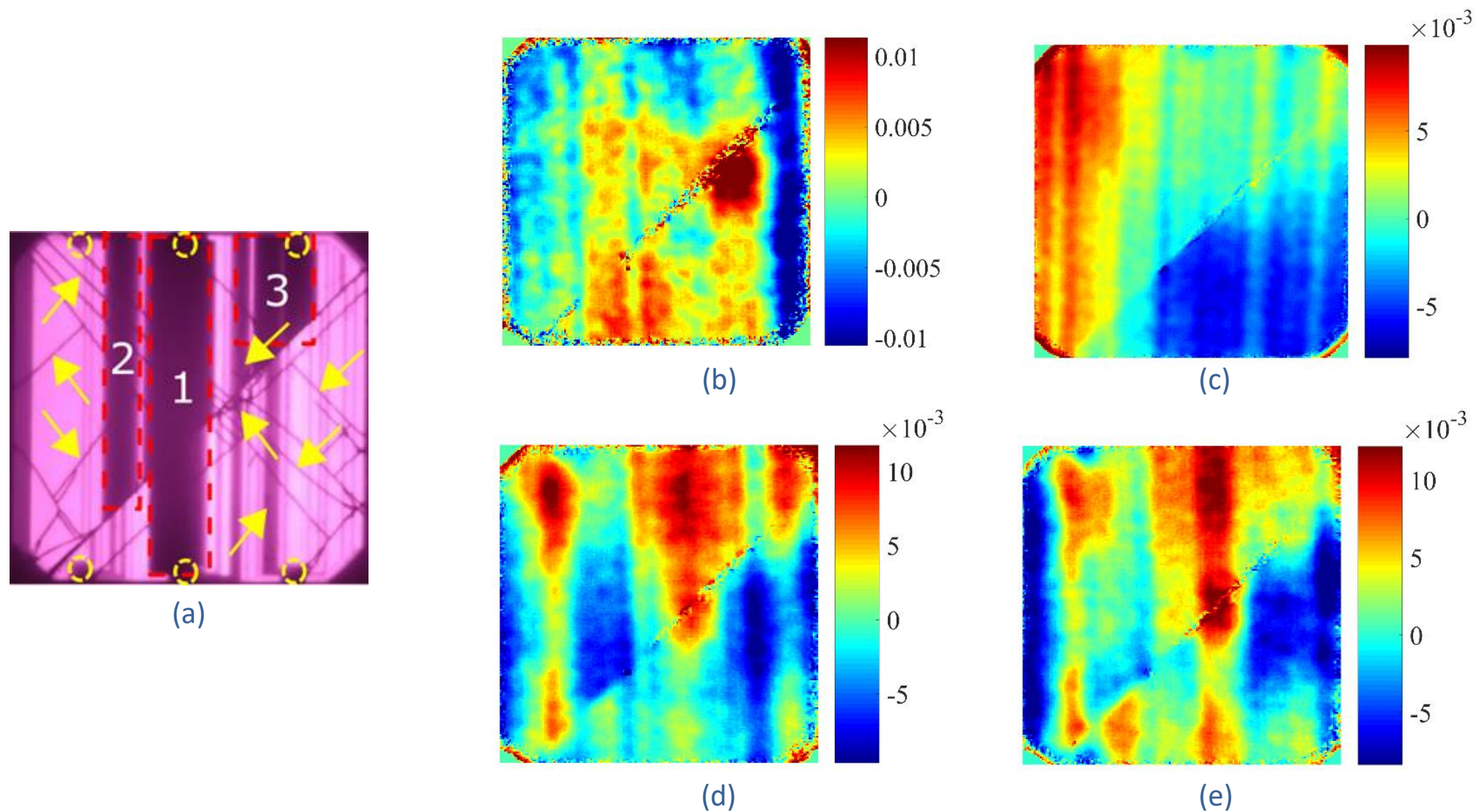


Figura 9 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens da 3ª componente principal dos testes realizados a (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 01.

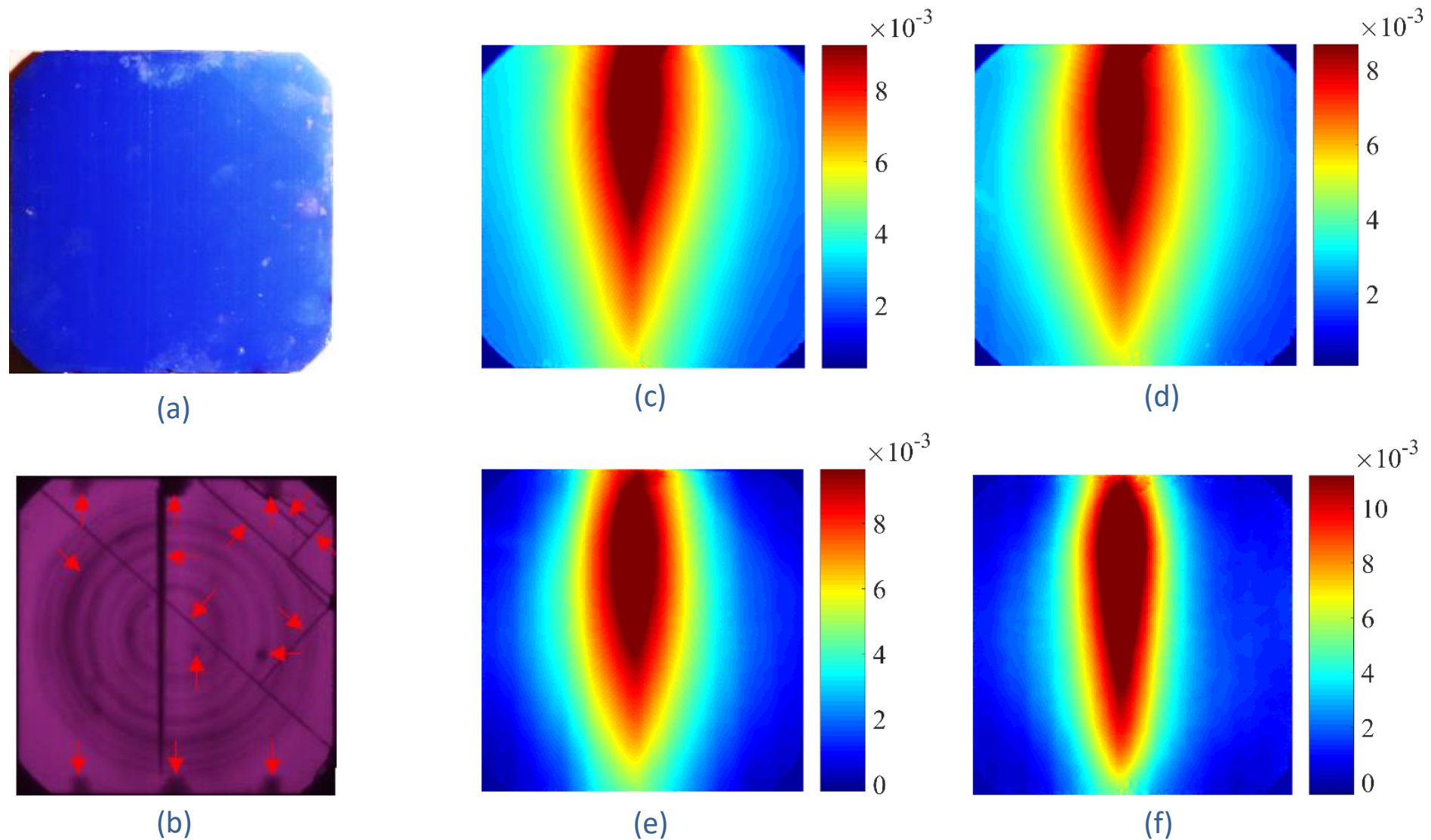


Figura 10 – (a) Fotografia, imagem (b) eletroluminescente, 1ª componente principal dos testes realizados a (c) 6 mHz, (d) 11 mHz, (e) 50 mHz e (d) 100 mHz para a célula defeituosa 02.

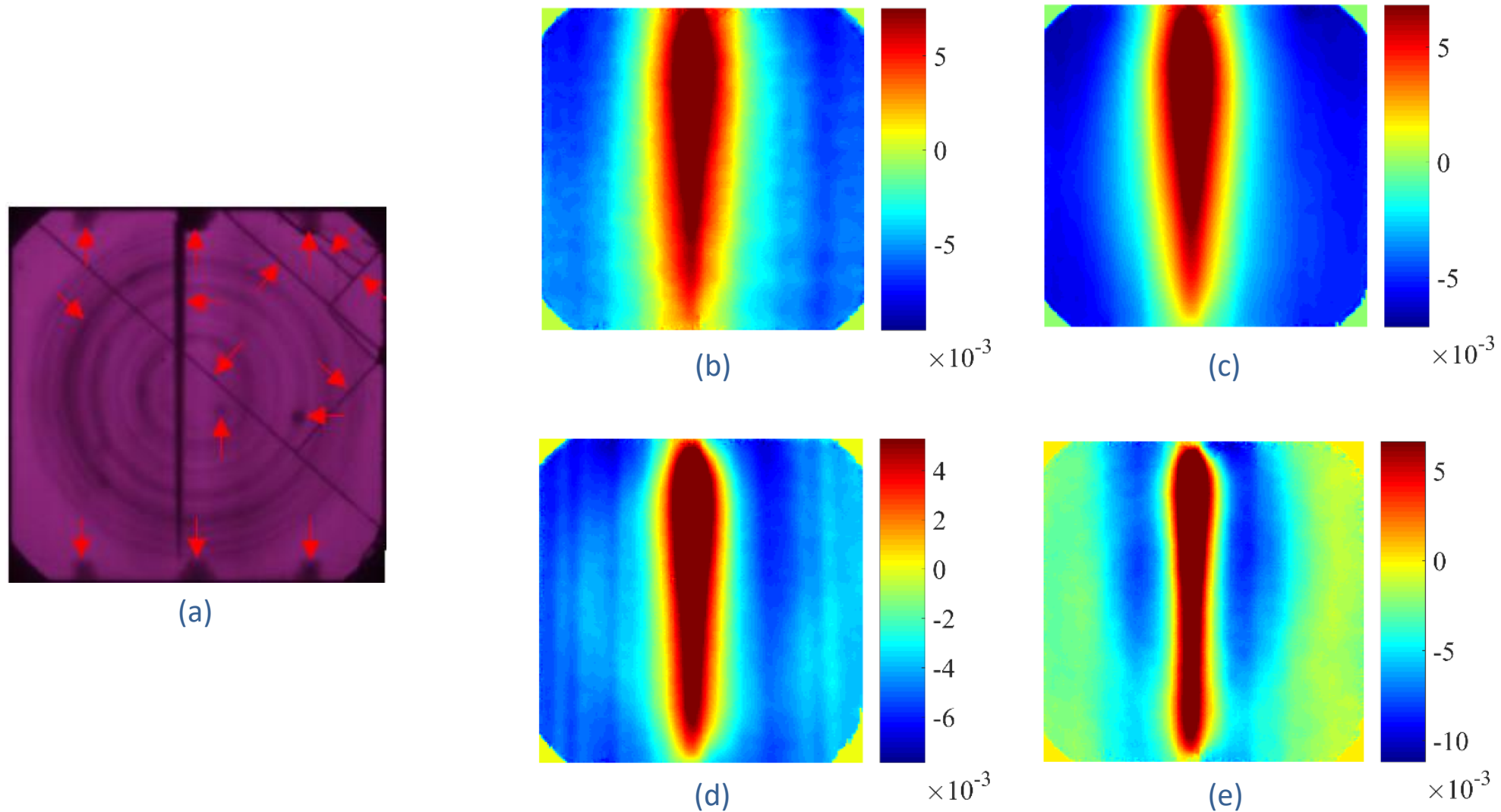


Figura 11 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens da 2ª componente principal dos testes realizados a (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.

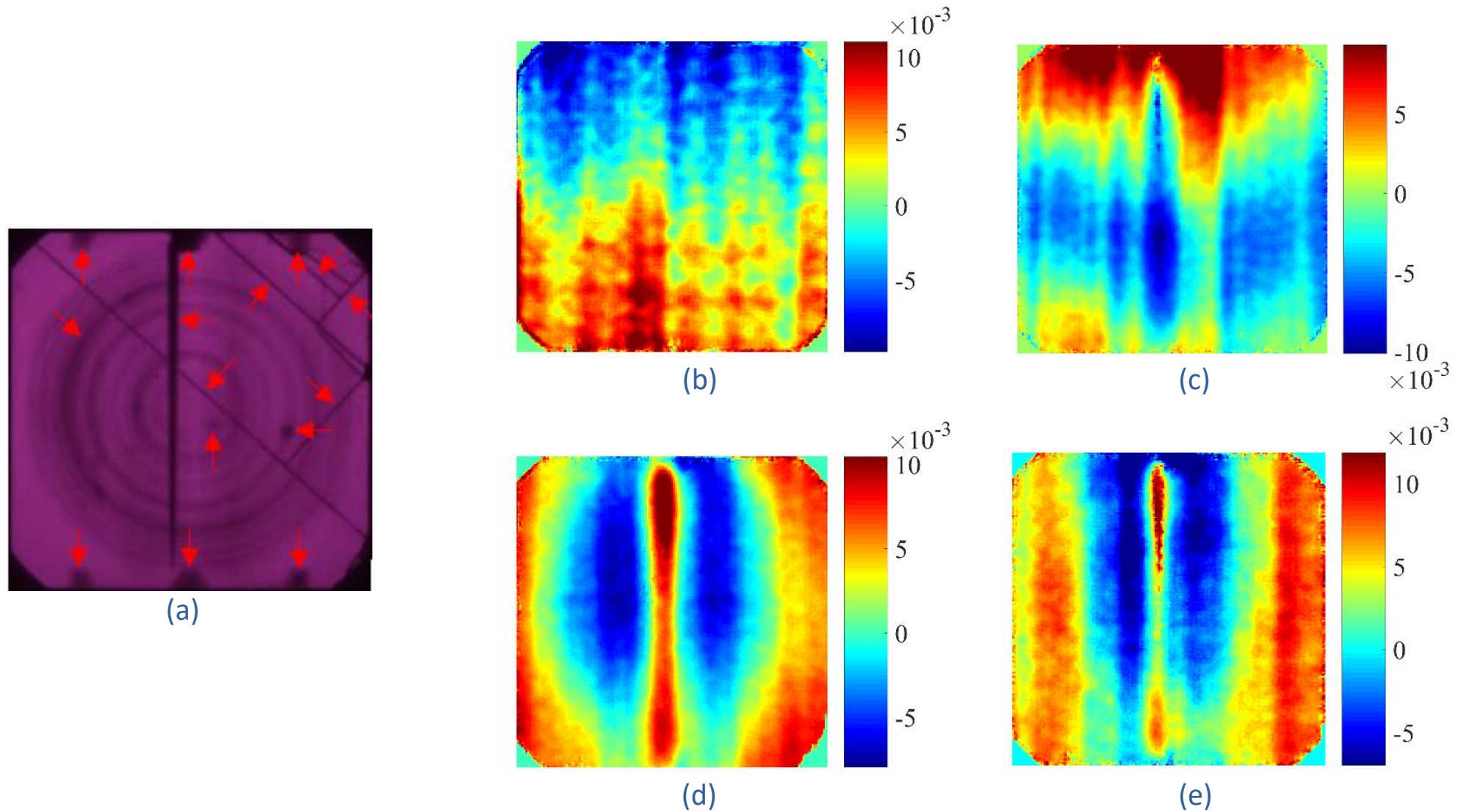


Figura 12 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens da 3ª componente principal dos testes realizados a (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz usando a célula defeituosa 02.



**4-SPSM**

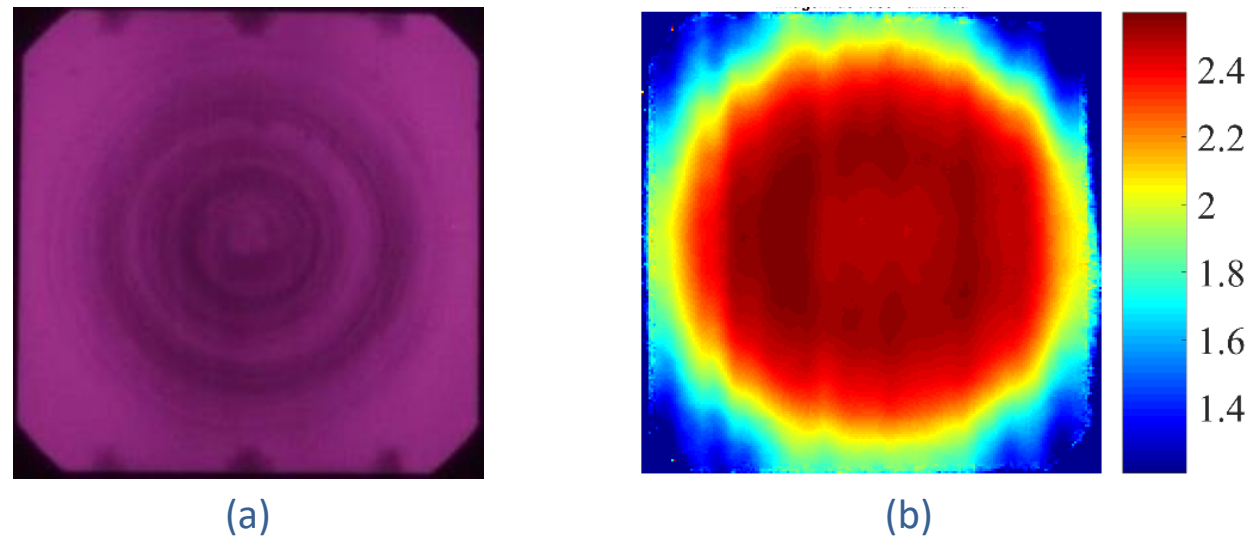


Figura 13 – Imagem (a) eletroluminescente e (b) imagem de fase via 4-SPSM da célula saudável 01 (ensaio a 50 mHz) .

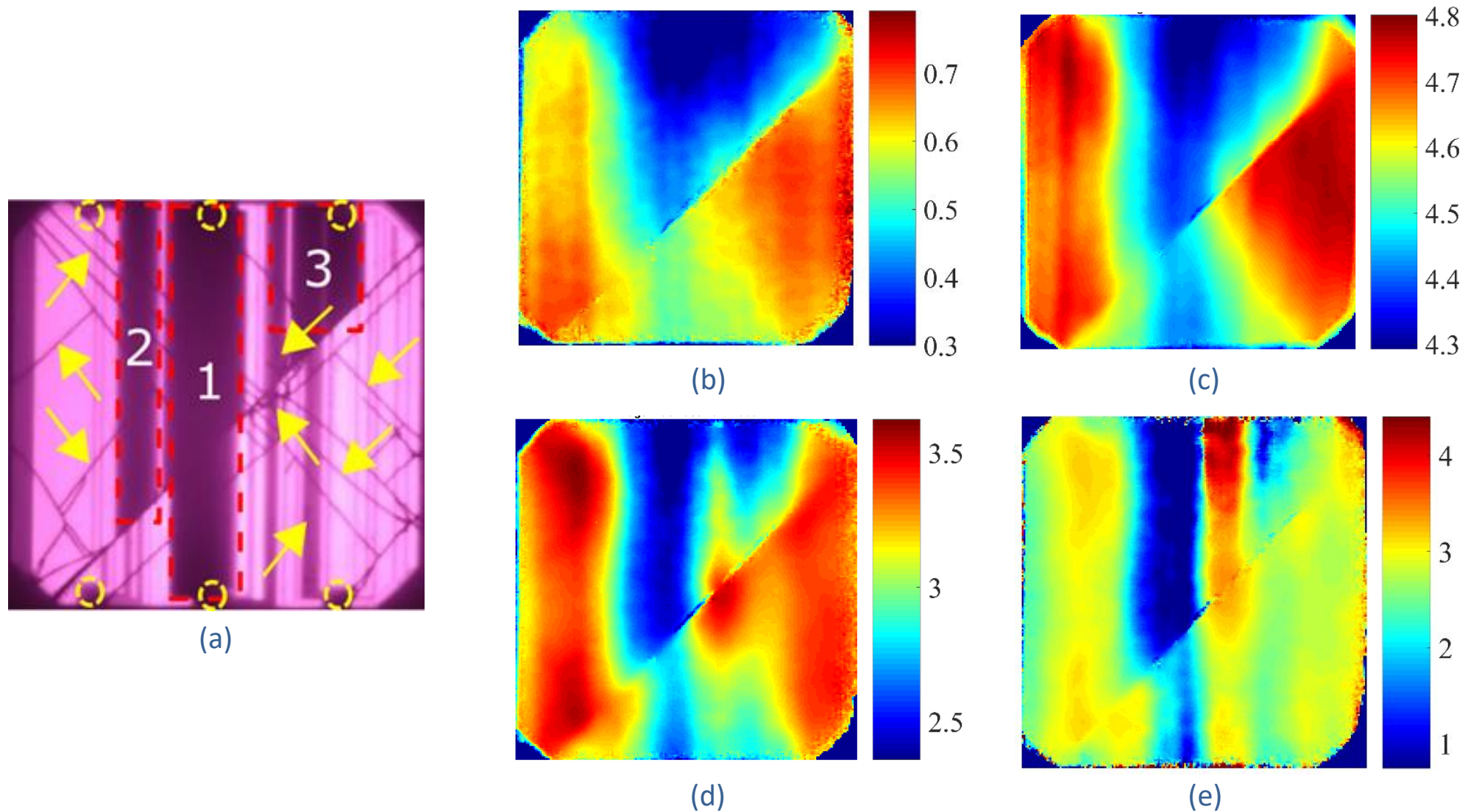


Figura 14 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens de fase obtidas da aplicação da 4-SPSM para os testes a (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz para a célula defeituosa 01.



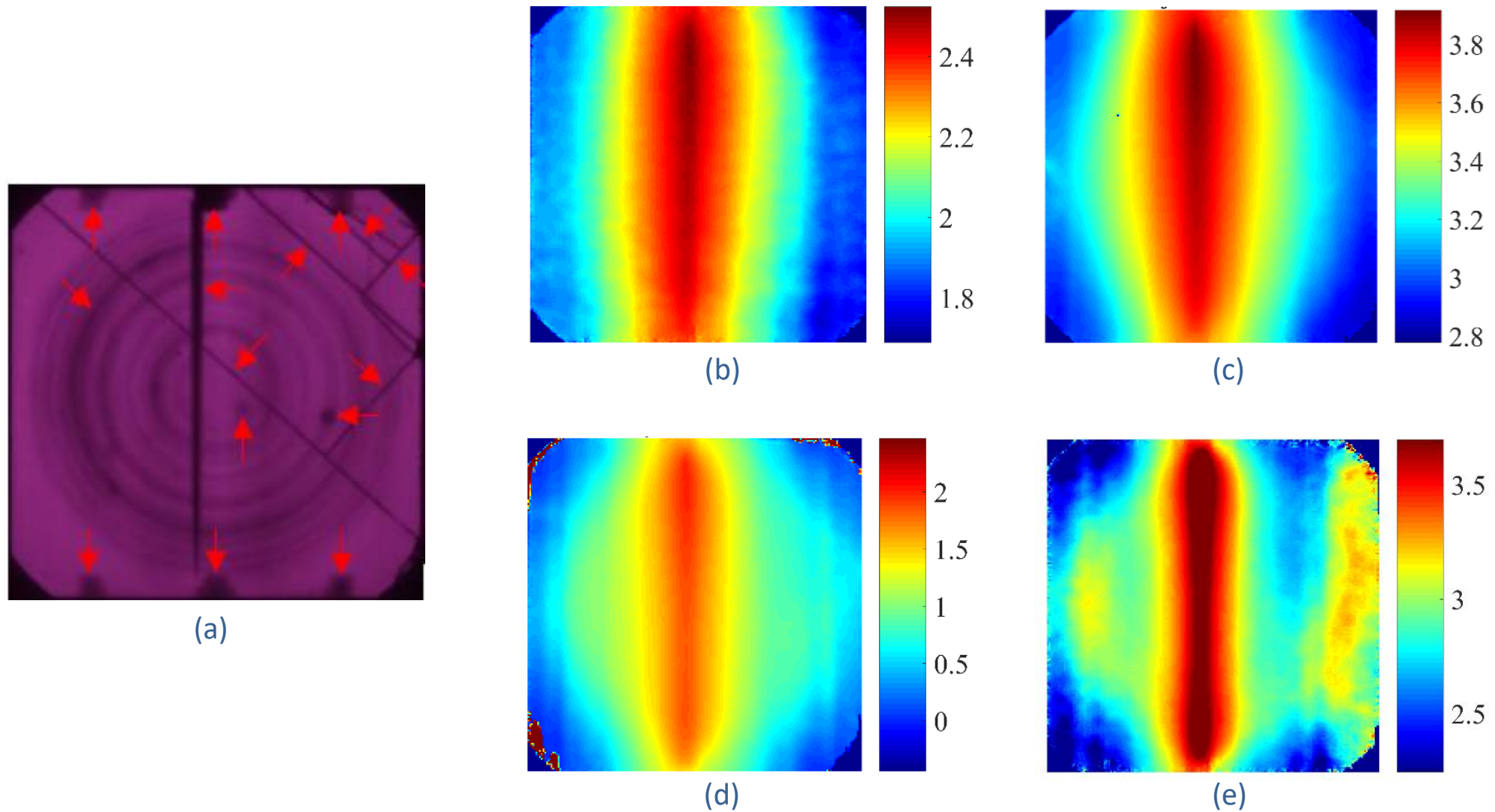


Figura 15 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens de fase obtidas da aplicação da 4-SPSM para os testes a (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz para a célula defeituosa 02.

## TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

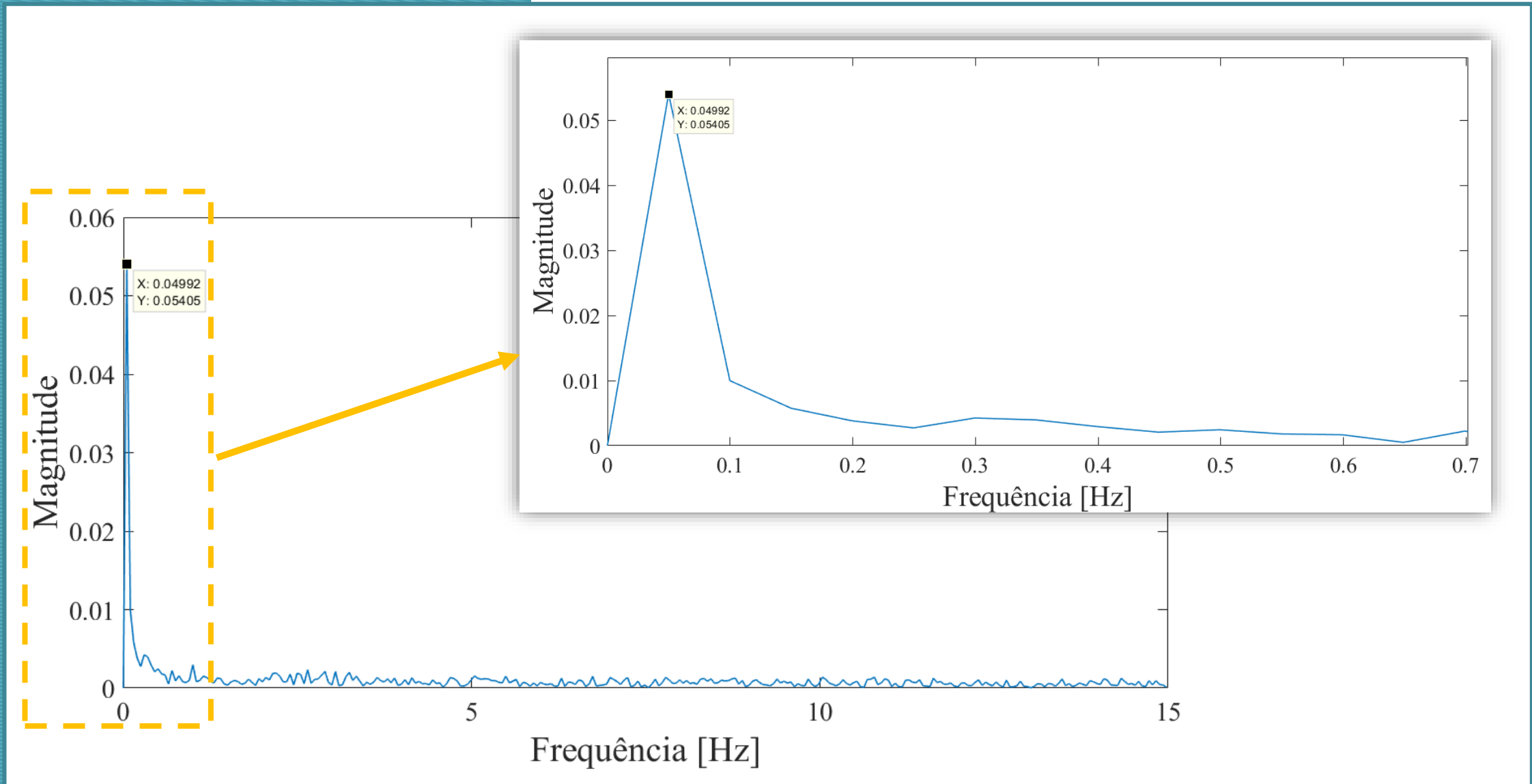


Figura 16 – Espectro de magnitude unilateral de Fourier.

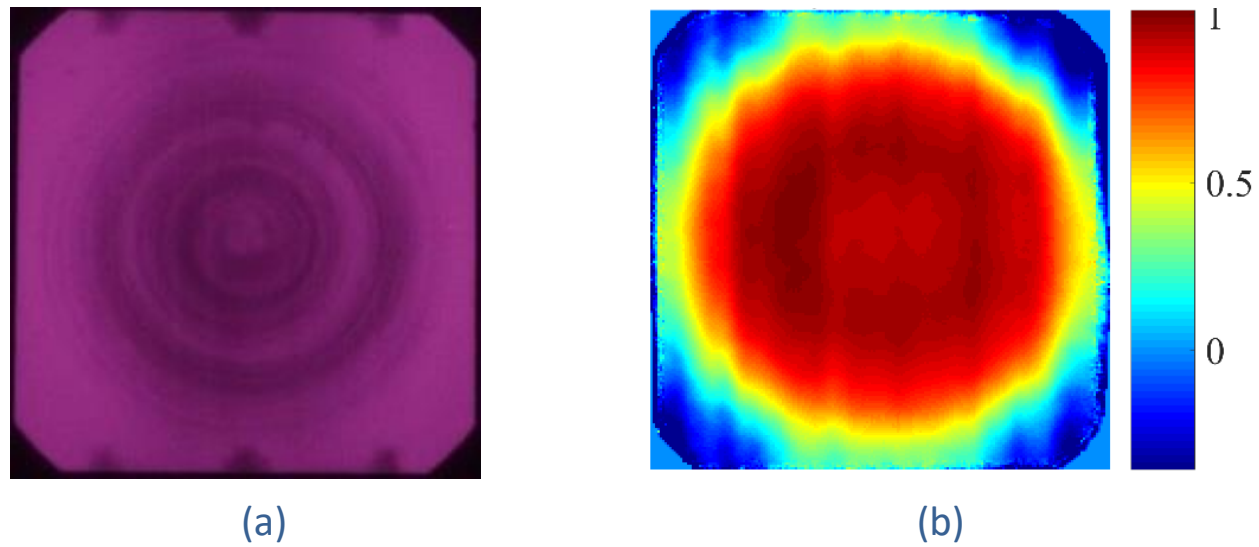
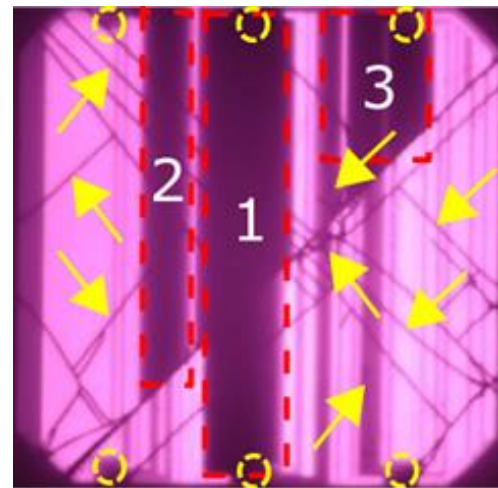
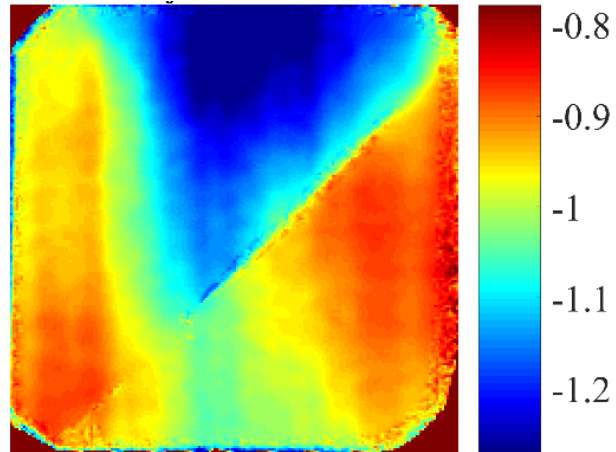


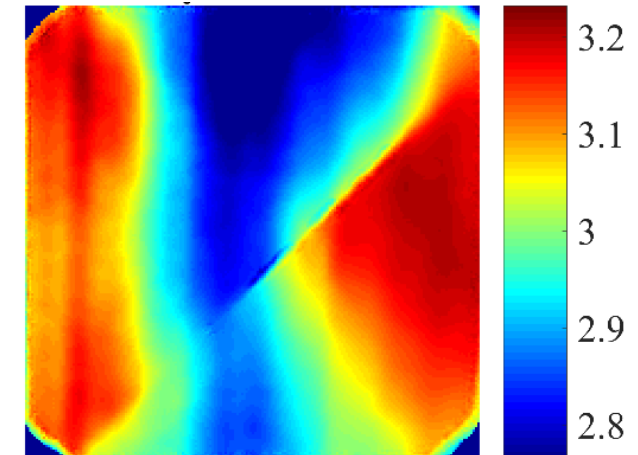
Figura 17 – Imagem (a) eletroluminescente e (b) imagem de fase da frequência fundamental via FFT da célula saudável 01 (ensaio a 50 mHz).



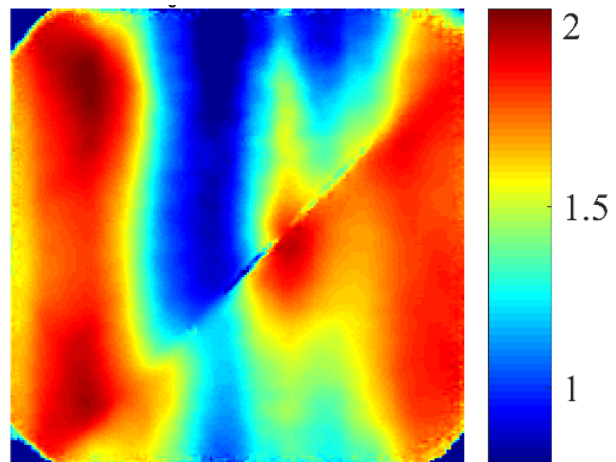
(a)



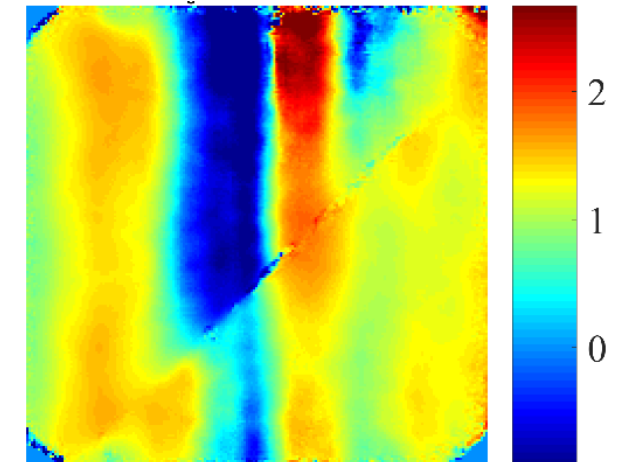
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 18 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens de fase para a frequência fundamental via FFT para os testes a (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz (célula defeituosa 01).

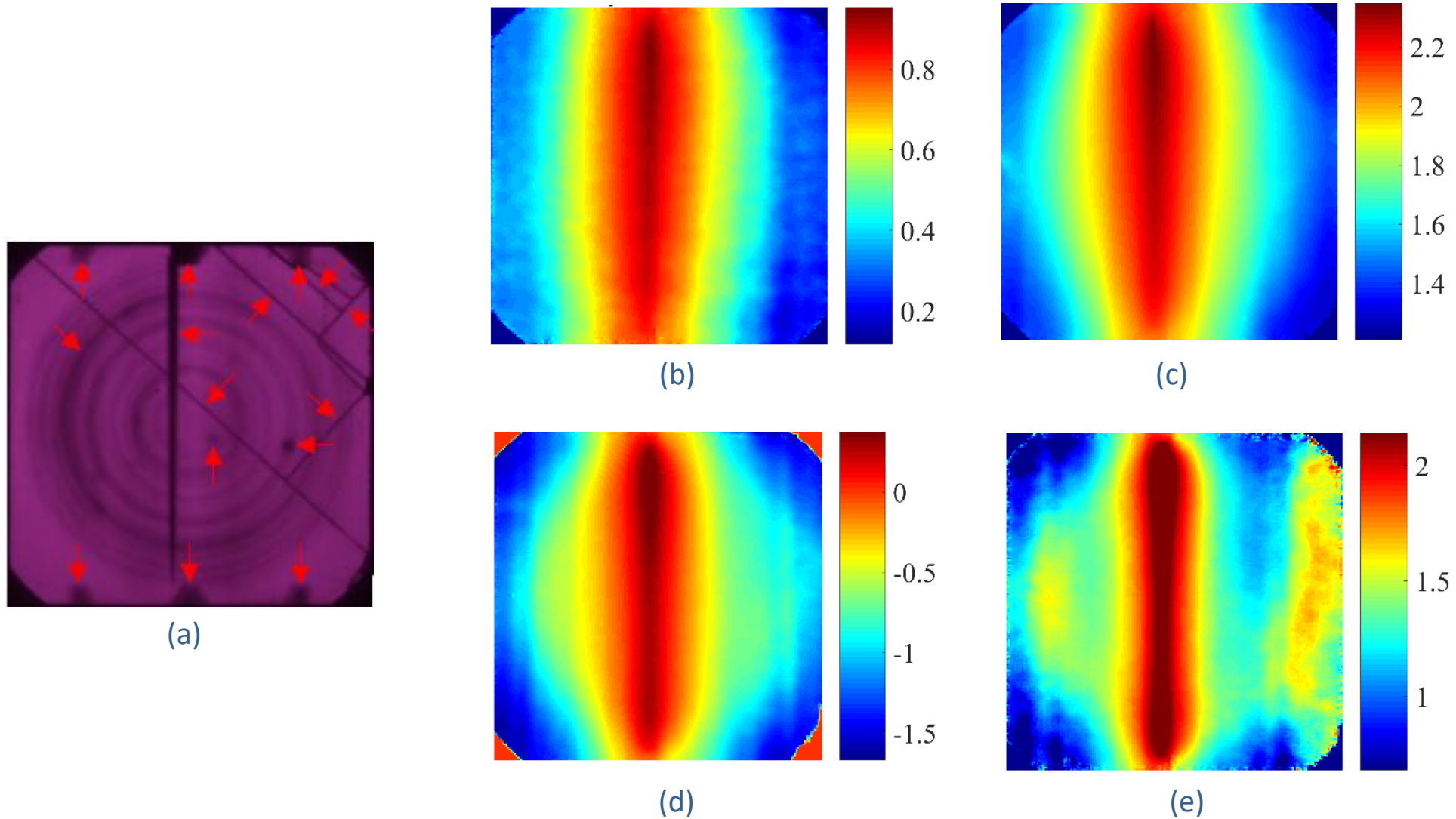
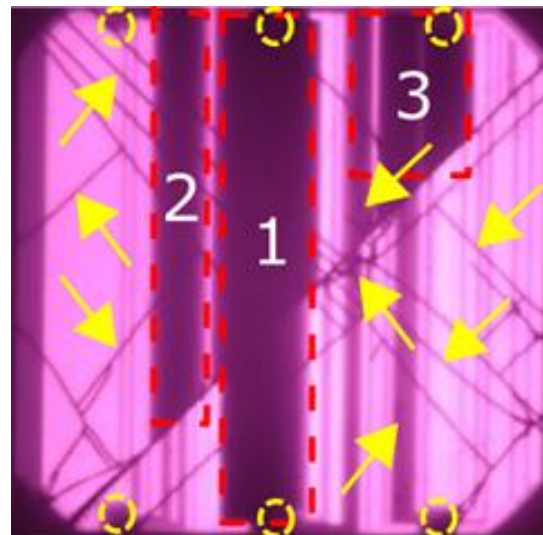
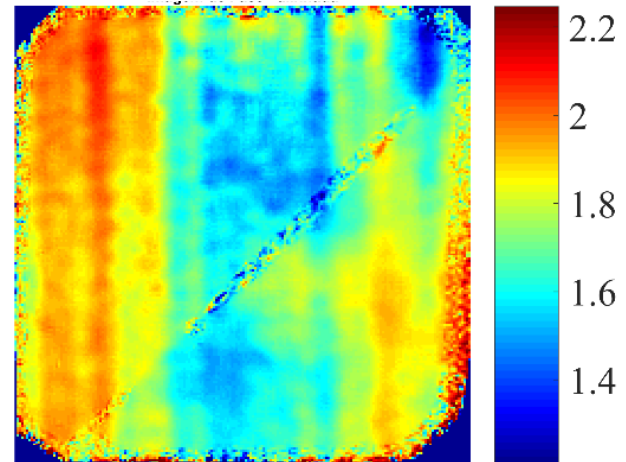


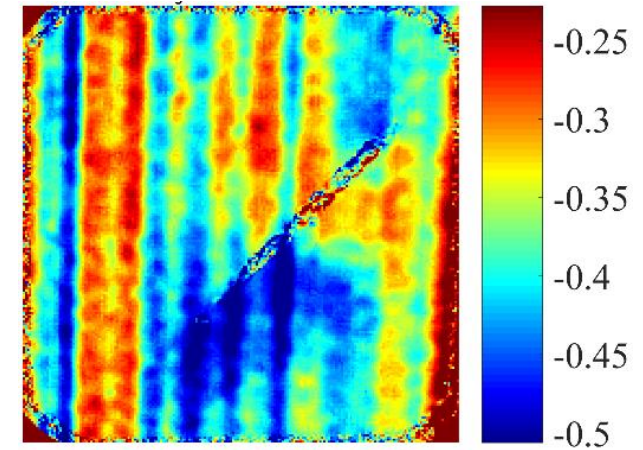
Figura 19 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens de fase para a frequência fundamental via FFT para os testes a (b) 6 MHz, (c) 11 MHz, (d) 50 MHz e (e) 100 MHz (célula defeituosa 02).



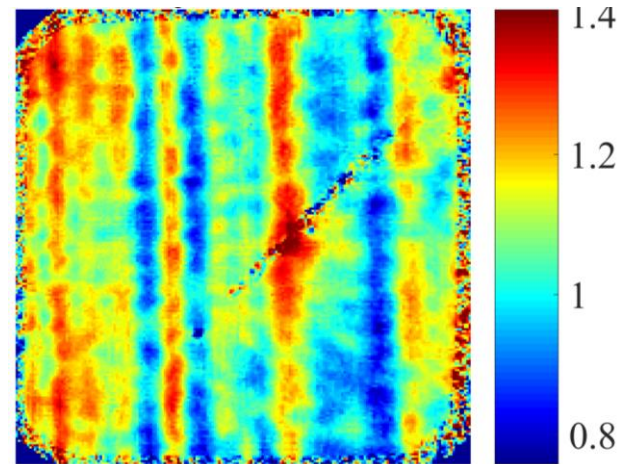
(a)



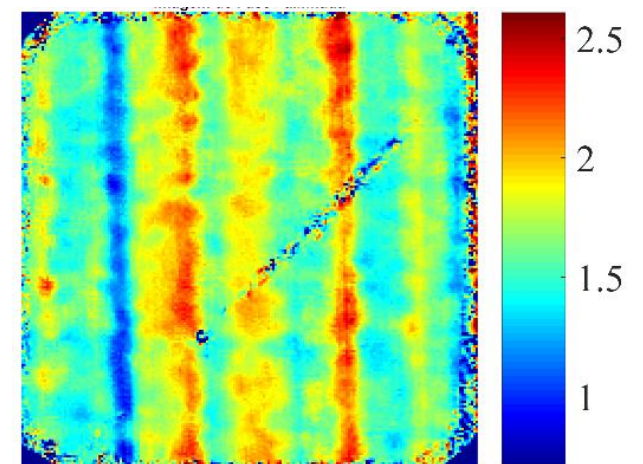
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 20 – Imagem (a) eletroluminescente e Imagens de fase para a 2ª harmônica via FFT para os testes a (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz (célula defeituosa 01).

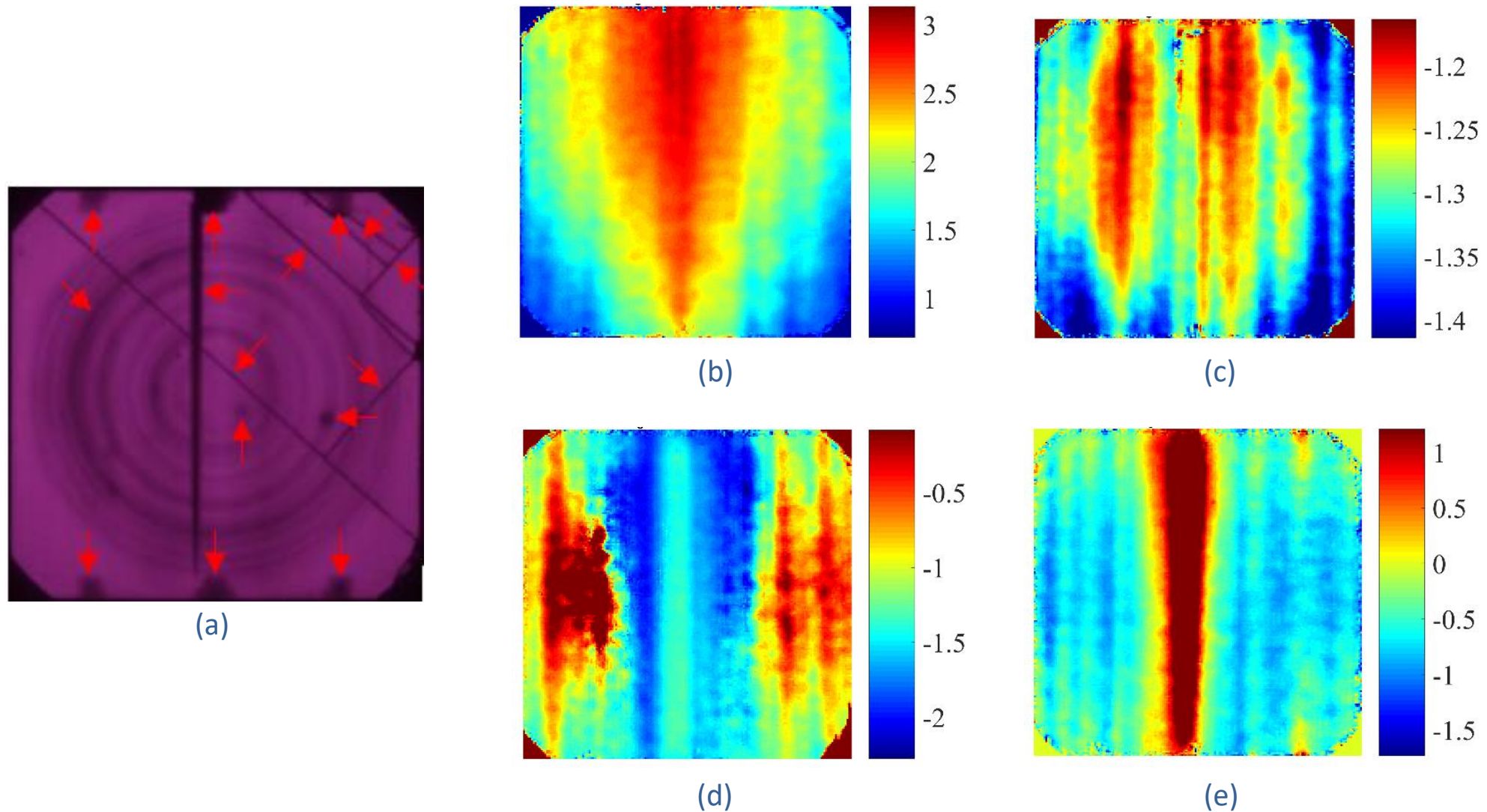


Figura 21 – Imagem (a) eletroluminescente e imagens de fase para a 2ª harmônica via FFT para os testes a (b) 6 mHz, (c) 11 mHz, (d) 50 mHz e (e) 100 mHz (célula defeituosa 02).



## CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO DA FUNÇÃO GAUSSIANA BIDIMENSIONAL

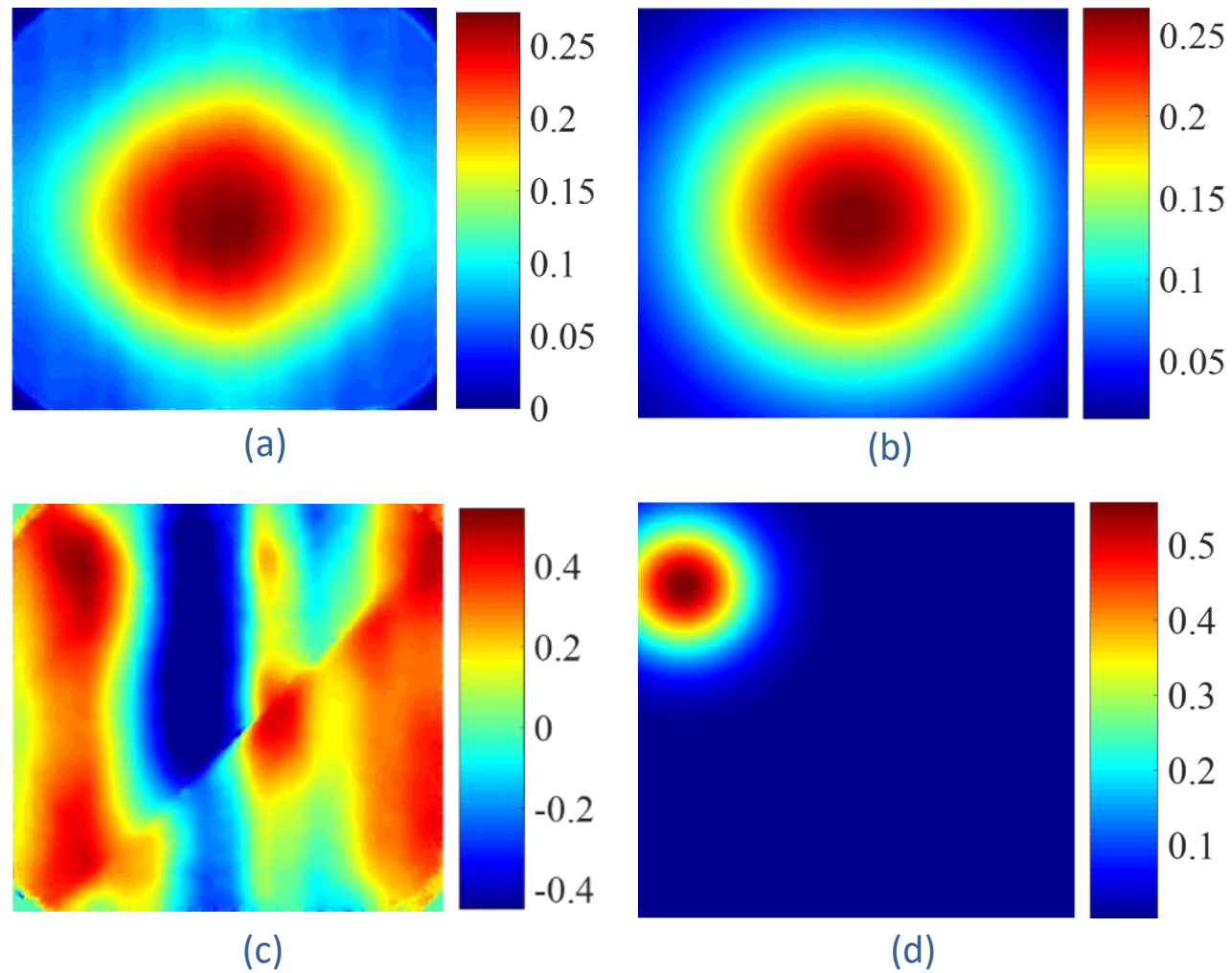


Figura 22 – Célula saudável 01: (a) imagem de magnitude da FFT; (b) modelo gaussiano; célula defeituosa: (c) imagem de magnitude da FFT; (d) modelo gaussiano.

# CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO DA FUNÇÃO GAUSSIANA BIDIMENSIONAL

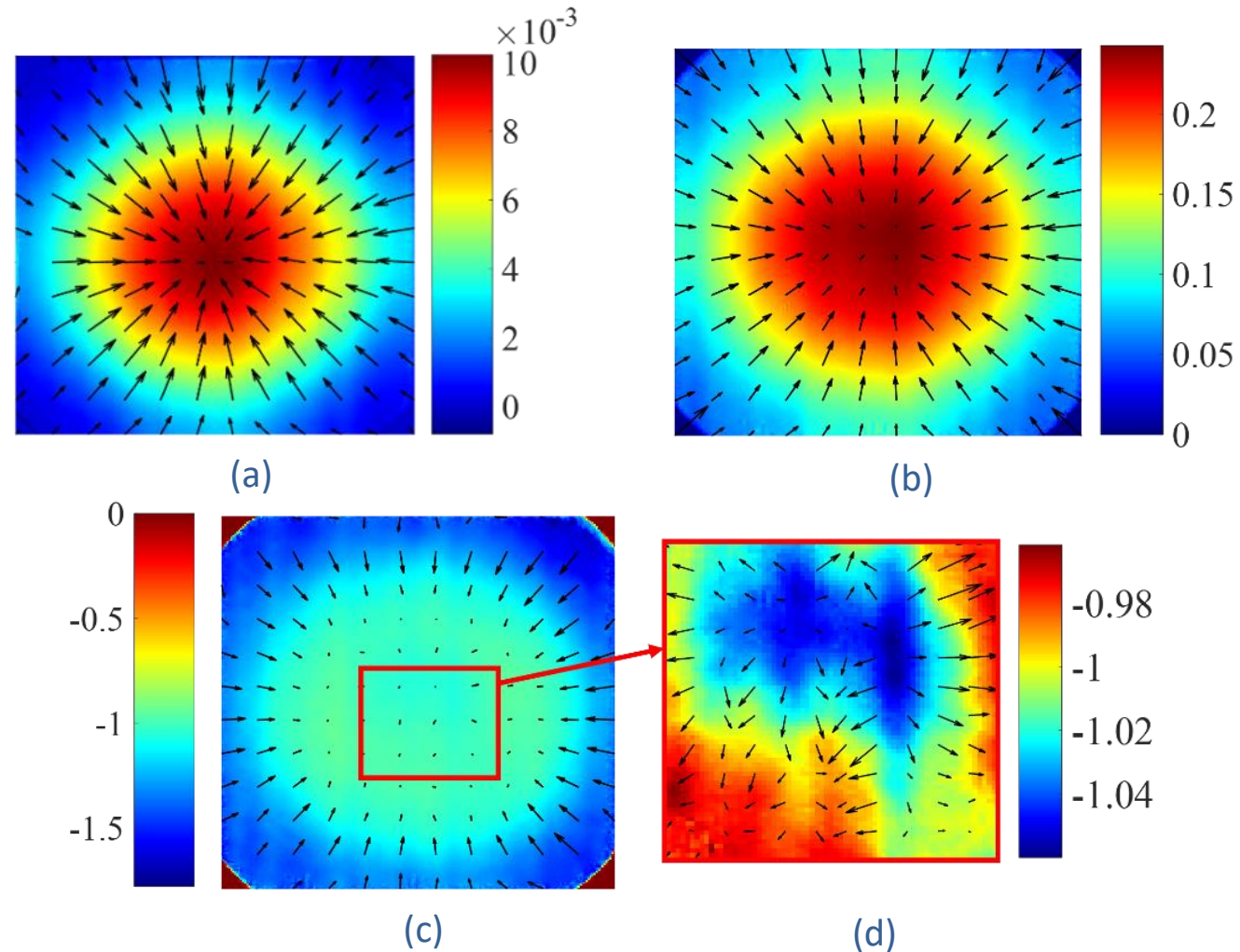


Figura 23 – Gráficos do gradiente nas imagens da célula saudável 02: (a) primeira componente principal, (b) magnitude – FFT, (c) fase e (d) detalhamento da fase.

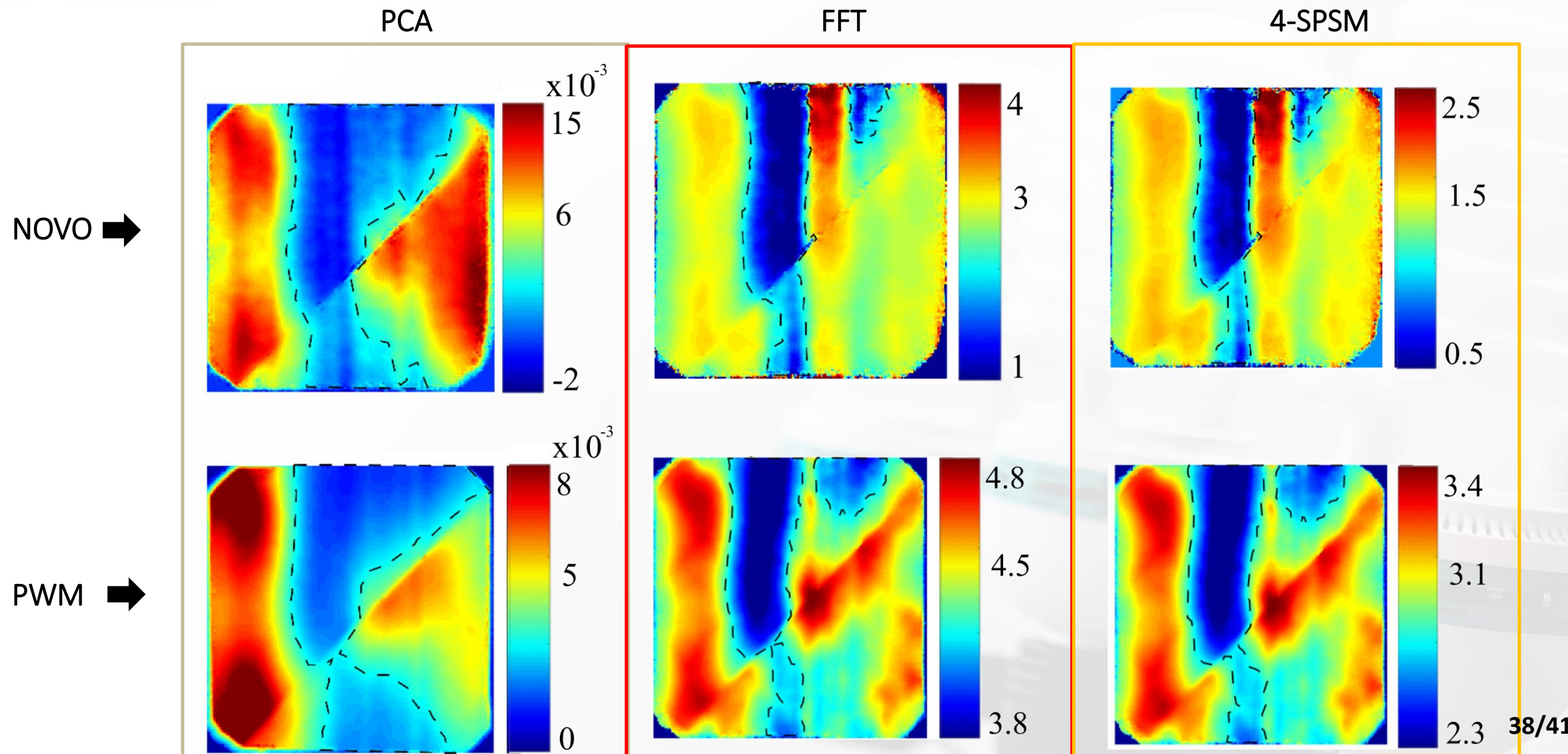
# CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO DA FUNÇÃO GAUSSIANA BIDIMENSIONAL

Tabela 1 – Determinação  $R^2$  para células fotovoltaicas saudáveis e defeituosas .

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

### 3. RESULTADOS

## COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO PROPOSTO USANDO UM SINAL ELÉTRICO DE TENSÃO SENOIDAL E A TÉCNICA USANDO UM SINAL PWM



### 1 PROPOSIÇÃO DE NOVO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Uso de sinal de tensão elétrica senoidal como fonte de excitação térmica.

### 3 DELIMITAÇÃO DAS REGIÕES DE DEFEITOS

Diferenças de contraste mais relevantes para as imagens de fase comparativamente às imagens de módulo; Destaque para as frequências de 50 mHz e 100 mHz.

### 2 DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS

Êxito na detecção e caracterização de defeitos nas células fotovoltaicas analisadas com distinção entre as regiões saudáveis e defeituosas.

### 4 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO GAUSSIANO 2D

Valores satisfatórios de  $R^2$  para as imagens de magnitude e primeira componente principal (magnitude-FFT: entre 0,904 e 0,973; 1ª componente principal: entre 0,948 e 0,977); sem impacto significativo pela variação de frequência.

### 5 COMPACTAÇÃO DE DADOS

Redução de conjunto expressivamente grande de imagens térmicas para um restrito de imagens de módulo, fase e componentes.

### 7 CLASSIFICAÇÃO NÃO SUBJETIVA DOS DADOS TÉRMICOS

Realizada a partir do método gaussiano 2D aplicado às imagens de magnitude, fase e 1ª componente principal.

### 6 TÉCNICA REPRODUTÍVEL

Desvio padrão máximo obtido dos ensaios de apenas 5% para a célula saudável avaliada e 17% para a célula defeituosa 01.

### 8 EFICÁCIA COMPARÁVEL A METODOLOGIAS CONVENCIONAIS

Resultados eficazes mesmo comparados à metodologia convencional que utiliza um sinal PWM.



#### AMPLIAÇÃO DA BASE DE DADOS

Replicação do método para uma base de dados mais ampla (uso de células fotovoltaicas de outros modelos, tecnologias e aspectos construtivos).



#### APLICAÇÃO DE OUTRAS TÉCNICAS DE PDI

Aplicação de outras técnicas de PDI às imagens finais obtidas neste estudo; avaliar comparativamente.



#### USO DOS DADOS RADIOMÉTRICOS

Verificar o impacto da utilização dos dados brutos dos vídeos radiométricos comparativamente às matrizes de temperatura.



#### APLICAÇÃO DO MÉTODO A MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Aplicar o método em módulos fotovoltaicos; avaliar a aplicação do método sem o uso da câmara escura.



**OBRIGADO** PELA ATENÇÃO.

**Contato:** [thiago.engelet@outlook.com](mailto:thiago.engelet@outlook.com)

