

## A importância da eletroluminescência no controle de qualidade das instalações fotovoltaicas

Amanda Alvim\*. Gilberto Figueiredo\*.

\*Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, RJ (e-mail: amandaalvim@id.uff.br; gilbertofigueiredo@id.uff.br)

---

**Abstract:** This study addresses the importance of image assessment of photovoltaic generators, be it centralized or distributed generation, emphasizing the relevance of the electroluminescence (EL) technique for supporting the quality control of photovoltaic installations. The paper provides examples of occurrences that required product quality evaluations using EL technique to identify detectable and evaluable defects, thus demonstrating the efficacy of EL image analysis in characterizing defects in photovoltaic modules. The technique allows for the identification of regions with low efficiency or susceptible to future failures, contributing to enhance the quality and performance of photovoltaic systems.

**Resumo:** O trabalho aborda importância da avaliação por imagens de geradores fotovoltaicos, seja na geração centralizada ou na geração distribuída, destacando a relevância da técnica de eletroluminescência no suporte ao controle de qualidade dessas instalações. São apresentados exemplos de ocorrências que exigiram avaliações da qualidade do produto, utilizando a técnica de eletroluminescência (EL), para identificar defeitos passíveis de detecção e avaliação. Os resultados indicam a eficácia da análise das imagens em EL para caracterização de defeitos em módulos fotovoltaicos, uma vez que a técnica permite identificar áreas com baixa eficiência ou com riscos de falhas futuras, contribuindo para a melhoria da qualidade e desempenho desses sistemas.

**Keywords:** *Electroluminescence; Photovoltaic modules; Quality control; Defects; Photovoltaic cell.*

**Palavras-chaves:** *Eletroluminescência; Módulos fotovoltaicos; Controle de qualidade; Defeitos; Célula fotovoltaica.*

---

### 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento do número de instalações fotovoltaicas em todo o mundo, é fundamental garantir a confiabilidade das mesmas, e o controle de qualidade dos módulos fotovoltaicos (FV) desempenha um papel substancial nesse sentido, assegurando que estes produzam a energia elétrica esperada durante sua vida útil e reduzindo os riscos de falhas e defeitos. As relações contratuais entre os proprietários de instalações fotovoltaicas e as concessionárias de energia elétrica podem variar de acordo com o modelo de geração. Em sistemas de geração distribuída, os proprietários dos sistemas fotovoltaicos são responsáveis pela qualidade do sistema, enquanto na geração centralizada, investidores podem exigir um controle mais rigoroso por parte dos fabricantes de módulos fotovoltaicos. Desse modo, é relevante ressaltar que tanto nas linhas de produção das células fotovoltaicas quanto nos procedimentos de testes realizados pelos órgãos responsáveis pela avaliação da conformidade, é crucial o controle de qualidade das mesmas.

Os ensaios de qualificação de módulos FV previstos na IEC61215 envolvem caracterizações elétricas (curva I-V,  $R_{iso}$ , etc.), térmicas ( $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\gamma$ ) e mecânicas associadas a diferentes

condições operacionais (calor úmido, condições extremas, PID, etc.). Alguns destes ensaios estão previstos nos Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) de equipamentos FV previstos na Portaria nº 140 do INMETRO. Já os ensaios de geradores a nível de sistema estão previstos na NBR 16274, onde geradores podem ser caracterizados através de sua curva I-V ou da avaliação de desempenho, além de testes operacionais pontuais e por imagens térmicas.

No caso de grandes usinas de geração centralizada, o controle de qualidade dos geradores fotovoltaicos tem um papel importante no suporte a garantias técnicas e financeiras para garantir os índices de produtividade do sistema, previstos em contrato (De la Parra et al. 2017). Esse controle é realizado de forma sistemática nos procedimentos periódicos de operação e manutenção, e inicialmente na recepção do material. A fim de garantir a confiabilidade e eficiência desses sistemas, ensaios não destrutivos são realizados com o intuito de aferir as características elétricas dos módulos fotovoltaicos. Dentre as técnicas disponíveis, destaca-se a eletroluminescência (EL), amplamente utilizada na tipificação das células fotovoltaicas devido a sua exatidão e praticidade na detecção de danos mecânicos e elétricos nas células (Ebner et al. 2013; Mchedlidze et al. 2016). Portanto, detectando defeitos que

poderiam ser negligenciados na análise das características elétricas do módulo e que são imperceptíveis ao olho humano, a técnica de EL para obtenção de imagens torna-se uma importante aliada na garantia da qualidade dos sistemas fotovoltaicos, complementando as análises realizadas por meio da curva I-V.

## 2. EMISSÃO ELETROLUMINESCENTE

Ao contrário do princípio básico da conversão de luz em energia elétrica nos dispositivos fotovoltaicos, para a emissão eletroluminescente ocorre o processo inverso: a energia elétrica é convertida em radiação eletromagnética na faixa do infravermelho, com comprimentos de onda entre 900 nm e 1300 nm, não podendo ser vista a olho nu. O processo ocorre por meio da excitação de elétrons em um material semiconductor e a intensidade da emissão eletroluminescente está relacionada com a quantidade de portadores minoritários da base, em células convencionais de silício cristalino de base tipo p, uma vez que a emissão está associada à recombinação radiativa entre as bandas energéticas do silício dopado (Fuyuki et al. 2007). A emissão também é proporcional à capacidade da junção em separar elétron de lacunas, consequentemente, proporcional à tensão da célula fotovoltaica. A eficiência da emissão eletroluminescente depende das propriedades do material semiconductor, da dopagem dos materiais tipo p e n, e da geometria da junção pn.

Para capturar imagens de eletroluminescência, são utilizadas câmeras com sensores sensíveis ao comprimento de onda da emissão EL. Para aquisição dessas imagens, é necessário polarizar o módulo fotovoltaico com uma fonte em corrente contínua capaz de controlar tanto a corrente quanto a tensão, permitindo que o módulo seja polarizado em condições específicas, sendo o procedimento de ensaio descrito por Alvim e Figueiredo (2022). Recomenda-se realizar a medição com quatro fios para minimizar as perdas ôhmicas no cabeamento e garantir uma medição precisa da tensão. Também é importante remover completamente qualquer contaminação superficial do dispositivo e realizar a medição preferencialmente em um local sem iluminação. O circuito deve ser polarizado diretamente, permitindo que a corrente flua pelo circuito por meio das resistências e da junção.

## 3. MODOS DE FALHA PASSÍVEIS DE DETECÇÃO

Devido ao processo de fabricação, transporte e instalação dos módulos fotovoltaicos, além da exposição aos fatores ambientais, como por exemplo as cargas de vento, esses módulos podem apresentar diferentes tipos de defeitos, levando a uma redução no desempenho do sistema. A detecção precoce dessas falhas é essencial para garantir a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Nesse sentido, a IEC TS 60904-13 (2018) estabelece diretrizes para a captura e processamento de imagens em eletroluminescência de módulos FV, além de fornecer orientação para interpretação dos tipos de defeitos passíveis de detecção.

No anexo C da referida norma, é descrito um método para quantificar fissuras em células fotovoltaicas que podem ser usadas como ferramenta de diagnóstico para avaliar danos em módulos FV. Estas são categorizadas em três tipos, sendo eles: Modo A, Modo B, e Modo C. O modo A corresponde a microfissuras que aparecem discretamente em imagens de EL, e que não afetam a área ativa da célula ou causam perdas significativas. Já no modo B, as fissuras delimitam regiões parcialmente desconectadas eletricamente onde, ao aplicar a corrente de curto circuito na polarização do módulo, é possível observá-las facilmente devido ao alto contraste resultante nessas regiões. Entretanto, injetando 10% da corrente de curto circuito, o contraste reduz significativamente. As fissuras do modo C demarcam regiões consideravelmente desconectadas eletricamente do circuito elétrico do módulo, de modo que o alto contraste nesses locais é tangível, tanto com imagens obtidas com a injeção da corrente de curto circuito quanto com apenas 10% da mesma. Assim, esse tipo de defeito causa perdas expressivas de desempenho e podem levar à polarização inversa das células fotovoltaicas e a pontos quentes (*hot spots*). É importante destacar que a ocorrência de *hot spots* pode prejudicar a vida útil do módulo e, em casos extremos, causar danos permanentes. Na Fig. 1 são mostrados os modos de classificação das fissuras.

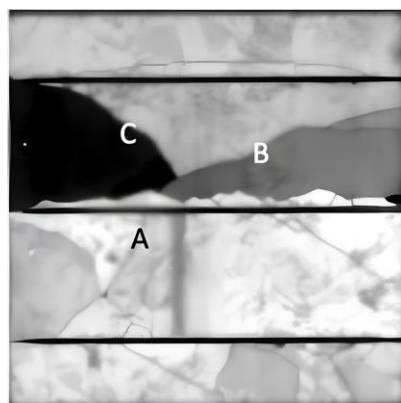


Fig. 1 Imagem EL de uma célula FV com os três modos de fissuras. Adaptado de IEC (2018).

Com base na compreensão do funcionamento da eletroluminescência, levando em consideração os efeitos da resistência em série no sinal de EL, onde áreas com resistência reduzida apresentam maior sinal de EL devido ao maior número de portadores injetados, bem como a influência da resistência *shunt* na densidade de portadores minoritários, o Anexo D da IEC TS 60904-13 (2018) oferece parâmetros para a análise qualitativa dos defeitos encontrados em módulos fotovoltaicos. Dessa forma, foram selecionados os defeitos mais comuns encontrados nas análises das imagens em eletroluminescência apresentadas neste artigo. São mostrados exemplos de imagens em EL de células fotovoltaicas afetadas pelos modos de falha explicados nas subseções a seguir. Para cada caso são apresentadas imagens contidas na normativa de referência, como também são mostradas imagens registradas pelos próprios autores, obtidas de módulos FV analisados em laboratório.

### 3.1 Inexistência, ruptura ou delaminação dos barramentos secundários.

A inexistência, ruptura ou delaminação dos barramentos secundários (confirmado por inspeção visual), geralmente são estáveis, sendo possível identificar sua influência a partir da eficiência da célula. As finas tiras metálicas (*fingers*) conectadas perpendicularmente aos barramentos podem continuar a degradar com o tempo, reduzindo o desempenho da célula e, conseqüentemente, do módulo FV. A Fig. 2 mostra exemplos.

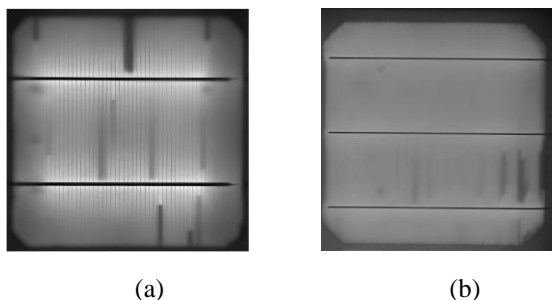


Fig. 2 Células apresentando falha no barramento secundário: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

### 3.2 Silício com vida útil reduzida.

Durante o processo de fabricação das células FV, impurezas indesejáveis podem ser introduzidas no silício, resultando em redução da vida útil das células. Esse tipo de falha geralmente é estável ao longo do tempo, podendo ser observada em regiões específicas das lâminas de silício (*wafers*) que contém defeitos consideráveis ou concentrações de impurezas, conforme apresentado na Fig. 3.

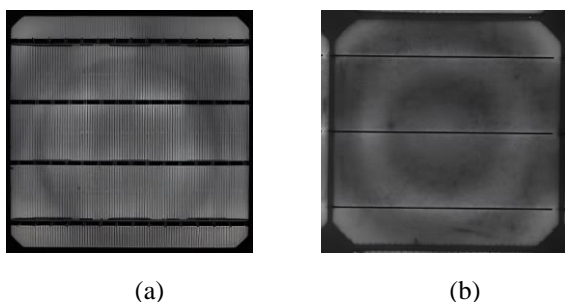


Fig. 3 Células formadas por silício com vida útil reduzida: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

### 3.3 Aderência das lâminas (*wafers*) no processo de fabricação.

Além da possibilidade de inserção de impurezas no silício durante a fabricação das células, a aderência de duas ou mais lâminas de silício pode ocorrer durante esse processo, resultando na formação de junções impróprias que afetam a eficiência do módulo fotovoltaico. Esse defeito apresenta baixa resistência de contato, comumente mantendo-se imutável ao longo do tempo, e pode ser observado em regiões específicas, conforme mostrado na Fig. 4.

### 3.4 Contaminação da célula ou do wafer.

Essas falhas são ocasionadas por contaminação localizada, que ocorre devido à presença de partículas estranhas resultantes do manuseio inadequado durante a produção, gerando marcas de abrasão e/ou arranhões, originando áreas com baixo sinal de eletroluminescência. A contaminação provoca um *shunt* localizado, que se manifesta como uma diminuição na resistência elétrica em um ponto específico, reduzindo a eficiência da célula fotovoltaica, como pode ser visto na Fig. 5.

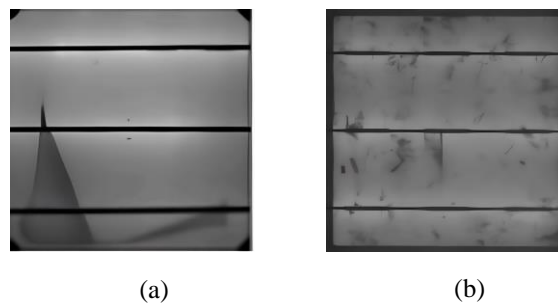


Fig. 4 Células apresentando falha na aderência de lâminas: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

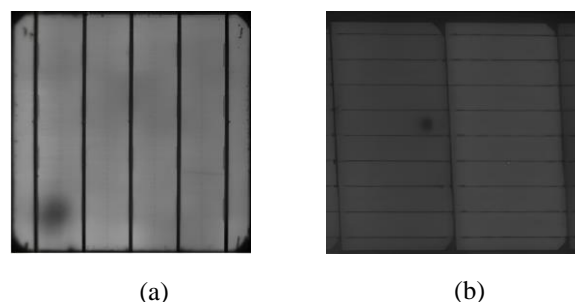


Fig. 5 Células contaminadas: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

### 3.5 Interconexão inadequada na interligação das células.

Defeito comum em módulos fotovoltaicos, causado pela elevada resistência em série na metalização de interligação das células, conhecida como *ribbons*. Isso ocorre devido a conexões inadequadas entre esses condutores, resultando em altas correntes forçadas nas metalizações interligadas adequadamente, aumentando a probabilidade de formação de pontos quentes (*hot spots*) e, conseqüentemente, falha do módulo. A Fig. 6 ilustra como esse tipo de defeito é detectável em imagens em EL.

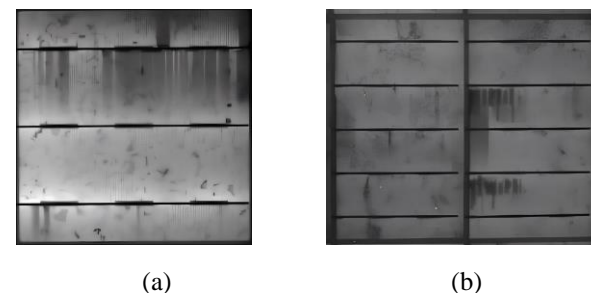


Fig. 6 Aglutinação dos condutores de interligação das células: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

### 3.6 Fragmentação da célula.

A fragmentação nas células implica no isolamento de algumas regiões, as quais apresentam linhas de fronteiras sem emissão EL, como pode ser visto na Fig. 7. Devido à inexistência de caminhos alternativos para a passagem da corrente elétrica, pode ocorrer o surgimento de pontos quentes.

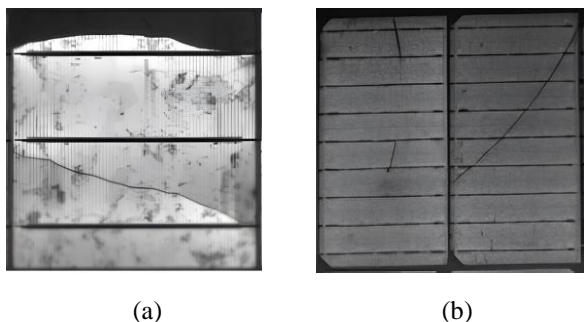


Fig. 7 Fissuras registradas em células FV: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

### 3.7 Soldagem inadequada da metalização

A soldagem inadequada dos condutores de interligação das células no processo de produção gera um aumento da resistência em série. Esse aumento, por sua vez, pode levar ao surgimento de pontos quentes. É perceptível a diferença de contraste entre as regiões da célula com soldagem adequada e inadequada nas imagens apresentadas na Fig. 8.

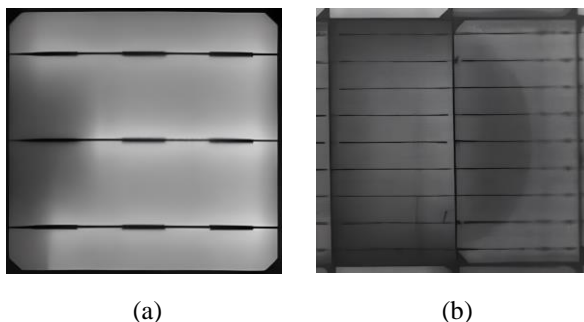


Fig. 8 Células apresentando soldagem inadequada da metalização: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

### 3.8 Interação entre a soldagem e a metalização.

Durante o processo de fabricação das células fotovoltaicas, a soldagem inadequada dos condutores de interconexão (*ribbons*) pode causar o desprendimento da camada metálica aplicada na célula, conhecida como metalização (Hsieh et al. 2013). Esse desprendimento, chamado delaminação, pode piorar com o tempo, especialmente em ambientes úmidos, devido à entrada de umidade na parte ativa das células. A Fig. 9 mostra o padrão detectável do defeito em imagens EL.

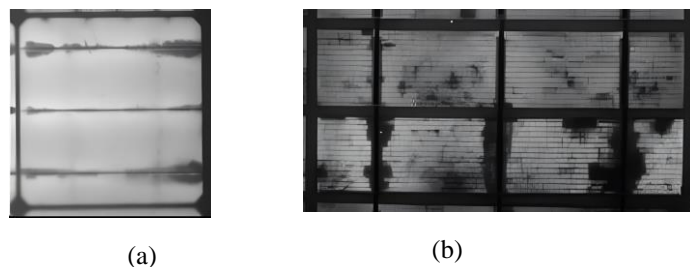


Fig. 9 Presença de umidade nas células devido à delaminação: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

### 3.9 Defeitos locais na rede cristalina (*shunts*)

A resistência *shunt* é um parâmetro que indica a resistência à passagem de corrente elétrica pelas discontinuidades existentes na rede cristalina da junção p-n. Uma baixa resistência *shunt* fornece um caminho alternativo para os portadores de carga, reduzindo assim a quantidade de corrente que flui através da junção. Como resultado, esses caminhos alternativos são observáveis nas imagens EL devido ao seu alto contraste. O surgimento desses desvios localizados é frequentemente atribuído a defeitos de fabricação e tendem a se degradar ao longo do tempo, gerando pontos quentes. A Fig. 10 mostra exemplos desse tipo de falha.

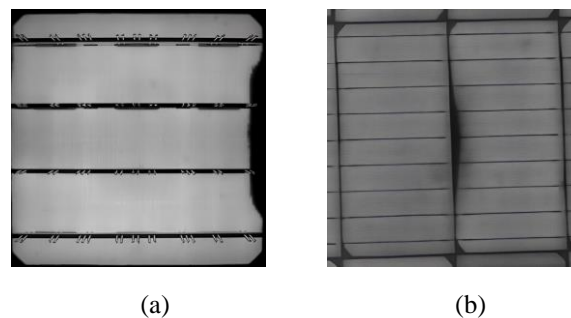


Fig. 10 Locais sem emissão EL causados pela baixa resistência shunt: (a) Adaptado de IEC TS 60904-13 (2018) e (b) autores.

## 4. EXEMPLOS DE CONTROLE DE QUALIDADE

O controle de qualidade é mais rigoroso em grandes usinas, com previsões contratuais e medições de terceiros sendo realizadas em amostras de lotes antes do envio dos módulos e também no recebimento dos mesmos no local. Apesar disso, podem ocorrer desvios que exigem avaliações posteriores. No mercado de geração distribuída esse controle é mais escasso, sendo que os fabricantes direcionam para esse mercado os módulos com células que não passariam em um controle de qualidade mais rígido. Além disso, armazenamento e transporte precários podem acentuar o aparecimento de defeitos, como fissuras, e o consumidor final muitas vezes não possui suporte técnico adequado para a verificação.

Nesta seção são apresentados exemplos de ocorrências que necessitaram de avaliações de controle de qualidade do produto utilizando eletroluminescência para apontar defeitos

passíveis de detecção e avaliação. Não é escopo deste trabalho a abordagem quantitativa, mas uma avaliação qualitativa de acordo com a normativa vigente.

#### 4.1 Avaliação de ocorrência de PID

A Degradação Induzida pelo Potencial (PID) é um fenômeno de degradação que ocorre devido ao deslocamento de cargas estáticas para a parte ativa das células fotovoltaicas como resultado do campo elétrico que há entre a célula e a moldura aterrada. A degradação pode afetar diferentes topologias de células de módulos fotovoltaicos, tendo consequências associadas a cada uma. No caso do silício cristalino e para células com base tipo p, o acúmulo de sódio na camada antirreflexiva e difusão na rede cristalina da junção pn devido ao campo elétrico existente entre a moldura aterrada e as células localizadas em potenciais negativos do gerador fazem com que a junção perca suas propriedades gradativamente, afetando principalmente a resistência *shunt* das células afetadas (Naumann et al. 2014).

A Fig. 11 mostra a avaliação por imagens em EL de uma série FV instalada em campo, composta de módulos FV de silício cristalino com células de base p, que apresentava indicativo de PID após aferições elétricas no local. O efeito encontrado nas imagens confirmou a hipótese, uma vez que o padrão de escurecimento das células segue a ocorrência de PID, além de que os módulos afetados estavam eletricamente localizados na série de forma que os mesmos ficavam polarizados negativamente durante a operação do sistema.

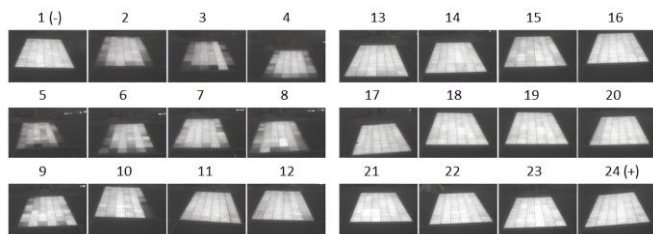


Fig. 11 Gerador FV apresentando sinais de PID. Adaptado de Martínez-Moreno et al. (2018).

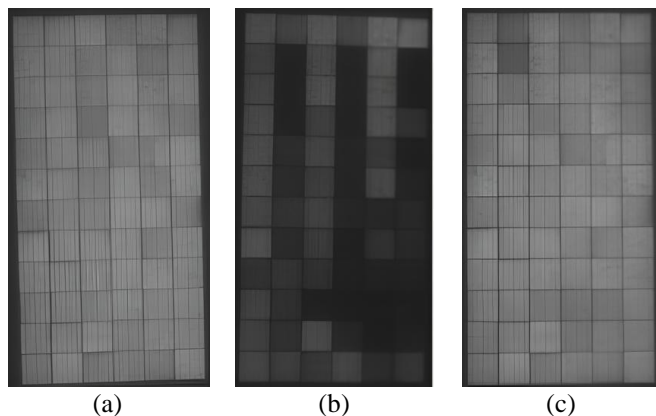


Fig. 12 Ensaio de propensão de PID: (a) antes, (b) após degradação e (c) após reversão. (Alvim & Figueiredo 2022).

As condições que permitem o aparecimento de PID podem ser reproduzidas em laboratório e seus efeitos são reversíveis a depender do nível de degradação. As imagens em EL auxiliam na análise desse processo, uma vez que podem ser associadas à avaliação da propensão a partir do padrão de imagem e da contagem da intensidade EL. A Fig. 12 mostra as imagens em EL de um módulo FV antes, após o ensaio de degradação/reversão de PID realizado em laboratório.

#### 4.2 Degradação precoce de módulos FV.

Para auxiliar no processo de detecção de degradação precoce é importante realizar um acompanhamento da operação dos módulos FV. A Fig. 13 apresenta um exemplo de acompanhamento da degradação causada pela entrada de umidade na parte ativa da célula. A imagem (a) mostra a EL de um módulo FV ao ser retirado do campo após 1,5 anos de operação devido à perda de desempenho detectada pelo sistema supervisor. Já a imagem (b), capturada 8 meses depois, revela claramente a evolução da degradação, uma vez que o módulo perdeu significativamente sua propriedade EL.

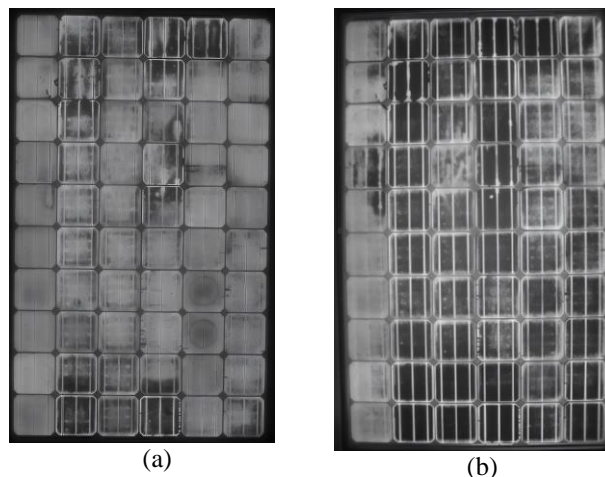


Fig. 13 Evolução da degradação devido à difusão de umidade na parte ativa das células de um módulo FV. Adaptado de Figueiredo et al. (2020).

As medidas I-V e de resistência de isolamento, aplicadas na análise do sistema que continha o módulo apresentado na Fig. 13, corroboraram para confirmar a hipótese levantada após a avaliação das imagens em EL e serviram como argumento para o acionamento da garantia junto ao fornecedor.

#### 4.3 O efeito da armazenagem e do transporte: problemática em GD.

Na Fig. 14, são apresentadas imagens de dois módulos FV logo após a entrega de um kit fotovoltaico por uma integradora de GD. Nas imagens ficam evidenciados alguns defeitos, tais como fissuras, redução da emissão EL por soldagem inadequada na metalização, e perda da propriedade EL devido à contaminação da célula/wafer. Além disso, foram identificados pontos completamente escurecidos, característicos de falhas na rede cristalina.

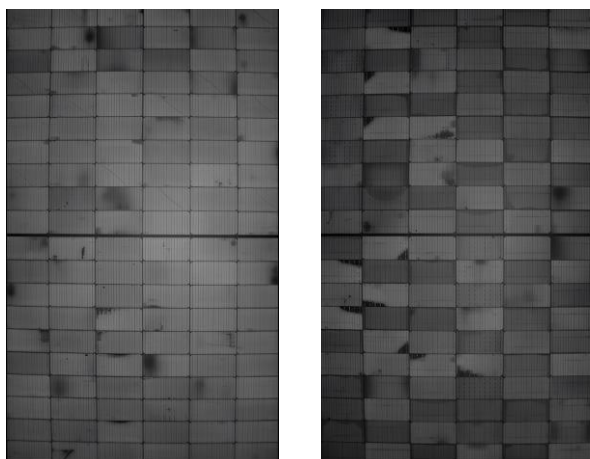


Fig. 14 EL de módulos FV recebidos após o transporte realizado por parte de integradores de GD.

A situação da GD FV convencional é mais delicada: partindo do princípio que o controle de qualidade das instalações é quase inexistente, a referência que o proprietário do sistema possui é o montante de energia gerada mensalmente. Em casos mais específicos, o acompanhamento de indicadores de desempenho pode auxiliar na detecção de algum problema. Entretanto, na maioria dos casos, o defeito pode estar escondido e atuando de forma progressiva até a falha, o que normalmente ocorre após o término da garantia do serviço prestado pelo integrador. No caso dos módulos mostrados na Fig. 14, os mesmos encontram-se instalados na Escola de Engenharia da UFF e serão objeto de estudo para o acompanhamento das manifestações que possam estar relacionadas com o que foi detectado nas imagens em EL.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste estudo demonstram a importância da avaliação sistemática da qualidade dos módulos fotovoltaicos, tanto em relação aos parâmetros elétricos quanto aos aspectos de degradação, armazenamento e transporte. O ensaio de eletroluminescência se insere nesse contexto como uma abordagem não destrutiva que serve como indicativo de falha ou propensão a esta, sendo um aliado de investidores e usuários. Ainda não há regulamentação técnica nacional com o estabelecimento do procedimento de ensaio e formas de avaliação, sendo fundamental, para a evolução do setor, que haja uma regulamentação nacional que estabeleça procedimentos padronizados e criteriosos de avaliação dos módulos fotovoltaicos, visando a garantia da qualidade desses equipamentos. A certificação e etiquetagem dos módulos fotovoltaicos, embora realizadas em laboratórios especializados, ainda são feitas com base em amostras escolhidas pelos representantes/importadores, o que pode levar a uma subestimação dos reais problemas enfrentados pelos módulos em campo. Portanto, é necessário um esforço conjunto entre o setor regulatório e a indústria fotovoltaica para o estabelecimento de diretrizes mais rigorosas e confiáveis para a avaliação dos módulos FV.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem o suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelos programas de Apoio à Pesquisa (APQ1) e Bolsa de Iniciação Científica (IC). Os autores agradecem à FAPERJ pelo apoio dado no desenvolvimento das pesquisas. Os autores também agradecem ao serviço técnico do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF-IEE-USP) por autorizar a publicação de algumas das imagens das células FV utilizadas neste estudo.

## REFERÊNCIAS

- Alvim, A., & Figueiredo, G. (2022). Estratégias Para Análise Da Emissão Eletroluminescente De Módulos Fotovoltaicos. *IX Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- De la Parra, I., Muñoz, M., Lorenzo, E., García, M., Marcos, J., & Martínez-Moreno, F. (2017). PV performance modelling: A review in the light of the quality assurance for large PV plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(November 2016), 780–797. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.080>
- Ebner, R., Kubicek, B., & Ujvari, G. (2013). Non-destructive techniques for quality control of PV modules: Infrared thermography, electro- and photoluminescence imaging. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 8104–8109. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700488>
- Figueiredo, G., Almeida, M. P., Manito, A., & Zilles, R. (2020). Acompanhamento da degradação de geradores fotovoltaicos no IEE-USP. *VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- Fuyuki, T., Kondo, H., Kaji, Y., Ogane, A., & Takahashi, Y. (2007). Analytic findings in the electroluminescence characterization of crystalline silicon solar cells. *Journal of Applied Physics*, 101(2). <https://doi.org/10.1063/1.2431075>
- Hsieh, H., H., Chang, T., C., His, C., S., Hsu, F., C. (2013). An innovative packaging process for low power loss solar modules. *8th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*. <https://doi.org/10.1109/IMPACT.2013.6706669>
- IEC TS 60904-13. (2018). Photovoltaic Devices Part 13: electroluminescence of photovoltaic modules, vol. 1.
- Martínez-Moreno, F., Figueiredo, G., & Lorenzo, E. (2018). In-the-field PID related experiences. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 485–493. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.09.037>
- Mchedlidze, T., Herguth, A., & Weber, J. (2016). Monitoring of Si-solar cell degradation with electroluminescence. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 155, 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.008>
- Naumann, V., Lausch, D., Hähnel, A., Bauer, J., Breitenstein, O., Graff, A., Werner, M., Swatek, S., Großer, S., Bagdahn, J., & Hagendorf, C. (2014). Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120(PART A), 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.015>