



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EDNA MARIA DOS SANTOS PINTO
WEMERSON ALVES DA SILVA**

**IMPLANTAÇÃO DE LABORATÓRIO PARA INSPEÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS POR ELETROLUMINESCÊNCIA NO INSTITUTO FEDERAL
DO TOCANTINS – CAMPUS PALMAS**

**PALMAS-TO
2025**

EDNA MARIA DOS SANTOS PINTO

WEMERSON ALVES DA SILVA

**IMPLANTAÇÃO DE LABORATÓRIO PARA INSPEÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS POR ELETROLUMINESCÊNCIA NO INSTITUTO FEDERAL
DO TOCANTINS – CAMPUS PALMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso superior Bacharelado de Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins campus Palmas - TO como requisito para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista do Curso Superior de Engenharia Elétrica.

Orientador: Felipe Tozzi Bittencourt

PALMAS-TO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

P659i Pinto, Edna Maria Dos Santos
 IMPLANTAÇÃO DE LABORATÓRIO PARA INSPEÇÃO DE
 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS POR ELETROLUMINESCÊNCIA NO
 INSTITUTO FEDERAL DO TOCANTINS – CAMPUS PALMAS / Edna
 Maria Dos Santos Pinto, Wemerson Alves da Silva. – Palmas, TO,
 2025.

39 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.

Orientador: Felipe Tozzi Bittencourt

1. LABORATÓRIO DE ELETROLUMINESCÊNCIA.. 2.
INSPEÇÃO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.. 3. Felipe Tozzi
Bittencourt, Edna Maria dos Santos Pinto, Wemerson Alves da Silva..
I. Silva, Wemerson Alves da. II. Bittencourt, Felipe Tozzi III. , . IV.
Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

EDNA MARIA DOS SANTOS PINTO

WEMERSON ALVES DA SILVA

**IMPLANTAÇÃO DE LABORATÓRIO PARA INSPEÇÃO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS POR ELETROLUMINESCENCIA NO INSTITUTO FEDERAL
DO TOCANTINS - CAMPUS PALMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado
em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
como exigência à obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 26/08/2025

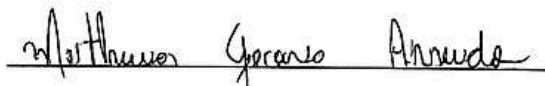
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Felipe Tozzi Bittencourt
Orientador



Prof. Dr. Antônio Marcelino da Silva Filho
Membro da Banca Avaliadora



Eng. Exp. Matheus Comes Arruda
Membro da Banca Avaliadora

RESUMO

Este trabalho apresenta o processo de implantação de um laboratório para inspeção de módulos fotovoltaicos por meio de eletroluminescência (EL) no Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas. A partir do crescente uso da energia solar e da necessidade de garantir a integridade e o desempenho dos módulos fotovoltaicos, foi desenvolvido um espaço específico para realização de ensaios que permitem identificar defeitos invisíveis a olho nu, como microfissuras e falhas de interconexão. O estudo envolveu a montagem da infraestrutura, aquisição e adaptação de equipamentos, execução de ensaios conforme a norma IEC 60904-13 e processamento das imagens obtidas. Os resultados dos ensaios EL validam a funcionalidade do laboratório e sua capacidade de atender demandas acadêmicas e institucionais, contribuindo para pesquisas e manutenção de sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: Eletroluminescência, Módulo Fotovoltaico, Diagnóstico de Defeitos, IEC 60904-13, Energia Solar.

ABSTRACT

This study presents the implementation of a laboratory for the inspection of photovoltaic modules using electroluminescence (EL) at the Federal Institute of Tocantins – Palmas Campus. Driven by the growing adoption of solar energy and the need to ensure the integrity and performance of photovoltaic modules, a dedicated space was developed for conducting tests that detect defects invisible to the naked eye, such as microcracks and interconnection failures. The project involved setting up the infrastructure, acquiring and adapting equipment, performing tests in accordance with IEC 60904-13, and processing the captured images. The results of the EL tests validate the laboratory's functionality and its ability to meet academic and institutional demands, contributing to research and maintenance of photovoltaic systems.

Keywords: Electroluminescence, Photovoltaic Module, Defect Diagnosis, IEC 60904-13, Solar Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Inversor solar	13
Figura 2 - Cabo CC	14
Figura 3 - Conector MC4	14
Figura 4 - String box CC	15
Figura 5 - String box CA	16
Figura 6 - Estrutura de fixação	16
Figura 7 - Cristal de quartzo e bloco de silício ultrapuro	17
Figura 8 - Lingote de silício monocristalino	18
Figura 9 - Wafer de silício monocristalino	18
Figura 10 - Célula monocristalina	19
Figura 11 - Lingote de Silício policristalino	19
Figura 12 - Wafer de Silício policristalino	20
Figura 13 - Célula policristalina	20
Figura 14 - Módulos fotovoltaicos monocristalino e policristalino	21
Figura 15 - Banda de energia.....	22
Figura 16 - Sensibilidade espectral dos sensores CCD de silício e à InGaAs	24
Figura 17 - Tipos de defeitos	24
Figura 18 - (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência	25
Figura 19 - Fluxograma de validação do laboratório	27
Figura 20 - Planta baixa do Laboratório de Eletroluminescência e seus componentes.....	28
Figura 21 - Laboratório para inspeções EL	29
Figura 22 - Fonte de corrente contínua.....	29
Figura 23 - Câmera fotográfica	30
Figura 24 - Dados de placa dos módulos fotovoltaicos.....	31
Figura 25 - Módulo sem defeito aparente.....	33
Figura 26 - Módulo com defeito aparente	34
Figura 27 - Módulo com defeito aparente mas sem danos em suas células	35

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCD	Charge-Coupled Device (Dispositivo de Carga Acoplado)
EL	Eletroluminescência
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
InGaAs	Arseneto de Índio Gálio
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
IR	Infrared (Infravermelho)
O&M	Operação e Manutenção
NIR	Near Infrared (Infravermelho Próximo)
NBR	Norma Brasileira
PID	Potential Induced Degradation (Degradação Potencial Induzida)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Problema de pesquisa.....	9
1.2 Justificativa.....	10
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo geral.....	10
1.3.2 Objetivos específicos.....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1 Energia Solar Fotovoltaica.....	12
2.2 Kit Fotovoltaico.....	12
2.2.1 Inversor.....	12
2.2.2 Cabos e Conectores.....	13
2.2.3 String box CC e CA.....	15
2.2.4 Estrutura de fixação.....	16
2.2.5 Célula e módulo fotovoltaico.....	17
2.3 Eletroluminescência.....	21
2.3.1 Propriedades ópticas do silício.....	21
2.3.2 Dispositivo fotográfico.....	22
2.3.3 Obtenção de imagens.....	23
2.3.4 Tratamento de imagens EL.....	24
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	26
4. LABORATÓRIO DE ELETROLUMINESCÊNCIA DO IFTO - PALMAS.....	28
4.1 Componentes.....	29
4.2 Ensaio de Eletroluminescência.....	32
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	33
6. CONCLUSÃO.....	36
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	37
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1. INTRODUÇÃO

Uma das fontes de geração de energia que vem se destacando nos últimos anos é a geração distribuída, sendo uma das maiores e mais sustentáveis fontes de geração de energia no Brasil, atingindo em março de 2022 um marco histórico de 10 gigawatts (GW) de potência instalada. A fonte mais utilizada para micro e minigeração distribuída é a solar fotovoltaica, com 910,6 mil micro e miniusinas e cerca de 9,9 gigawatts (GW) de potência instalada (99% do total). Essa capacidade se soma aos 4,88 GW de potência instalada por empreendedores em usinas solares de grande porte, demonstrando o crescimento exponencial da energia solar no país (ANEEL, 2022). Um dos principais benefícios é a possibilidade de consumir instantaneamente parte da energia gerada pelo sistema fotovoltaico e fornecer o excedente para a concessionária local, aliviando assim a potência necessária para suprir parte da demanda energética.

Um dos principais componentes da geração solar fotovoltaica é o módulo fotovoltaico, constituído por células fotovoltaicas compostas por materiais semicondutores como o silício, que são dopadas positiva e negativamente, formando a junção P-N. Quando as células estão expostas à radiação solar, os fótons presentes na luz colidem com os átomos do semicondutor provocando um fluxo de elétrons que consequentemente cria uma corrente elétrica, este efeito também é conhecido como efeito fotovoltaico (SCIENCE IN SCHOOL, 2012).

A partir do momento que um kit gerador fotovoltaico (que é composto por módulos, inversor, estrutura de fixação, cabos, conectores e string box CC e CA com seus componentes de proteção) é adquirido, inicia-se o processo logístico de separação e envio destes equipamentos do distribuidor até o cliente final onde o sistema será instalado. Nesse processo os módulos fotovoltaicos passam por um rigoroso processo de verificação de qualidade e um primeiro processo logístico de transporte desde a fábrica até o distribuidor, onde o mesmo está sujeito a sofrer danos mecânicos durante este percurso, podendo ser entregue com algum dano ao cliente final, dano este que, na maioria das vezes pode ser imperceptível a olho nu.

Com o aumento na procura e aquisição de sistemas fotovoltaicos, aliado à evolução na fabricação de módulos de maior potência, surge a preocupação com os custos de O&M (Operação e Manutenção). Esses custos, além de incluir a limpeza e manutenção dos componentes do sistema como inversores, quadros, dispositivos de proteção e estruturas podem, em alguns casos, envolver a troca de módulos fotovoltaicos danificados, o que impacta diretamente na performance do sistema. Manter o melhor desempenho tem se tornado o objetivo principal para garantir o máximo aproveitamento e retorno financeiro sobre o

investimento realizado pelos investidores.

Existem alguns métodos ópticos para analisar a integridade física do módulo, mais especificamente as células fotovoltaicas. Dois dos mais conhecidos são a termografia infravermelha (IR) e a eletroluminescência (EL), que permitem a identificação de defeitos como microfissuras, pontos quentes e falhas de interconexão (GALLARDO-SAAVEDRA et al., 2020; FERREIRA et al., 2020), que será o alvo deste estudo.

Através da EL pode-se detectar mau funcionamento, defeitos ou até falhas. A imagem EL é um método de caracterização de alta resolução que fornece um mapa da queda de tensão de um ponto para outro sobre as células solares, que é tipicamente normalizado na faixa de 0 a 255 (Köntges et al., 2011, Paggi et al., 2014, Paggi et al., 2016).

A eletroluminescência é um fenômeno que ocorre em alguns materiais semicondutores quando são submetidos a um campo eletromagnético ou à passagem de corrente elétrica. O resultado dessa aplicação em um semicondutor é a emissão de luz enquanto houver corrente em circulação no material. Geralmente quando existem danos ou rachaduras nesse painel, ocorre uma queda de tensão que induz uma resistência adicional localizada, que deixa uma falha na emissão de luz, caracterizando assim, um possível problema.

1.1 Problema de pesquisa

Considerando que as inspeções em módulos fotovoltaicos por meio de eletroluminescência exigem um ambiente controlado e específico, faz-se necessária a criação de um laboratório adequado. Este espaço deve ser totalmente escuro e equipado com os instrumentos necessários para a realização dos ensaios, como uma fonte de tensão CC, suportes para a fixação dos módulos e um tripé para a sustentação da câmera. Diante dos desafios identificados, este estudo propõe a seguinte questão de pesquisa: É possível estabelecer e adaptar um laboratório no Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas, de modo a obter resultados satisfatórios em testes autorais para aplicação neste trabalho?

1.2 Justificativa

Diante da crescente busca por independência energética, estabilidade econômica e uma melhor qualidade de vida, os consumidores esperam que seus sistemas fotovoltaicos ofereçam durabilidade e qualidade. Assim, é fundamental a realização de diversos estudos e testes que assegurem a excelência desses equipamentos, especialmente os módulos, uma vez que representam um investimento significativo. É essencial que o desempenho e a entrega desses sistemas correspondam às expectativas geradas por tal investimento.

O monitoramento é uma ferramenta essencial para acompanhar a geração de energia e garantir o desempenho esperado de um sistema fotovoltaico. Quando se observa um comportamento atípico, identificado por meio de alarmes emitidos pelo inversor, é necessário realizar uma intervenção imediata. Isso envolve o início de uma análise completa do sistema, visando identificar e corrigir a intercorrência de forma eficaz.

Portanto, o uso do teste de imagem através da EL se faz necessário como um meio eficaz de inspeção de módulos fotovoltaicos, permitindo detectar defeitos que podem facilmente passar despercebidos. Através da análise de EL, pode-se atestar microscopicamente o estado físico do módulo, ou seja, em suas células, e assim, ter um direcionamento de como prosseguir diante da situação do módulo analisado. Se o resultado é irrelevante para o rendimento do sistema ou se está impactando consideravelmente, a atitude cabível é realizar a substituição deste painel danificado para assegurar a performance do sistema fotovoltaico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é montar um laboratório para a realização de inspeções de módulos fotovoltaicos por meio da eletroluminescência no IFTO - Campus Palmas.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Montagem do laboratório específico para a realização de ensaios de EL;
- b) Realizar registros por fotos de módulos fotovoltaicos em bom estado e módulos visivelmente danificados;
- c) Processar as imagens obtidas;
- d) Tratar as imagens de EL em software específico para fins de observação;
- e) Comparar as imagens visuais dos módulos inspecionados com imagens de EL tratadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar é uma fonte de energia renovável que cresce cada vez mais, tornando-a um investimento muito procurado não somente voltado para a geração distribuída, mas também para veículos de transporte, sistemas de aquecimentos de água, entre outros. Em consequência disso surgiu a necessidade de um avanço tecnológico dos itens que o compõem em comparação com os primeiros que surgiram com a descoberta deste meio de gerar energia.

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão. (CRESESB, 2006).

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios do novo milênio (CRESESB, 2006).

Um sistema fotovoltaico como outros meios de geração de energia é constituído por vários componentes. Para que se tenha um melhor entendimento e visualização da forma como é gerada a energia solar, a seguir serão listados cada item que compõe um kit gerador fotovoltaico.

2.2 Kit Fotovoltaico

2.2.1 Inversor

O inversor é um item indispensável em um sistema fotovoltaico. Sua finalidade é fazer a conversão de corrente contínua (CC) que vem das strings (conexão em série ou paralelo dos módulos fotovoltaicos) para corrente alternada (CA) por meio de transistores. Um dos transistores mais utilizados para realizar essa conversão é o MOSFET. Por meio dessa conversão é possível obter maior potência, que por sua vez alimenta o quadro de distribuição ao qual está conectado, permitindo o consumo instantâneo de parte da energia gerada e

também a injeção da energia excedente na rede. A Figura 1 mostra um inversor string bastante utilizado em aplicações comerciais.

Figura 1 - Inversor solar



Fonte: GoodWe (2020).

Os inversores comercializados variam de acordo com a potência e aplicação, sendo eles: On-Grid, Off-Grid e Híbridos. O tipo de inversor mais comercializado é o On-Grid que opera sincronizado com a rede elétrica, obedecendo a ABNT NBR 16.149 que faz recomendações específicas e estabelece requisitos para conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia. Os inversores também possuem um portal de monitoramento próprio, que varia de acordo com cada fabricante, permitindo ao usuário acompanhar a geração em tempo real, histórico de geração passado e alarmes.

2.2.2 Cabos e Conectores

Além dos itens de maior destaque em um sistema fotovoltaico, existem alguns componentes que são de extrema importância para garantir a operação e segurança de um sistema fotovoltaico, como por exemplo os cabos que fazem a conexão entre módulos, string box, inversor e rede elétrica bem como os conectores que garantem a conexão correta e segura.

A Figura 2 mostra o cabo do tipo corrente contínua que são específicos para esta aplicação. A utilização dos condutores de corrente contínua para sistemas fotovoltaicos

devem seguir os requisitos da NBR 16690 (ABNT, 2019) sendo construídos com dupla camada de proteção e também devem ser resistentes contra raios UV e ao ambiente ao qual serão instalados, por exemplo expostos ao sol e chuva.

Figura 2 - Cabo CC



Fonte: InnovCable (entre 2015 e 2022).

No caso do conector (Figura 3), embora ele pareça uma peça simples, sua função é muito importante. Ele garante a segurança das conexões ao evitar que um componente seja conectado a outro de maneira incorreta. Por esse motivo, eles são considerados uma das peças finais de um quebra-cabeça solar e são tão importantes quanto os próprios painéis. Esses pequenos componentes não devem ser ignorados, uma vez que são essenciais para um projeto bem-sucedido (AMPHENOL, 2021).

Figura 3 - Conector MC4



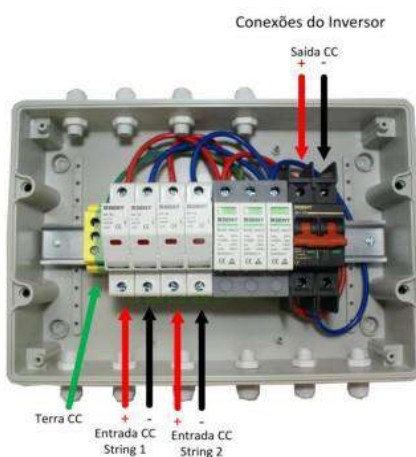
Fonte: Canal Solar (2020).

2.2.3 String box CC e CA

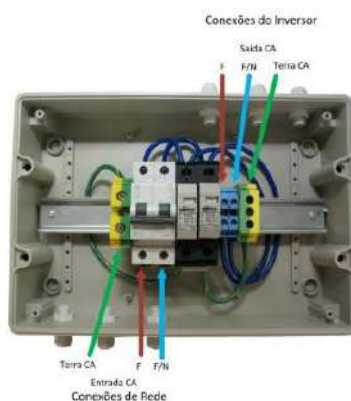
Tratando-se de geração de energia elétrica, um fator indispensável é a segurança dos seus componentes, e no sistema solar, o item responsável por esta função é a string box, que protege o sistema fotovoltaico contra descargas e surtos. A string box CC protege especificamente os cabos de corrente contínua, que fazem a interligação entre os painéis e o inversor, isolando assim o sistema de produção.

O sistema fotovoltaico on-grid que é mais comumente usado, possui duas fontes de alimentação, uma originada pelos módulos e a outra advinda da concessionária, pois o sistema permanece conectado à rede, fazendo a alimentação do inversor. Portanto, tendo em vista esta característica do on-grid, deve haver uma proteção para cada alimentação, ou seja, um string para corrente contínua e outro para corrente alternada. É válido ressaltar que alguns fabricantes de inversores, já disponibilizam a proteção do circuito de corrente contínua embutida no próprio inversor, tornando opcional a utilização ou não de uma string box adicional. As Figuras 4 e 5 exemplificam os modelos de string box utilizados em instalações de sistemas fotovoltaicos.

Figura 4 - String box CC



Fonte: Sol Central (2016).

Figura 5 - String box CA

Fonte: Sol Central (2016).

2.2.4 Estrutura de fixação

A estrutura solar tem como objetivo oferecer suporte de fixação para os painéis solares e seus componentes. Segundo o Portal Solar, um suporte de fixação de qualidade e instalado corretamente irá promover segurança no processo de instalação e contra ações de ventos ou tempestades, garantindo assim que o seu painel não sairá voando. (PORTAL SOLAR, 2014).

Existem diferentes modelos de estrutura de fixação que variam de acordo com o local que será instalado, podendo ser montado no solo ou em telhados com telha cerâmica, colonial, fibrocimento, laje, etc. Seja qual for o local, a estrutura deve ser fabricada de modo que proporcione facilidade na instalação e manutenção. Geralmente os suportes são feitos com alumínio ou aço inoxidável e devem possuir proteção contra corrosão, além de instalados em telhados, os sistemas fotovoltaicos também podem ser instalados em estruturas de estacionamento como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Estrutura de fixação

Fonte: Portal solar (2022).

2.2.5 Célula e módulo fotovoltaico

Existem atualmente diversas tecnologias para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos. As células fotovoltaicas mais comuns encontradas no mercado são a do silício monocristalino e a do silício policristalino. O silício utilizado na fabricação de células fotovoltaicas é extraído do mineral quartzo (VILLALVA, 2015). O Brasil detém as maiores reservas mundiais de quartzo. Contudo, como muitas das empresas deste ramo operam no regime de garimpo e de forma muito rudimentar, elas não têm base tecnológica para agregar valor e explorar toda a potencialidade de uso deste minério (J. MENDO, 2009).

Os módulos fotovoltaicos mais comercializados são do tipo monocristalino e policristalino, cada tipo exige um processo diferente de tratamento do silício para a fabricação das células que constituem o painel fotovoltaico. A figura 7 mostra a esquerda o cristal de quartzo e a direita um bloco de silício ultra-puro.

Figura 7 - Cristal de quartzo e bloco de silício ultrapuro



Fonte: HARRISON, Wikimedia Commons (2006) e JURII, Wikimedia Commons (2009).

Blocos de silício ultra-puro, como o mostrado na figura anterior, são aquecidos em altas temperaturas e submetidos a um processo de formação de cristal chamado método de Czochralski. O resultante desse processo é o lingote de silício monocristalino mostrado na Figura 8 (VILLALVA, 2015).

Figura 8 - Lingote de silício monocristalino



Fonte: STAHKOCHER, Wikimedia Commons (2004).

O lingote de silício monocristalino é constituído de uma estrutura cristalina única e possui organização molecular homogênea, o que lhe confere aspecto brilhante e uniforme. O lingote é serrado e fatiado para produzir wafers silício puro, como a mostrada na Figura 9. Os wafers não possuem as propriedades de uma célula fotovoltaica (VILLALVA, 2015).

Figura 9 - Wafer de silício monocristalino



Fonte: Villalva (2015).

Os wafers são submetidos a processos químicos nos quais recebem impurezas em ambas as faces, formando as camadas de silício P e N que constituem a base para o funcionamento da célula. Por fim, a célula semi acabada recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra face e uma camada de material anti reflexivo na face que vai receber a luz. O resultado final é a célula fotovoltaica monocristalina mostrada na Figura 10 (VILLALVA, 2015).

Figura 10 - Célula monocristalina



Fonte: Clever Solar Power (2020).

O silício policristalino é resultado de um processo mais barato do que aquele empregado na fabricação do monocristalino. O lingote de silício policristalino é formado por um aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes, cujo a aparência é mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Lingote de silício policristalino



Fonte: Villalva (2015).

O lingote policristalino também é serrado para produzir wafers, que posteriormente se transformam em células fotovoltaicas. As células policristalinas possuem aparência heterogênea e normalmente são encontradas na cor azul, mas sua cor pode diferir em função do tratamento anti reflexivo empregado. A Figura 12 mostra um wafer policristalino.

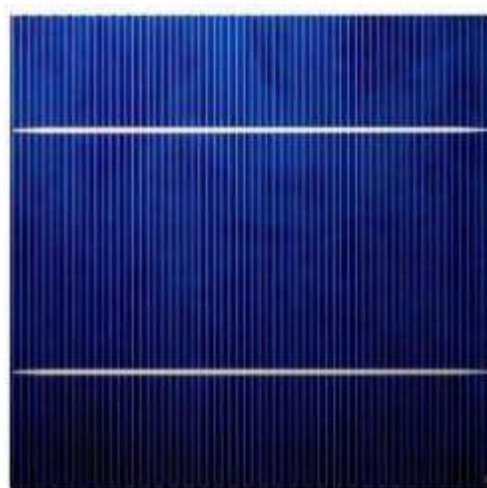
Figura 12 - Wafer de silício policristalino



Fonte: Clever Solar Power (2020).

A Figura 13 mostra uma célula policristalina onde é possível observar as manchas existentes no corpo da mesma devido ao tipo de silício utilizado na sua fabricação. As células policristalinas têm eficiência inferior às células monocristalinas, seu custo de fabricação também é reduzido.

Figura 13 - Célula Policristalina

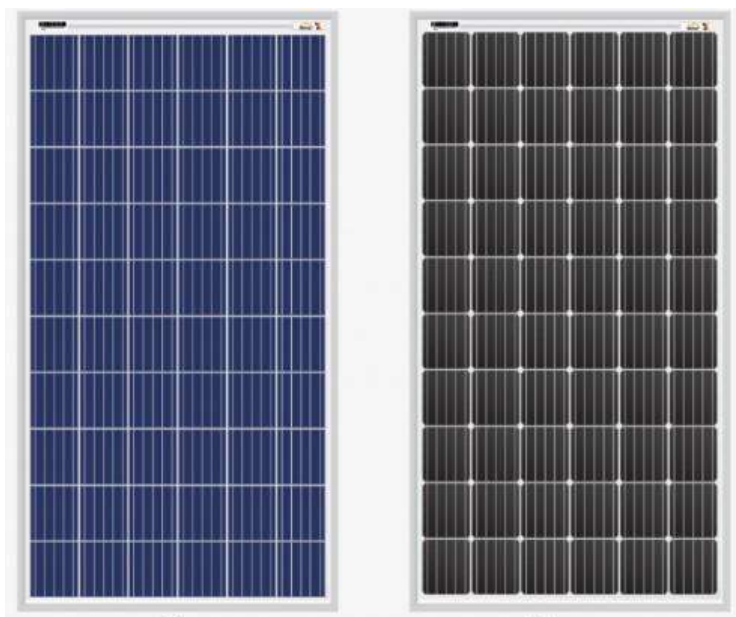


Fonte: Clever Solar Power (2020).

Apesar da evolução na fabricação dos módulos, como por exemplo o surgimento de módulos flexíveis desenvolvidos a partir de uma tecnologia chamada filmes finos, este avanço

ainda não se disseminou comercialmente comparado com modelos de painéis convencionais, devido sua fabricação até o momento apresentar modelos de baixa potência e um alto valor aquisitivo. Por fim, a Figura 14 apresenta as duas tecnologias de módulos fotovoltaicos citados anteriormente mais comercializadas no Brasil, onde à esquerda é mostrado um módulo policristalino e à direita um módulo monocristalino.

Figura 14 - Módulos fotovoltaicos policristalino e monocristalino



Fonte: Sunergia (2021).

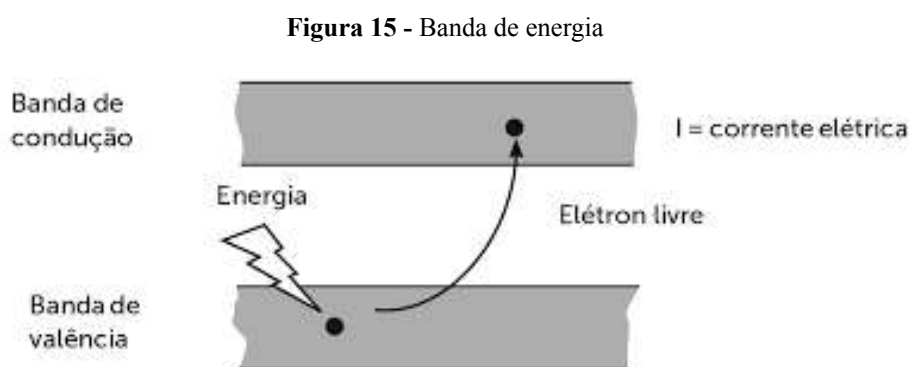
2.3 Eletroluminescência

2.3.1 Propriedades ópticas do silício

A eletroluminescência é um fenômeno óptico e elétrico que ocorre em semicondutores, como por exemplo o silício. Este efeito ocorre por meio de uma corrente elétrica injetada na célula fotovoltaica. Os processos envolvidos na emissão de luz podem ser divididos em duas partes distintas: excitação e recombinação dos portadores. A excitação pode ser causada por fenômenos ópticos, elétricos, térmicos, etc (SOMBRIIO, 2016).

Nesses processos de excitação e recombinação dos portadores, os elétrons da banda de valência ganham energia suficiente para transpor a barreira da banda proibida (*Band gap*) para

a banda de condução, tendo em vista que no caso de semicondutores a banda proibida tem tamanho relativamente pequeno como é mostrado na Figura 15. Desta forma, os elétrons que chegam à camada de condução precisam se recombinar com as lacunas existentes. É neste processo que ocorre a liberação de energia por meio de fótons que por sua vez ocasiona na emissão de luz (SOMBRIIO, 2011).



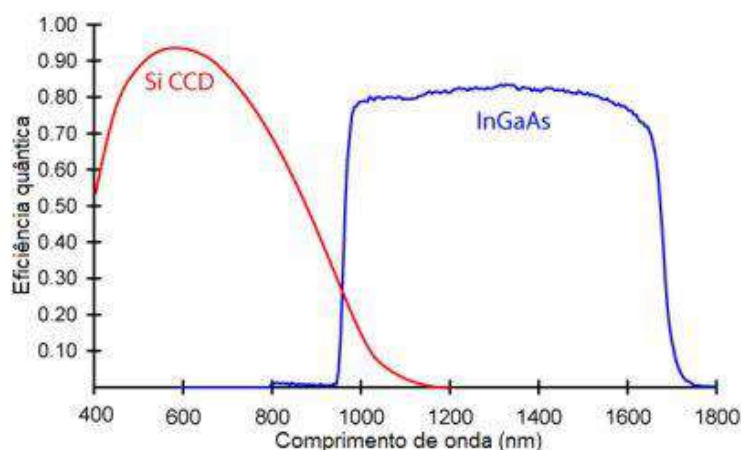
Fonte: Fernando César Batistel (2017).

2.3.2 Dispositivo fotográfico

Existem câmeras no mercado específicas para captura de imagens de eletroluminescência. Porém, o seu custo é elevado fazendo com que alternativas sejam estudadas para a obtenção das imagens. No entanto, é possível fazer adaptações em câmeras convencionais para alcançar o mesmo objetivo e obter imagens de EL satisfatórias. Para que o dispositivo convencional seja capaz de capturar determinada imagem, ele deve possuir sensores CCD (Dispositivo de Carga Acoplado) que são sensíveis ao comprimento de onda da eletroluminescência.

Como mostra a Figura 16, apesar de estes sensores CCDs possuírem baixa eficiência quântica na faixa de maior emissão eletroluminescente (entre 1100 e 1200 nm), quando comparados com o sensor de InGaAs (Arseneto de Índio Gálio), os sensores CCD tem baixo custo e a resolução da imagem obtida é de boa qualidade, dependendo das condições de iluminação local (Figueiredo e Pinho Almeida, 2018).

Figura 16 -Sensibilidade espectral dos sensores CCD de silício e à base de InGaAs



Fonte: Figueiredo et al. (2018).

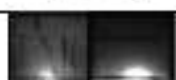
Além disso, existe um filtro que fica posicionado na frente do sensor CCD, para que seja possível a captura da imagem na faixa espectral de EL, este filtro deve ser retirado. Assim, torna-se possível obter imagens de EL com câmeras convencionais.

2.3.3 Obtenção de imagens

A obtenção das imagens é comumente realizada em duas etapas para fins de comparação e observação dos resultados possibilitando a verificação dos tipos de defeitos conforme a Figura 17. A primeira etapa deste processo consiste em registrar fotos visuais dos módulos a serem analisados, de modo que seja possível observar os detalhes existentes no plano do painel como ranhuras, trincas e manchas internas (existentes ou não), podendo ser realizado em um ambiente comum de preferência externo e com boa claridade.

A segunda etapa consiste na obtenção de imagens de EL que, por se tratarem do resultado de um processo que exige maior atenção serão realizados em um ambiente o mais escuro possível e com o auxílio de uma fonte de tensão cc externa, que alimentará o painel fotovoltaico estimulando-o eletricamente fazendo com que o mesmo emita radiação eletroluminescente que será capturada pela câmera utilizada.

Figura 17- Tipos de defeitos

Tipo de defeito	Imagem da célula
Anéis de estriação	
Defeito pelo manuseio com suporte de vácuo	
Formação de contato	
Corrosão por umidade com baixo dano na célula	
Corrosão por umidade com alto dano na célula	
Interrupção do finger	
Célula interligada desconectada com dano alto (local)	
Célula interligada desconectada com dano baixo (local)	
Célula altamente danificada interligada desconectada com dano alto (linha)	
Célula interligada desconectada com dano baixo na célula (linha)	
Célula interligada desconectada da linha até para o busbar	
Microfissura com partes isoladas	

Fonte: Matos, Lucas (2018).

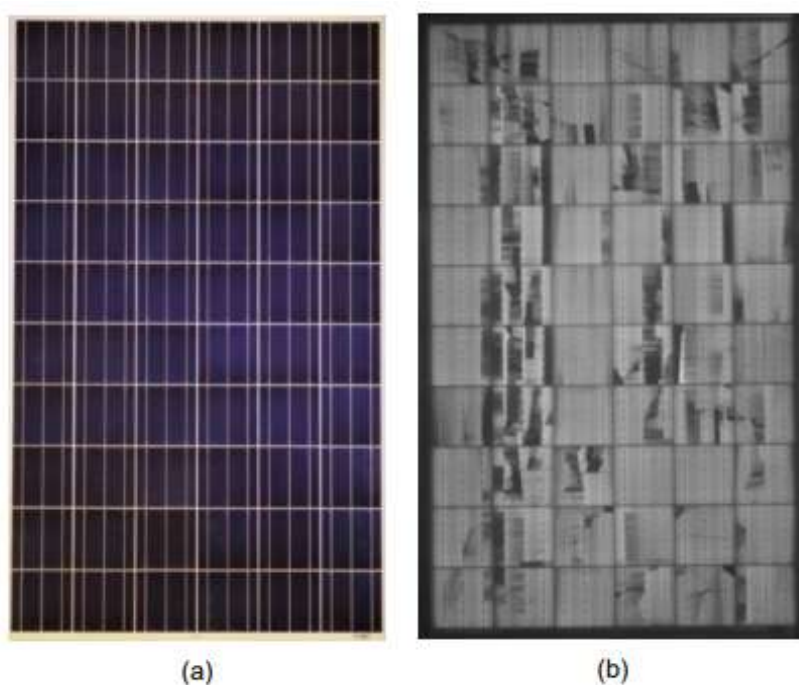
2.3.4 Tratamento de imagens EL

O tratamento de imagens de eletroluminescência (EL) é uma etapa crucial na análise de módulos fotovoltaicos, seguindo as diretrizes da norma **IEC 60904-13**. Esse processo consiste

em converter as imagens capturadas para um formato que facilite a visualização e a identificação de possíveis defeitos.

Para isso, as fotos são processadas digitalmente para se obter uma imagem em preto e branco. Essa conversão realça as células internas do módulo, permitindo analisar sua integridade e identificar problemas como microfissuras, células inativas ou áreas de baixa eficiência. A Figura 18(a) ilustra a diferença entre uma inspeção visual convencional e a imagem de eletroluminescência após o tratamento é ilustrado na Figura 18(b), evidenciando os detalhes internos que não são visíveis a olho nu.

Figura 18 - (a) inspeção visual e (b) imagem de eletroluminescência



Fonte: Matos, Lucas (2018).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

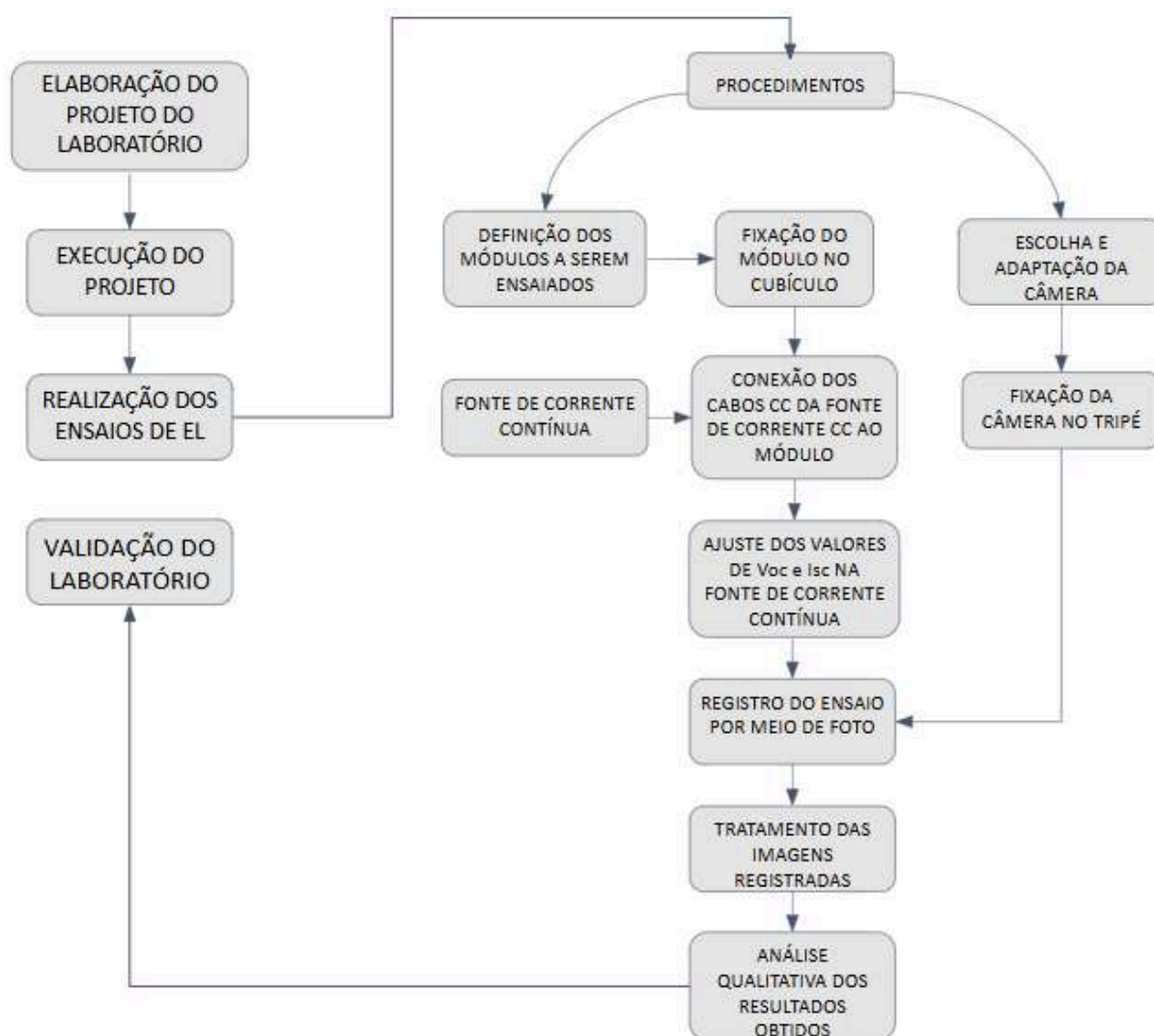
Este trabalho apresenta um estudo empírico, de natureza visual e analítica, cujo objetivo principal é a implementação de um laboratório de inspeção de módulos fotovoltaicos por meio de eletroluminescência no Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas. A partir dessa estrutura, foram conduzidos ensaios para a análise do estado físico das células que compõem os módulos fotovoltaicos, seguindo as etapas indicadas na Figura 19.

O laboratório foi projetado para possibilitar a obtenção de imagens de eletroluminescência (EL), as quais são processadas em software de edição com o intuito de identificar danos internos nos módulos. Esses danos podem ter origem em defeitos de fabricação ou em choques mecânicos durante o transporte e manuseio e, embora muitas vezes não sejam visíveis a olho nu, podem impactar de forma significativa o desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Estes ensaios são realizados em um laboratório adaptado e totalmente escuro com auxílio de uma câmera digital para o registro das fotos dos módulos a serem analisados. Por fim, utiliza-se também um software para tratamento das imagens, aplicando filtro a fim de se obter as imagens EL. Este tipo de procedimento é bastante utilizado pelos grandes fabricantes de módulos fotovoltaicos com o objetivo de manter registros da qualidade de cada lote de módulos fabricados e comercializados.

Comumente, a aplicação deste procedimento envolve um custo considerável devido a estrutura necessária para realizar os ensaios e ao alto investimento no dispositivo utilizado para o registro direto das imagens EL. No entanto, é possível obter resultados satisfatórios também em laboratórios mais simples, desde que sejam observadas as condições adequadas de captura e tratamento das imagens conforme as recomendações da **IEC 60904-13**.

Figura 19 - Fluxograma de planejamento e validação do laboratório

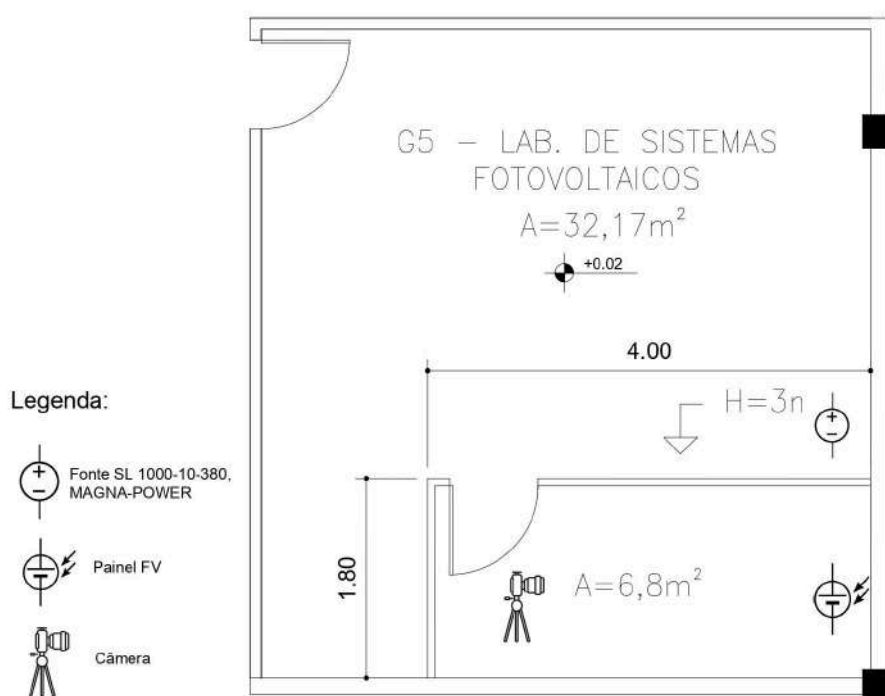


Fonte: Elaboração própria - 2025.

4. LABORATÓRIO DE ELETROLUMINESCÊNCIA DO IFTO - PALMAS

O laboratório foi instalado em uma sala disponibilizada pelo Instituto Federal do Tocantins, destinada à realização de ensaios de eletroluminescência (EL), sendo composto por dois ambientes distintos. No primeiro, estão o quadro de distribuição de energia e um rack do tipo U, destinado a abrigar a fonte de corrente contínua que é responsável por fornecer tensão e corrente para o módulo. O segundo ambiente é um cubículo totalmente isolado da luz externa, especialmente preparado para a execução dos ensaios. Nesse espaço, estão dispostos os cabos de corrente contínua para conexão com o módulo fotovoltaico analisado, além do tripé com a câmera e o próprio painel. A organização dos equipamentos e componentes segue a planta representada na Figura 19 e as imagens reais do laboratório constam na Figura 20.

Figura 20 - Planta baixa do Laboratório de Eletroluminescência e seus componentes



Fonte: Elaboração própria - 2025.

Figura 21 - Laboratório para inspeções EL



Fonte: Elaboração própria - 2025.

4.1 Componentes

- Fonte de corrente contínua — patrimônio do IFTO n.º 071892 — fabricado pela MAGNA-POWER, modelo SL1000-10-380, ilustrada na Figura 21.

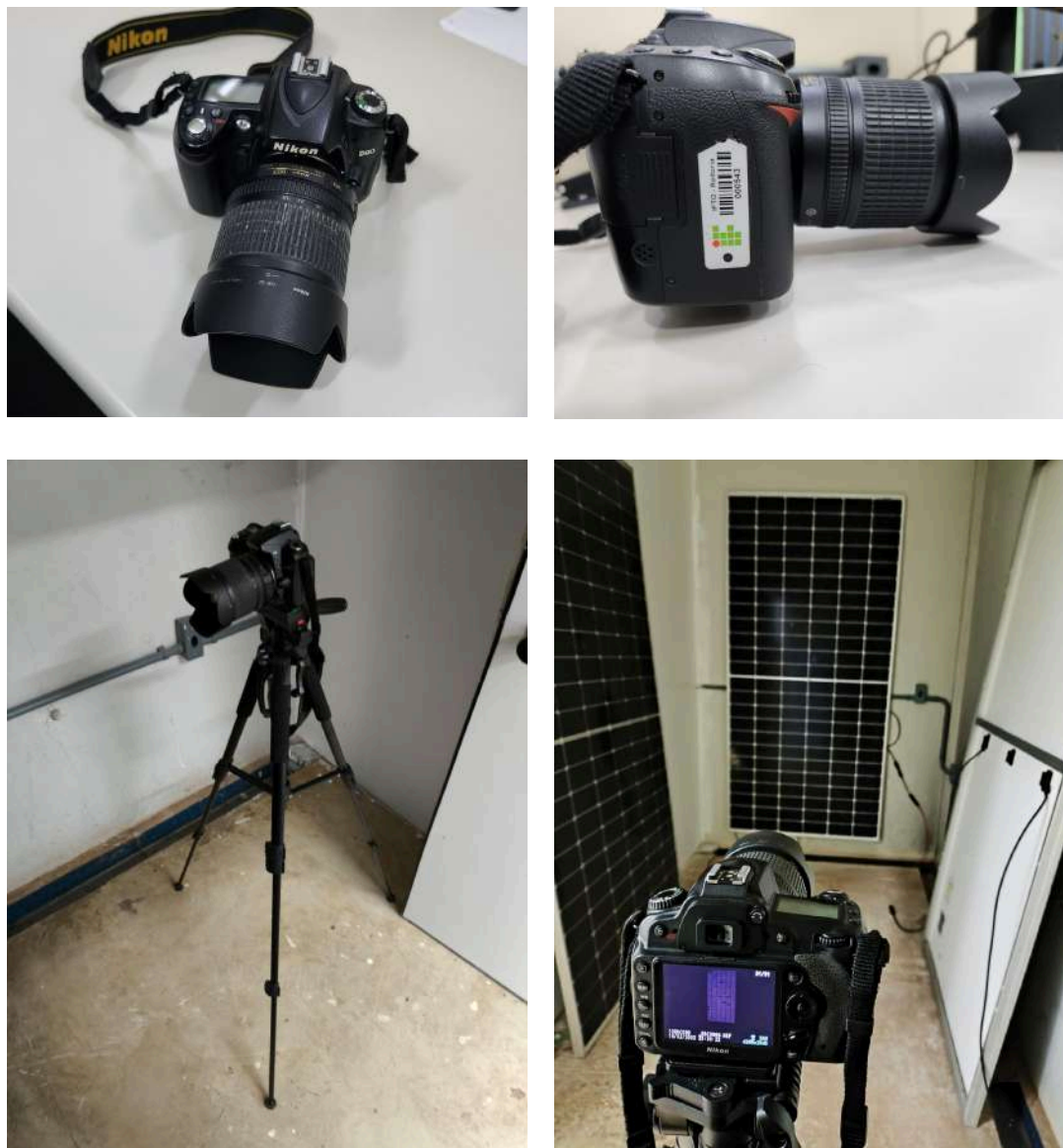
Figura 22 - Fonte de corrente contínua



Fonte: Elaboração própria - 2025.

- Câmera fotográfica — patrimônio do IFTO n° 000543 — fabricado pela NIKON, modelo D90, ilustrada na Figura 22.

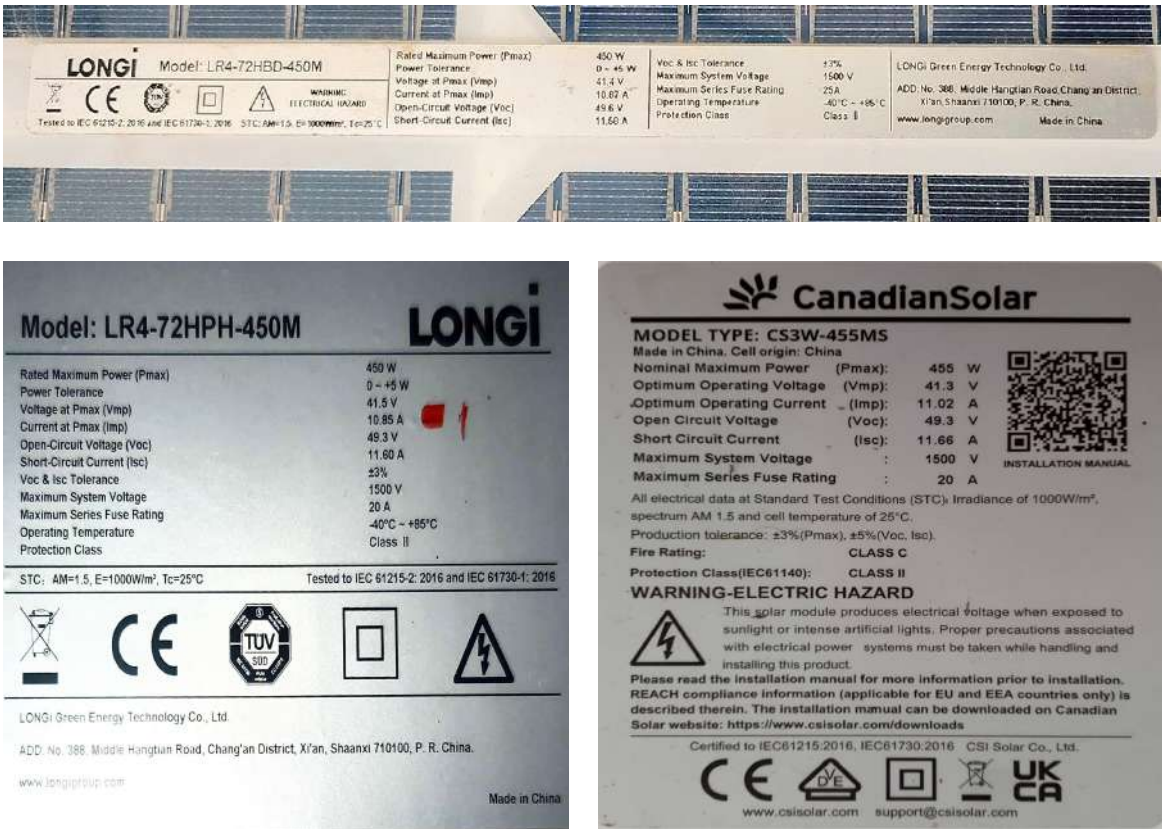
Figura 23 - Câmera fotográfica



Fonte: Elaboração própria - 2025.

- Etiquetas dos módulos fotovoltaicos ensaiados - LONGI e CANADIAN, ilustrados na Figura 23.

Figura 24 - Dados de placa dos módulos fotovoltaicos



Fonte: Elaboração própria - 2025.

4.2 Ensaio de Eletroluminescência

Inicialmente, foi realizada a verificação dos equipamentos e instalações elétricas. Em seguida foi feito o registro das especificações técnicas dos módulos a serem ensaiados. Após a análise dos dados elétricos do painel fotovoltaico, foi feita a conexão dos cabos de corrente contínua no módulo, em seguida a fonte de corrente contínua foi energizada.

Para a realização dos ensaios, foi aplicada ao módulo uma tensão de circuito aberto de valor igual ao especificado nos dados elétricos do mesmo e corrente de curto circuito variável conforme necessário. Os ensaios seguiram a norma **IEC 60904-13:2018**, que recomenda diferentes níveis de corrente injetada conforme os objetivos do ensaio:

- Corrente Total de Curto-Circuito (**I_{sc}**) - permite identificar danos críticos.
- Corrente Parcial (ex.: $0,1 \times \mathbf{I_{sc}}$) - permite detectar danos superficiais onde há falha de emissão de luz.
- Corrente Ajustada (intermediária) - permite avaliar características específicas, como variações de resistência de série.

Para uso neste trabalho, foram usados apenas painéis monocristalinos, pois devido a limitação da câmera fotográfica disponível no laboratório, a baixa emissão de EL combinada com a sensibilidade limitada do sensor, impossibilitou a obtenção de imagens EL de módulos policristalinos. De acordo com a norma **IEC 60904-13**, a câmera para ensaio de eletroluminescência deve possuir sensibilidade adequada na faixa do infravermelho próximo (800–1100 nm) para capturar emissões suficientes dos módulos fotovoltaicos.

Módulos policristalinos apresentam um maior número de defeitos estruturais, como limites de grão e descontinuidades cristalinas, que aumentam significativamente os processos de recombinação não-radiativa dos portadores de carga. Essa recombinação reduz a emissão óptica de fótons na faixa NIR, resultando em uma intensidade eletroluminescente intrinsecamente menor em comparação aos módulos monocristalinos.

Considerando os aspectos apresentados, os ensaios realizados em laboratório com a infraestrutura e equipamentos disponíveis permitiram a obtenção dos registros prévios dos módulos com qualidade aceitável, tais registros mostraram-se eficazes na avaliação das condições físicas das células dos módulos monocristalinos analisados.

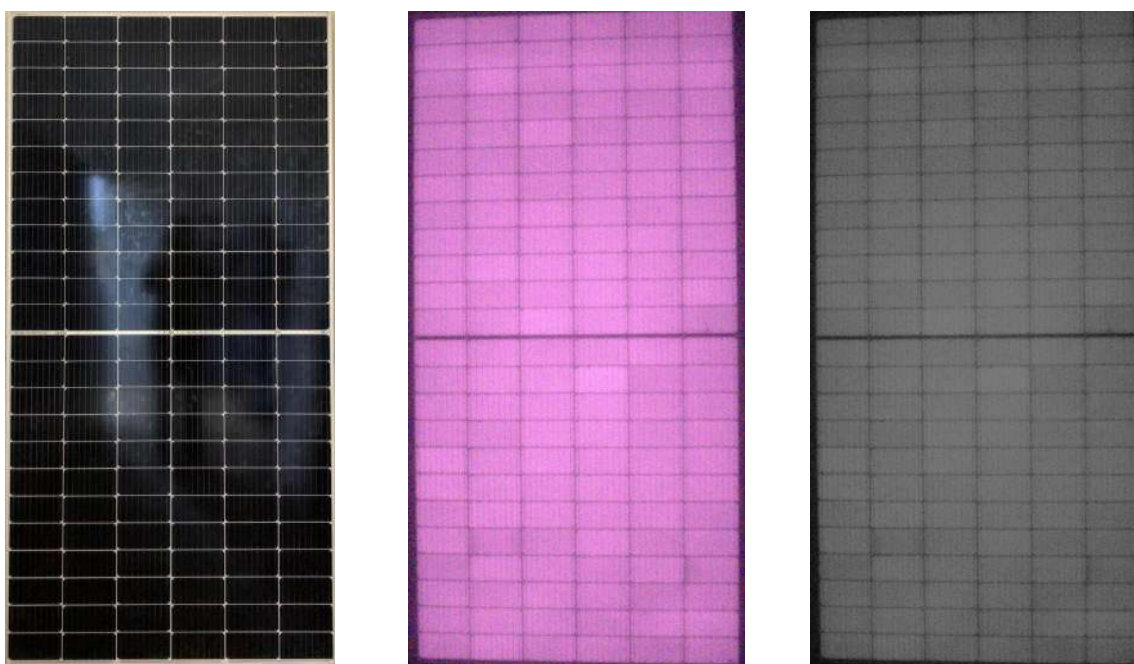
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O uso do laboratório de Eletroluminescência (EL) do Instituto Federal – Campus Palmas para realização dos ensaios possibilitou comparar a integridade dos módulos. Os registros dos ensaios seguiram a seguinte ordem, a Figura 24 exibe o módulo sem defeito aparente, a Figura 25 mostra um módulo com defeito aparente, e por fim, a Figura 26 apresenta o módulo com defeito aparente mas sem danos em suas células.

A Figura 24(a) apresenta a imagem do módulo obtida com a lente padrão da câmera, em ambiente iluminado, evidenciando os detalhes de sua condição inicial, anterior à realização dos ensaios. Ao lado, na Figura 24(b) tem-se o registro da imagem (EL) obtida em concordância com a norma **IEC 60904-13**, que define que para tal captura de imagem, deve-se ter uma câmera sensível ao infravermelho próximo (NIR), ter filtro IR-cut removido, permitir exposição longa, usar lentes de grande abertura e manter baixo ruído na captura. Por fim, na Figura 24(c) tem-se a imagem (EL) tratada, onde é possível verificar as condições internas do módulo por meio do efeito fotovoltaico que ocorre durante os ensaios.

Figura 25 - Módulo sem defeito aparente

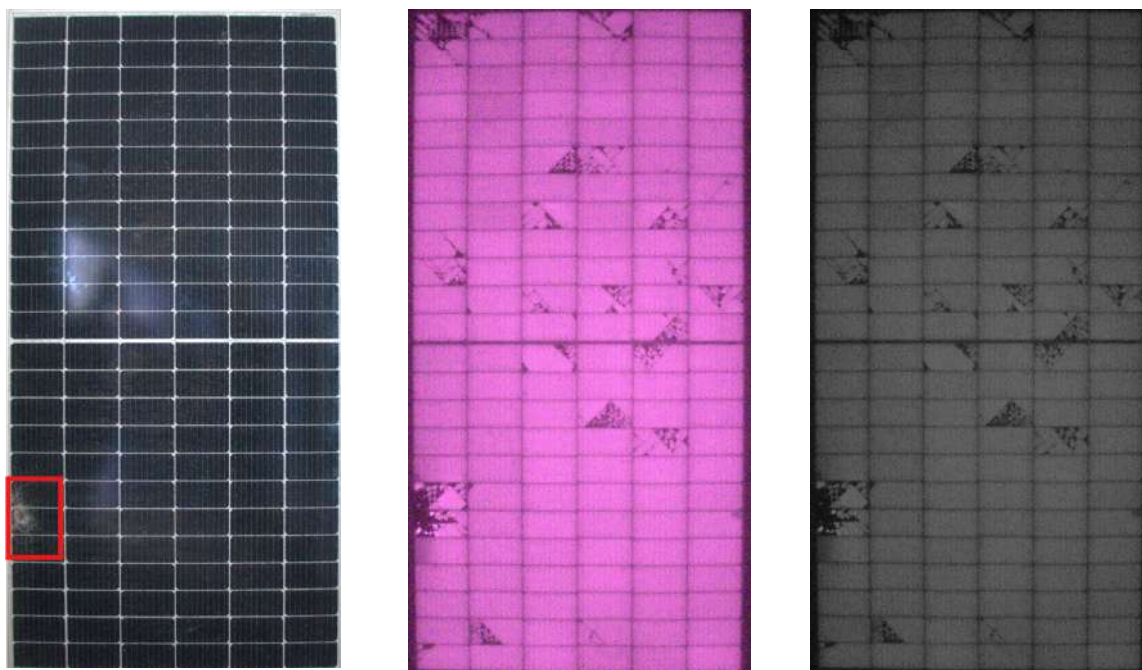
(a) Inspeção visual (b) registro fotográfico (c) imagem de eletroluminescência



Fonte: Elaboração própria - 2025

Figura 26 - Módulo com defeito aparente

(a) Inspeção visual (b) registro fotográfico (c) imagem de eletroluminescência

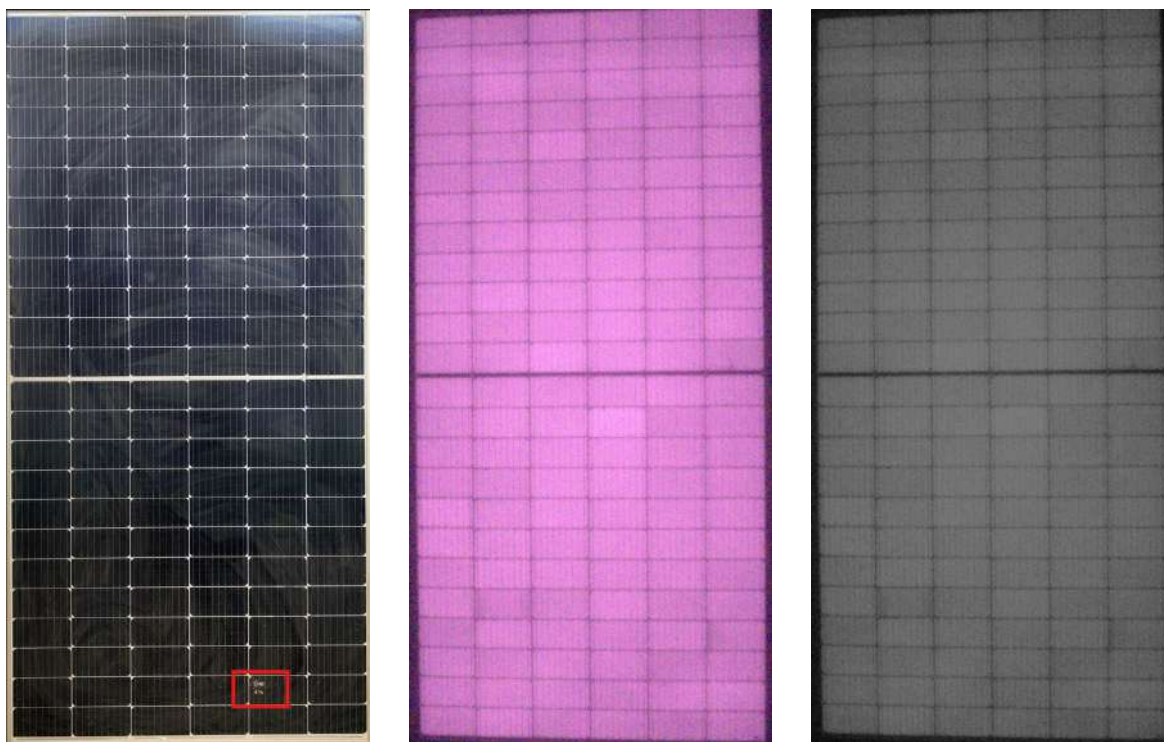


Fonte: Elaboração própria - 2025.

O segundo ensaio foi realizado com um módulo visivelmente danificado em um único ponto como é possível verificar na Figura 25(a), ao tratar as imagens é evidente que o módulo contém mais danos internos em suas células Figura 25(b) e Figura 25(c), não ficando limitado somente na região do dano notório a olho nu, mas também em outras regiões ao longo do módulo que podem ter se propagado devido ao impacto físico no mesmo.

Figura 27 - Módulo com defeito aparente mas sem danos em suas células

(a) Inspeção visual (b) registro fotográfico (c) imagem de eletroluminescência



Fonte: Elaboração própria

O terceiro ensaio de eletroluminescência apresentado nas Figura 26(b) e Figura 26(c), demonstram que, mesmo quando um módulo fotovoltaico apresenta danos visíveis em sua estrutura externa, como na Figura 26(a), isso não implica, necessariamente, que suas células estejam comprometidas, evidenciando que a integridade elétrica e funcional do módulo pode ser preservada apesar de imperfeições físicas aparentes.

6. CONCLUSÃO

No cenário atual de expansão da geração distribuída por meio da geração solar fotovoltaica e da busca por maior eficiência energética, a avaliação da confiabilidade e da durabilidade dos módulos fotovoltaicos torna-se fundamental. Nesse contexto, técnicas avançadas de inspeção, como a eletroluminescência, têm se mostrado ferramentas essenciais para identificar falhas internas que não seriam perceptíveis por simples inspeção visual. A presente pesquisa buscou contribuir para esse campo, estruturando um laboratório dedicado a ensaios de módulos fotovoltaicos e analisando sua aplicabilidade prática no diagnóstico de possíveis defeitos.

Os ensaios conduzidos neste estudo também validam a funcionalidade e efetividade do laboratório de inspeção de módulos fotovoltaicos por meio de eletroluminescência montado no Instituto Federal – Campus Palmas. A estrutura implantada demonstrou eficiência e atendeu às expectativas iniciais, possibilitando a obtenção de informações detalhadas a respeito dos módulos fotovoltaicos através de imagens EL com qualidade adequada para a análise da integridade das células que os compõem.

A partir dos ensaios realizados, os resultados evidenciaram que a integridade mecânica do módulo fotovoltaico — ou mesmo a presença de trincas e fissuras na camada de vidro especial — não constitui, por si só, um fator determinante para concluir a existência ou não de danos nas células fotovoltaicas.

A Figura 26 ilustra esse cenário: pela inspeção visual, identificou-se uma fissura na camada frontal do módulo, o que poderia indicar danos nas células. No entanto, o ensaio de eletroluminescência (EL) evidenciou que, internamente, as células não apresentavam qualquer tipo de microfissura.

Sob essa perspectiva, os resultados obtidos reforçam a premissa de que a avaliação da qualidade de um módulo fotovoltaico não deve se basear exclusivamente na inspeção visual. Mesmo em módulos que apresentam danos aparentes, a extensão dos impactos sobre as células pode ser menor — ou maior — do que o que se observa externamente, como exemplificado na Figura 25.

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho foi alcançado: a implementação de um laboratório capaz de atender às demandas institucionais no diagnóstico e avaliação de

módulos fotovoltaicos, contribuindo para a análise precisa e confiável de sua integridade estrutural e funcional.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando os limites deste estudo, tem-se como sugestões para trabalhos futuros, a realização de ensaios e testes práticos em variações reais de temperatura dos módulos com diferentes condições físicas, que possibilitem analisar a influência de ***Potential Induced Degradation (PID)*** na redução da performance dos módulos em sistemas de médio e grande porte, de forma que seja possível verificar o impacto econômico e financeiro causado a esses empreendimentos. Além disso, seria interessante investigar a correlação entre os defeitos internos detectados e a eficiência energética dos módulos ao longo do tempo, utilizando sistemas de monitoramento e processamento de dados, comparando assim a geração realizada com o módulo danificado conectado ao sistema em comparação à geração realizada de um sistema sem o módulo danificado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMPHENOL. **Qual o papel do conector em um sistema solar fotovoltaico?** 2021. Disponível em: <<https://amphenol.com.br/blog/qual-o-papel-do-conector-em-um-sistema-solar-fotovoltaico/>>. Acesso em: 29 out. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Brasil ultrapassa marca de 10 GW em micro e minigeração distribuída.** 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-ultrapassa-marca-de-10-gw-em-micro-e-minigeracao-distribuida>>. Acesso em: 14 out. 2022.

BERARDONE, I.; LOPEZ GARCIA, J.; PAGGI, M. **Analysis of electroluminescence and infrared thermal images of monocrystalline silicon photovoltaic modules after 20 years of outdoor use in a solar vehicle.** Solar Energy, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X18307199>>. Acesso em: 14 out. 2022.

CRESESB. **Energia solar – princípios e aplicações.** 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 21 out. 2022.

DEFINIRTEC. **Eletroluminescência (EL).** 2022. Disponível em: <<https://definirtec.com/eletroluminescencia-el/>>. Acesso em: 16 out. 2022.

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. **Célula fotovoltaica: tudo que você precisa saber.** 2020. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>. Acesso em: 14 out. 2022.

J.MENDO CONSULTORIA. **Projeto de assistência técnica ao setor de energia.** 2009. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P27_RT37_Perfil_do_Quartzo.pdf/50cd24f2-6f8d-44d3-59cb-91d3e509af72?version=1.0>. Acesso em: 29 out. 2022.

PORTAL SOLAR. **Como funciona o painel solar fotovoltaico (placas fotovoltaicas).** 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 14 out. 2022.

REEVISA. **String box: o que é e por que é tão importante para a geração de energia solar?** 2021. Disponível em: <<https://reevisa.com.br/post/string-box/>>. Acesso em: 29 out. 2022.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. **IEC 60904-13: Photovoltaic devices – Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules.** 1. ed. Geneva: IEC, 2018. 44 p.

ELECTRICAL ACADEMIA. **PN Junction: formation & structure.** 2019. Disponível em: <<https://electricalacademia.com/electronics/pn-junction-formation-structure>>. Acesso em: 4 ago. 2025.

GALLARDO-SAAVEDRA, Sara; HERNÁNDEZ-CALLEJO, Luis; ALONSO-GARCÍA, María del Carmen et al. **Nondestructive characterization of solar PV cells defects by means of electroluminescence, infrared thermography, I–V curves and visual tests: experimental study and comparison.** Energy, v. 205, 2020.

HARRISON, J. J. **Quartz, Tibet** [fotografia]. 2006. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quartz,_Tibet.jpg>. Acesso em: 4 ago. 2025.

STAHLKOCHER. **Monokristalines Silizium für die Waferherstellung** [fotografia]. 2004. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Monokristalines_Silizium_für_die_Waferherstellung.jpg>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SCIENCE IN SCHOOL. **What happens inside a photovoltaic cell?** Science in School, 2012. Disponível em: <<https://www.scienceinschool.org/article/2012/solar/>>. Acesso em: 8 ago. 2025.