

SISTEMA DE MEDIDAS DE ELETROLUMINESCÊNCIA E FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ESTUDOS DE DEFEITOS E PROPRIEDADES DE MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Marcus Vinícius Santos da Silva – marcus.sansil@gmail.com

Thierry Jacques Lemaire

Denis Gilbert Francis David,

Tiago Franca Paes

Victor Mancir da Silva Santana

Vagner Oliveira Santos

Instituto de Física da UFBA, Câmpus Ondina

Ernando Ferreira

Instituto Federal da Bahia, Campus Camaçari

José Alejandro Moreno Alfonzo

Coordenação de Geofísica, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. No Brasil, a segunda fonte de potência da matriz elétrica brasileira provém de instalações solares fotovoltaicas, representando aproximadamente 16% da potência instalada no país (ABSOLAR, 2023). Para garantir o controle de qualidade dos diversos componentes de uma instalação solar fotovoltaica, o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) definiu, em portaria (INMETRO, 2022), testes realizados no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) com base nas normas técnicas internacionais IEC 61215. Para os módulos, além dos procedimentos de pré-condicionamento, são realizados testes elétricos e de potência máxima. Contudo, os resultados obtidos nestes testes fornecem informações limitadas sobre a real qualidade dos módulos. Para obter dados complementares sobre o estado dos módulos fotovoltaicos, foi iniciado um estudo sobre a técnica de eletroluminescência. Essa técnica envolve a injeção de corrente elétrica no módulo (ou célula), o que provoca a emissão de radiação infravermelha na faixa de 0,9 a 1,3 micrômetros para tecnologias de silício cristalino. Este trabalho apresenta a implantação e teste de um sistema de medidas de eletroluminescência (EL) no Laboratório de Certificação de Componentes de Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica (LABSOLAR/UFBA) do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (UFBA) para estudos de defeitos e propriedades elétricas de módulos fotovoltaicos. A detecção da emissão por EL é realizada com uma câmera fotográfica de CMOS adaptada. Um programa para a análise das imagens é utilizado para identificar os tipos de defeitos e ou propriedades dos painéis.

Palavras-chave: Energia Solar, Eletroluminescência, Defeitos

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica desempenha um papel crucial na busca por fontes de energia limpa e sustentável para atender às crescentes demandas globais de eletricidade (Maka and Alabid, 2007). Painéis solares fotovoltaicos desempenham um papel central nessa transformação, convertendo a radiação solar em eletricidade de maneira eficiente e confiável. No entanto, a eficácia e a durabilidade desses painéis podem ser afetadas por uma série de fatores, incluindo defeitos intrínsecos, danos externos e conformações estruturais das células. O estudo e a identificação desses defeitos e propriedades são de suma importância para garantir o ótimo desempenho dos sistemas fotovoltaicos (Hwang *et al.*, 2021; Deitsch, S. *et al.*, 2019).

Neste contexto, as medidas de eletroluminescência surgem como uma ferramenta fundamental para a análise de defeitos e propriedades de células de painéis solares fotovoltaicos (Anwar and Abdullah, 2014; Lydia *et al.*, 2017). Além disso, é uma técnica rápida, não destrutiva e sensível a parâmetros como resistências em série e shunt, comprimento de difusão de portadores e processos de recombinação de pares. A eletroluminescência é um fenômeno que envolve a emissão de luz por materiais semicondutores quando submetidos a uma corrente elétrica (Bisquert, 2020). Ela fornece informações valiosas sobre a integridade e a qualidade dos componentes fotovoltaicos, permitindo a detecção precoce de defeitos que poderiam comprometer a eficiência e a longevidade dos painéis solares. Além disso, a eletroluminescência permite monitorar o comportamento de painéis fotovoltaicos ao longo do tempo, ajudando a prever e mitigar a degradação causada por fatores ambientais e o uso contínuo. Essa técnica desempenha um papel crucial na pesquisa, desenvolvimento e manutenção de sistemas fotovoltaicos, contribuindo para o avanço da tecnologia solar e sua implementação em larga escala.

Este artigo apresenta a implementação de um sistema de medidas de eletroluminescência aplicada à análise de características estruturais e defeitos em células dos painéis solares fotovoltaicos em testes no LABSOLAR. Aliado à técnica, uma ferramenta computacional vem sendo desenvolvida com o objetivo de automatizar a identificação dos defeitos e auxiliar na extração de dados físicos das imagens. Exploraremos a técnica, os procedimentos e os benefícios dessa importante técnica, destacando sua importância na garantia da qualidade e na otimização do desempenho dos

sistemas fotovoltaicos. Além disso, discutiremos os resultados da aplicação da técnica a uma série de painéis avaliados no LABSOLAR/UFBA..

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Mecanismo de Emissão de Eletroluminescência

A eletroluminescência (EL) é um processo de emissão de radiação produzido a partir da recombinação de pares elétron-buracos nas imediações de uma junção p-n quando esta é submetida a uma corrente em polarização direta. A reciprocidade entre a eficiência quântica externa e a emissão de radiação por recombinação de uma célula fotovoltaica torna-se uma relação fundamental na caracterização e análise de propriedades de dispositivos fotovoltaicos.

A relação entre a emissão radiativa espectral de uma célula solar, Φ_{ph}^{em} , e a eficiência quântica externa fotovoltaica, EQE_{PV} , foi inicialmente estabelecida por (Rau, 2007), que se reduz, para $V \gg k_B T/q$, à expressão:

$$\Phi_{ph}^{em}(E, V) = EQE_{PV}(E) \cdot \Phi_{ph}^{cn}(E) \cdot e^{qV/k_B T} \quad (1)$$

Em que Φ_{ph}^{cn} representa o fluxo de emissão radiativa do corpo negro, E é a energia do fóton, V é a tensão externa aplicada ao painel, k_B é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta (em K).

Essa relação descreve a conexão intrínseca entre a capacidade de um dispositivo para converter radiação solar em eletricidade (eficiência quântica externa) e sua capacidade de emitir radiação quando submetido a uma tensão V aplicada em seus terminais (emissão eletroluminescente).

Considerando que a eficiência quântica está diretamente relacionada com propriedades intrínsecas do semicondutor, como comprimento de difusão e mobilidade de portadores minoritários, por exemplo, medidas de EL traz informações sobre possíveis defeitos na estrutura da célula (Kirchartz, 2008; Helbig, 2010; Bisquert, 2020).

Além disso, sob diferentes condições de polarização, a emissão de EL pode ser relacionada às características da célula como resistência em série e resistência de shunt.

2.2 Sistema de Medidas de Eletroluminescência

Apesar do grande potencial e capacidade da técnica de medidas de eletroluminescência de acessar problemas intrínsecos das células e defeitos nos módulos, o sistema necessário para a implantação da técnica pode ser relativamente simples. Basicamente, é suficiente uma câmera fotográfica capaz de detectar a radiação infravermelha, uma fonte de alimentação elétrica capaz de fornecer a corrente de curto-circuito da célula ou do módulo, e finalmente, um ambiente escuro para evidenciar as emissões de eletroluminescência geradas pelas células.

O sistema montado no Labsolar para a geração das imagens de EL é mostrado na Fig. 1. O sistema é constituído de uma câmera fotográfica *Canon de modelo EOS Rebel SL3* (CMOS), sem filtros de bloqueio de infravermelho¹, um tripé suporte para fixação e ajuste do posicionamento da câmera, fontes de alimentação elétrica e um sistema suporte de fixação dos painéis constituídos de perfis estruturados de alumínio fixados à parede. O ambiente é completamente escurecido para favorecer a visualização da emissão das células e evitar iluminação parasita na câmera.



Figura 1 - Sistema de detecção de emissão de eletroluminescência. Câmera fixada em tripé, conjunto de fonte de alimentação elétrica e suporte fixado na parede com painel sob teste.

Os módulos sob investigação são conectados eletricamente em polarização direta com correntes ajustadas em valores percentuais da corrente de curto-circuito (I_{sc}) do módulo. Além do tempo necessário para a termalização dos

¹ A câmera Canon EOS Rebel SL3 apresenta dois filtros infravermelhos: um filtro de bloqueio de infravermelho de estado sólido, e um filtro interferencial depositado numa janela auto-limpante.

dispositivos sob teste, o tempo de exposição do sensor da câmera para cada imagem pode ser ajustado, na prática, de 4 a 30 segundos a depender das relações de razão focal (f-number) e sensibilidade do sensor (sensibilidade ISO). Todas as medidas apresentadas aqui foram adquiridas com um tempo de abertura de 15s, f-number de 4.5 e 1600 de ISO. Um detalhe interessante, é o fato da câmera ser acionada a distância (com um software instalado num smartphone), que permite adquirir imagens exatamente nas mesmas condições, com pixels coincidindo exatamente. Isto permite utilizar a figura obtida em luz ambiente para a seleção dos contornos das células, simplificando notavelmente o tratamento de dados inicial (detecção de contornos), além de evitar trepidação por acionar o botão de disparo ou o disparo programado (temporizador).

Paralelamente à geração das imagens de EL, uma câmera térmica é utilizada para avaliação da distribuição térmica nas superfícies dos painéis e comparar com a distribuição de emissão de EL.

2.3 Processamento de Imagens de Eletroluminescência

Apesar das imagens de eletroluminescência evidenciarem diversos tipos de defeitos associados às células e módulos fotovoltaicos, a interpretação sistemática e automatizada das imagens, assim como a obtenção de dados físicos extraídos de suas características requer em muitos casos o uso de ferramentas computacionais. Para atender as demandas do laboratório, um software está sendo desenvolvido. A linguagem escolhida atualmente é o C/C++ através do uso do software *Processing* que possui uma ampla biblioteca para a manipulação de imagens. No estágio atual, o software permite aplicar tratamentos de sinais para destacar as regiões eventualmente afetadas dos módulos, e também realizar a detecção de contorno de células de geometria retangular, de forma semi-automatizada. Gráficos são gerados para auxiliar a escolha de parâmetros dos tratamentos implementados e para ter acesso a uma verificação visual destas etapas. Para tais tarefas, fazemos uso de uma imagem do módulo, sob iluminação, e outra imagem de emissão por eletroluminescência

As etapas atuais de tratamentos são:

- 1) na imagem sob iluminação, seleção de 2 vértices (e de suas coordenadas) de um retângulo que contém a parte útil da imagem original, empregando um software (livre) de manipulação de imagem;
- 2) escurecimento das partes da imagem, externa ao retângulo definido acima;
- 3) aplicação de um algoritmo de aumento do contraste da imagem para destacar os contornos das células e os eventuais defeitos.

O algoritmo implementado segue os seguintes passos, considerando uma imagem colorida (RGB) representada por um vetor cujas componentes são as intensidades dos pixels representadas pela função:

$$\vec{f}(x, y) = \vec{r}(x, y) + \vec{g}(x, y) + \vec{b}(x, y) \quad (2)$$

onde x e y são as coordenadas de um pixel na imagem, e os vetores \vec{r} , \vec{g} , \vec{b} representam as intensidades nesta posição dos pixels vermelhos, verde e azul.

- Etapa 1: Correção geométrica da intensidade de cada pixel da imagem em função da posição do ponto do módulo, e do ângulo de incidência do raio luminoso:

$$r_c(x, y) = \left(\frac{R}{d}\right)^3 r(x, y), g_c(x, y) = \left(\frac{R}{d}\right)^3 g(x, y), b_c(x, y) = \left(\frac{R}{d}\right)^3 b(x, y) \text{ com } R = \sqrt{d^2 + x^2 + y^2} \quad (3)$$

onde d é a distância do sensor da câmera ao módulo, x e y são as coordenadas do ponto considerado no plano do módulo.

- Etapa 2: transformação da imagem (de N pixels) em escala de cinza:

$$\vec{f}_{r_c, g_c, b_c}(x, y) \rightarrow g(x, y) = c_r r_c(x, y) + c_g g_c(x, y) + c_b b_c(x, y) \quad (4)$$

Os 3 coeficientes, nos exemplos apresentados, foram escolhidos iguais: $c_r = c_g = c_b = 1/3$.

- Etapa 3: transformação não linear do nível de cinza, empregando uma função logística:

$$g(x, y) \rightarrow h(x, y) = \frac{1}{e^{\alpha|g(x,y)-\underline{g}|/s_g} + 1} \quad (5)$$

$$\text{com } \underline{g} = \frac{1}{N} \sum_{\text{módulo}} g(x, y), s_g = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{\text{módulo}} g^2(x, y) - N \underline{g}^2 \right)} \quad (6)$$

onde o valor do coeficiente α é fixado para ajustar o contraste da imagem tratada.

- Etapa 4: são aplicadas uma segmentação horizontal (função $h_H(y)$) e vertical (função $h_V(x)$) da imagem (função $h(x, y)$) para detectar os limites das células, incluindo a detecção dos *busbars*:

$$h_H(y) = \sum_{\text{módulo}, x} h(x, y), h_V(x) = \sum_{\text{módulo}, y} h(x, y) \quad (7)$$

A ideia implementada é que, considerando que as bordas do módulo são paralelas às bordas do sensor da câmera fotográfica, as regiões, entre as células, que não emitem, podem ser detectadas e assim podemos delimitar as bordas de cada célula.

- Etapa 5: Detecção das coordenadas dos vértices de cada célula após definição manual de 2 funções limiares que permitem marcar as regiões (retangulares) ocupadas pelas células.

- Etapa 6: Utilizando a imagem de EL, cálculo da emissão total (em unidade arbitrária, ELi) de cada célula da imagem em escala de cinza:

$$EL_i = \sum_{célula\ i} g(x, y) \quad (8)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma série de painéis fotovoltaicos em diferentes condições de integridade foram ensaiados a fim de testar tanto o sistema de medidas de EL quanto o processamento das imagens e assim, confrontar os resultados das medidas de EL com medidas de eficiência realizadas num simulador solar flash (modelo High^{Light} LMT da empresa Pasan).

Para ilustrar os tipos de imagens capturadas, são apresentadas na Fig. 2 imagens de EL de 3 módulos de mesmo modelo. A Fig. 2-A ilustra a configuração dos módulos durante as medições. Na Fig. 2-B, podemos observar defeitos de algumas células (regiões escuras aparentemente desconectadas), enquanto a Fig. 2-C não apresenta defeitos. A Fig. 2-D representa uma situação intermediária em relação à visualização de defeitos. O interessante é que os 3 módulos apresentem curvas I-V sem anomalias, e têm desempenhos compatíveis com o previsto no datasheet do fabricante.

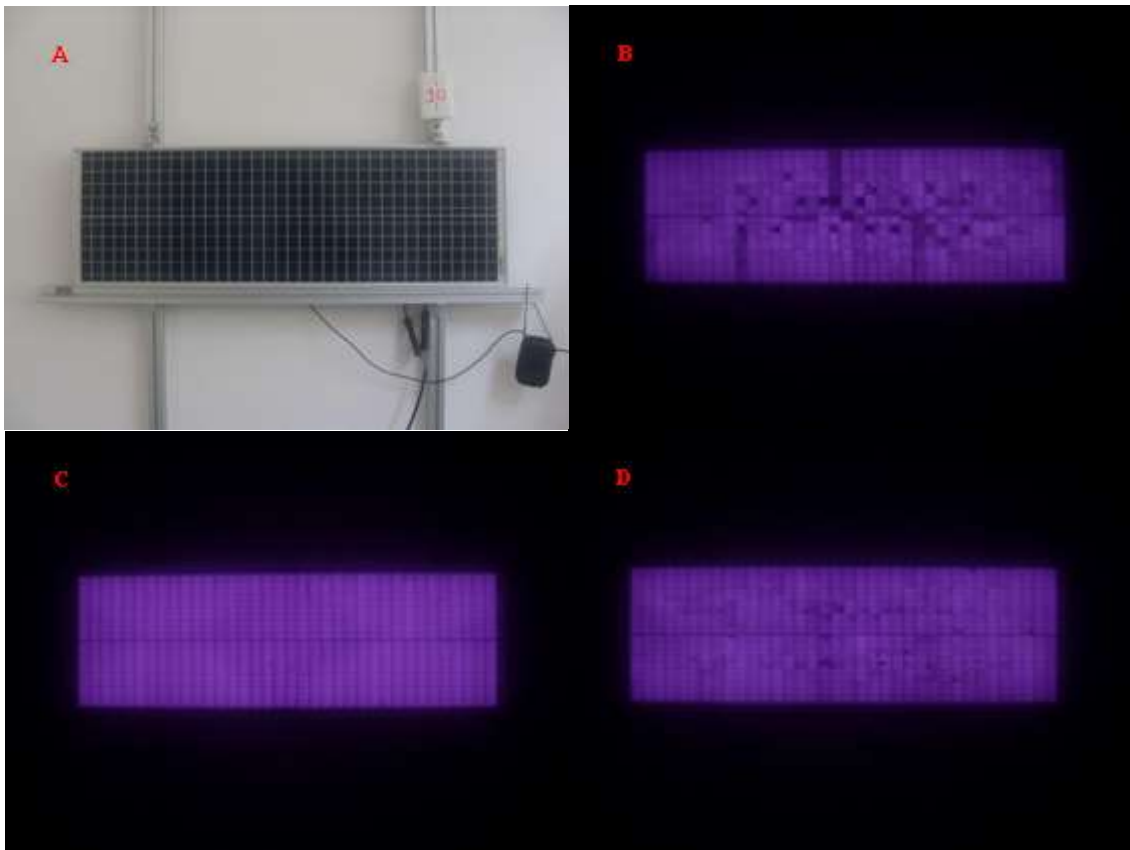


Figura 2 - Imagem da fixação dos módulos e imagens de EL de três diferentes painéis nas mesmas condições de medidas.

A seguir, apresentamos figuras oriundas do tratamento de imagem (Fig.4 e Fig. 5) para um módulo de 20W de potência nominal, e cuja potência gerada em condições padrões é de 18,7 W (ver curva I-V na Fig.3).

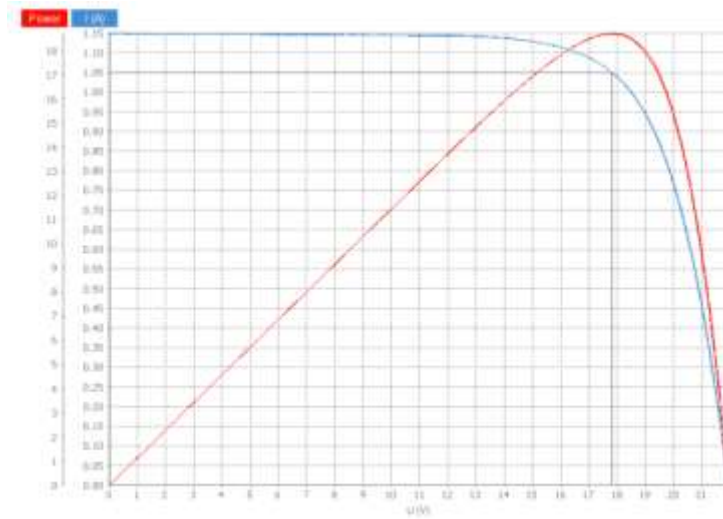


Figura 3: Curva I-V obtida com Simulador Solar Flash, do módulo, objeto de estudo com a técnica de Eletroluminescência.

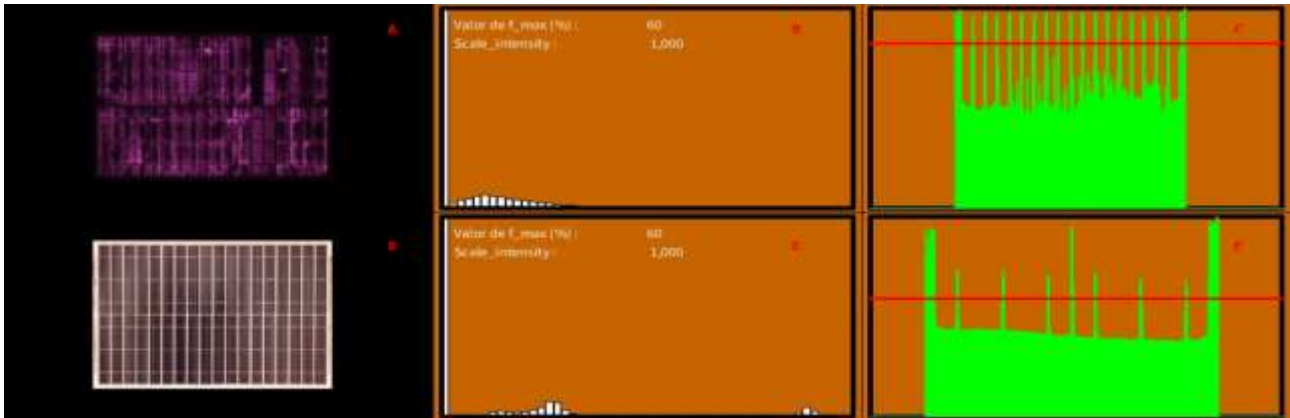


Figura 4: Figura gerada pelo software para um módulo de 2 linhas de 18 células (com 3 BusBar horizontais por célula), até a etapa 4. Imagem de EL original RGB (A), figura B, o seu histograma em escala de cinza (eixo horizontal variando de 0 a 255, bin = 5); imagem do módulo sob iluminação (D), com seu histograma na figura E a (eixo horizontal variando de 0 a 255, bin = 5); Na etapa 4, função $h_H(y)$ (figura C) e função $h_V(x)$ (figura F). As linhas vermelhas representam as funções limiares que permitem definir as bordas das células.

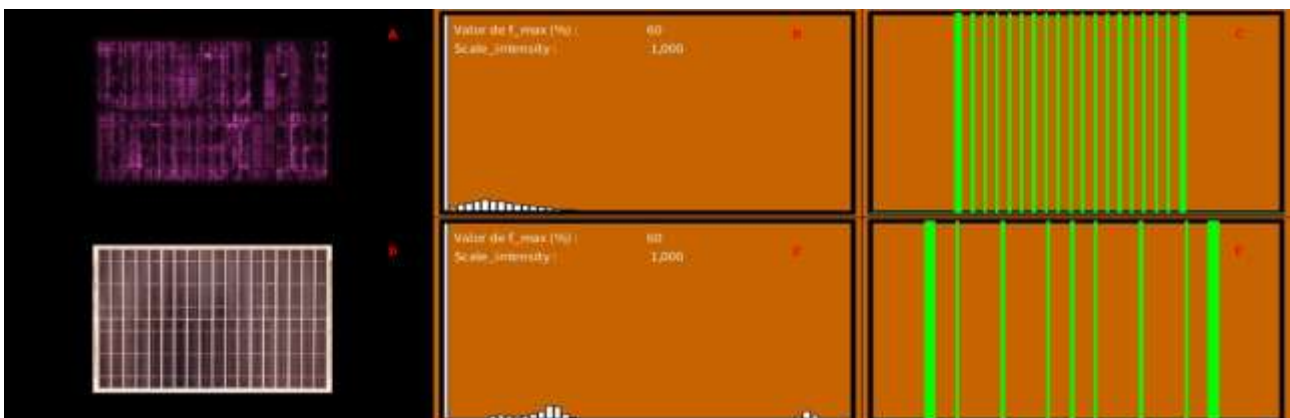


Figura 5: Figura gerada pelo software para o mesmo módulo da figura anterior, depois de finalizada a etapa 5, com as funções $h_V(x)$ e $h_H(y)$ reescaladas (figuras C e F), permitindo enxergar os limites verticais e horizontais das células. As linhas verticais (em verde) indicam os espaços entre células e os busbar (na figura F).

Podemos observar que efetivamente foram detectadas em cada um dos 2 strings horizontais, 18 células. A Fig. 6 sintética, reproduzindo as regiões do módulo ocupadas por células, mostra que a detecção de contorno das células é satisfatória e deve permitir uma avaliação satisfatória da emissão por EL de cada célula.

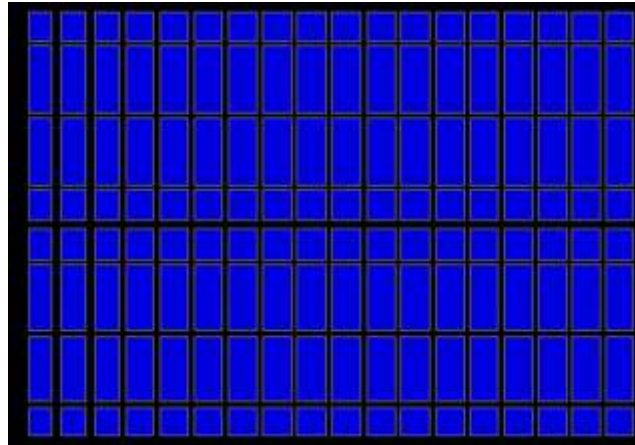


Figura 6: imagem gerada por um programa escrito com Processing representando a configuração do módulo com a distribuição de células (em azul) e de busbar detectados.

A Fig. 7 fornece a emissão relativa de cada célula e podemos observar que as células n° 25 e n° 33 emitem relativamente pouco quando se compara com as emissões das outras células. Isto pode ser visto nas Figs. 4 e 5 (a numeração segue a regra seguinte: a célula n° 1 está no canto superior esquerdo do módulo e a célula n° 2 está no canto inferior esquerdo. As células da linha superior têm numeração ímpar).

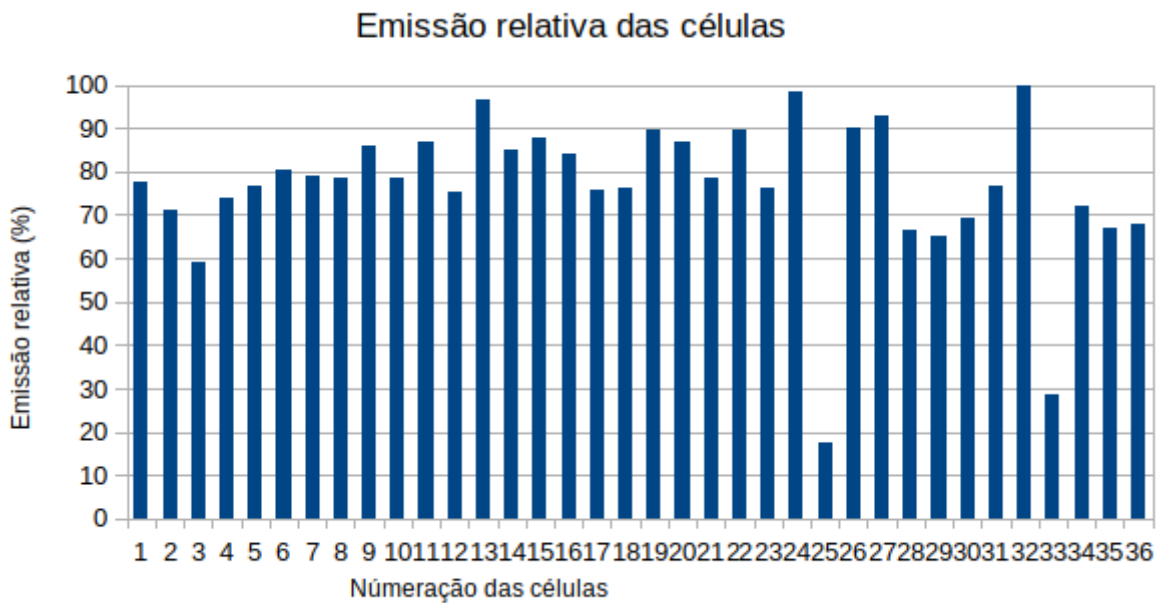


Figura 7: Histograma de emissão relativa (em unidade arbitrária numa escala de 0 a 100% do máximo de emissão) de cada uma das 36 células do módulo da Fig. 4. Observamos que a célula n°32 é aquela que mais emite.

Imagens no infravermelho permitem complementar informações disponíveis nas imagens de EL. Podemos observar que a célula n°25 (região em amarelo, menos quente) quase não está emitindo nesta região como visualizado na imagem de EL.

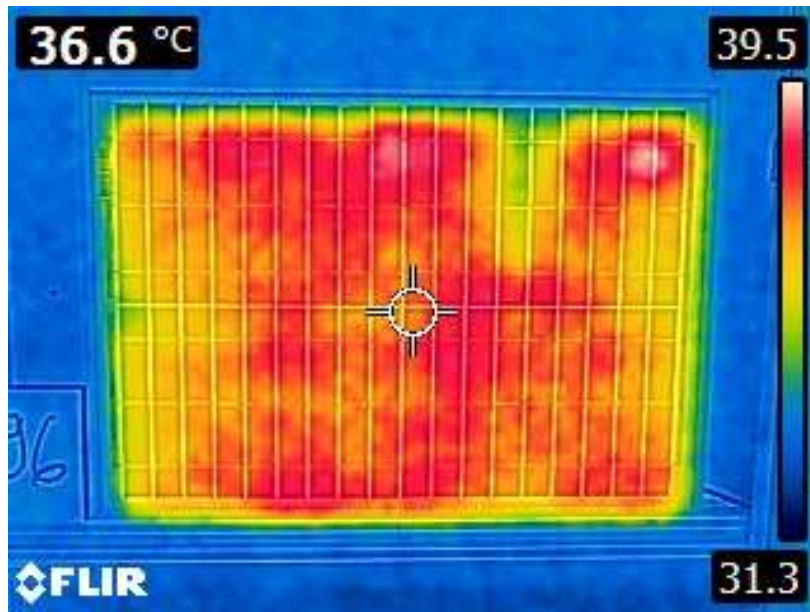


Figura 8: Imagem no infravermelho do módulo submetido à uma corrente igual a I_{sc} durante a captura da imagem de EL.

Numa próxima versão do software, serão implementados métodos de reconhecimento de defeitos e serão realizadas estatísticas quantificando o percentual de presença de cada defeito. Também está previsto o estudo experimental da distribuição de tensão fornecida por cada célula, seguindo o modelo de Potthoff (2009). Outros algoritmos poderão ser implementados em função das necessidades aparecendo no estudo da técnica de Eletroluminescência.

4. CONCLUSÕES

Dentro do conjunto de técnicas que permitem caracterizar o funcionamento e a qualidade de um módulo fotovoltaico, a técnica de Eletroluminescência apresenta diversas vantagens quando implementada em laboratório: 1) ela envolve um aparato experimental relativamente barato; 2) é relativamente rápida para executar; 3) permite visualizar claramente a emissão de cada região de um módulo, e portanto seus defeitos. No intuito de melhor entender os impactos de defeitos observados na imagem de EL de um módulo, com seu desempenho presente e futuro, o LABSOLAR conta com uma linha de pesquisa para verificar e explorar a relação entre modelos teóricos físicos estabelecidos que descrevem a emissão EL e a conversão fotovoltaica, a fim de relacionar o desempenho de um módulo, considerando a curva I-V do mesmo, com características da imagem de EL. Concluímos que a técnica de Eletroluminescência, apesar do seu uso cada vez mais frequente em laboratório e instalações solares fotovoltaicas, precisa de um investimento em pesquisa para ser melhor aproveitada nas caracterizações de módulos.

Agradecimentos

Agradecemos ao Estado da Bahia, cujo apoio ao LABSOLAR é dado através da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação (SECTI) e da Secretaria de Infraestrutura (SEINFRA) (SEINFRA).

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/brasil-supera-29-gw-de-potencia-instalada-em-energia-solar-informa-absolar/> (acessado em 20/11/2023);
- Anwar, S.A., Abdullah, M.Z., Micro-crack detection of multicrystalline solar cells featuring an improved anisotropic diffusion filter and image segmentation technique, EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2014.
- Bisquert, J., 2020. The Physics of Solar Energy Conversion. Taylor & Francis Group.
- Deutsch, S. *et al.*, Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images Solar Energy, 185, 455-468. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.067>
- Hwang, M.-H.; Kim, Y.-G.; Lee, H.-S.; Kim, Y.-D.; Cha, H.-R. A Study on the Improvement of Efficiency by Detection Solar Module Faults in Deteriorated Photovoltaic Power Plants. Appl. Sci. 2021, 11, 727. <https://doi.org/10.3390/app11020727>
- Helbig, A. *et al.*, “Quantitative electroluminescence analysis of resistive losses in Cu(In, Ga) Se₂ thin-film modules,” Sol. Energy Mater. Sol. Cells 94(6), 979–984 (2010).

INMETRO Ordinance N°140/2022;

Kirchartz, T. *et al.*, “Internal voltages in GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells determined by electroluminescence measurements,” *Appl. Phys. Lett.* 92(12), 123502 (2008), <http://dx.doi.org/10.1063/1.2903101>.

Lydia, M.D., Sindhu, K.S., Gagan, K., Analysis on solar panel crack detection using optimization techniques, *Journal of Nano-and Electronic Physics* 9 (2) (2017), 2004e1.

Maka, A. O. M., Alabid, J. M., Solar energy technology and its roles in sustainable development, *Clean Energy*, Volume 6, Issue 3, June 2022, Pages 476–483, <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>

Potthoff, T., Bothe, K., Eitner, U., Hinken, D., Köntges M., 2010. Detection of the voltage distribution in photovoltaic modules by electroluminescence imaging. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*; vol. 18, pp. 100–106;

Pratt, L., Govender, D., Klein, R., Defect detection and quantification in electroluminescence images of solar PV modules using U-net semantic segmentation, *Renewable Energy*, Volume 178, 2021, 1211-1222.

Rau, U. Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells. *Physical Review B* 2007, 76, 085303.

ELECTROLUMINESCENCE MEASUREMENT SYSTEM AND COMPUTATIONAL TOOL FOR STUDIES OF DEFECTS AND PROPERTIES OF PHOTOVOLTAIC SOLAR MODULES

Abstract. *In Brazil, the second power source in the Brazilian electrical matrix comes from photovoltaic solar installations, representing approximately 16% of the installed capacity in the country (ABSOLAR, 2023). To ensure quality control of the various components of a photovoltaic solar installation, the National Institute of Metrology, Quality, and Technology (INMETRO) defined, in a ordinance (INMETRO, 2022), tests conducted under the Brazilian Labeling Program (PBE) based on international technical standards IEC 61215. For the modules, in addition to pre-conditioning procedures, electrical and maximum power tests are performed. However, the results obtained in these tests provide limited information about the actual quality of the modules. To obtain complementary data on the condition of photovoltaic modules, a study on the electroluminescence technique was initiated. This technique involves injecting electrical current into the module (or cell), causing the emission of infrared radiation in the range of 0.9 to 1.3 micrometers for crystalline silicon technologies. This work presents the implementation and testing of an electroluminescence (EL) measurement system at the Laboratory of Certification of Components of Photovoltaic Solar Energy Systems (LABSOLAR/UFBA) of the Physics Institute of UFBA for studies of defects and electrical properties of photovoltaic modules. Detection of EL emission is carried out with an adapted CMOS photographic camera. A program for the analysis of images is used to identify the types of defects and/or properties of the module.*

Keywords: *Solar Energy, Electroluminescence, Defects*