

ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO INDUZIDA POR POTENCIAL EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO

Juliano Theis dos Santos (UFRGS) - juliano.theis@ufrgs.br

Arno Krenzinger (UFRGS) - arno.krenzinger@ufrgs.br

Resumo:

Este trabalho tem por objetivo analisar a Degradação Induzida por Potencial (PID) no desempenho de módulos fotovoltaicos de tecnologia de silício cristalino, fenômeno relatado em centrais elétricas de médio e grande porte que costumam operar com tensões mais elevadas. A metodologia adotada no LABSOL UFRGS utiliza um simulador solar para a caracterização elétrica e uma câmera fotográfica convencional adaptada para captar a emissão eletroluminescente. Dois módulos de fabricantes distintos foram submetidos a uma tensão de 1kV por 7 dias, examinados e depois submetidos à tensão outra vez com a polaridade invertida. No primeiro período ocorre PID e no segundo regeneração. As curvas I-V, imagens de eletroluminescência e os histogramas decorrentes das imagens mostram diferenças significativas da intensidade de degradação dos dois módulos utilizados como exemplo.

Palavras-chave: *Degradação Induzida por Potencial, Eletroluminescência, Módulos Fotovoltaicos*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos*

ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO INDUZIDA POR POTENCIAL EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO

Juliano Theis dos Santos – juliano.theis@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
Laboratório de Energia Solar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Resumo. Este trabalho tem por objetivo analisar a Degradação Induzida por Potencial (PID) no desempenho de módulos fotovoltaicos de tecnologia de silício cristalino, fenômeno relatado em centrais elétricas de médio e grande porte que costumam operar com tensões mais elevadas. A metodologia adotada no LABSOL UFRGS utiliza um simulador solar para a caracterização elétrica e uma câmera fotográfica convencional adaptada para captar a emissão eletroluminescente. Dois módulos de fabricantes distintos foram submetidos a uma tensão de 1kV por 7 dias, examinados e depois submetidos à tensão outra vez com a polaridade invertida. No primeiro período ocorre PID e no segundo regeneração. As curvas I-V, imagens de eletroluminescência e os histogramas decorrentes das imagens mostram diferenças significativas da intensidade de degradação dos dois módulos utilizados como exemplo.

Palavras-chave: Degradação Induzida por Potencial, Eletroluminescência, Módulos Fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

Nesta última década observa-se uma crescente preocupação na exploração de energias com fontes renováveis, neste cenário favorável a energia solar fotovoltaica está destacando-se no Brasil, despertando o interesse da população em geral. Esse crescimento é fruto da redução dos custos de produção dos equipamentos que compõem todo o sistema fotovoltaico, normalização técnica de instalações, políticas públicas de incentivos fiscais, linhas especiais de financiamento para aquisição dos equipamentos, além das características climáticas do país (Pinho; Galdino, 2014).

Neste contexto, as taxas de degradação da potência máxima dos módulos fotovoltaicos compõem a análise do tempo de retorno sobre o investimento financeiro, a ocorrência anômala de fenômenos que possam impactar negativamente essas taxas afetam a viabilidade econômica, motivo pelo qual são objeto de estudos em diversas instituições de ensino e de fabricantes de equipamentos. A Degradação Induzida por Potencial (PID, do inglês *Potential Induced Degradation*) é um desses fenômenos, causado pelas tensões elevadas de trabalho resultante da associação de muitos módulos em série, ou seja, maiores potenciais em relação à terra, gerando uma redução no desempenho do gerador fotovoltaico (Leite, 2012).

O processo de fabricação do vidro que é utilizado na camada frontal de módulos fotovoltaico é caracterizado pela adição de carbonato de sódio, a diferença elevada de potencial entre a célula fotovoltaica e a moldura do módulo induz um campo elétrico que pode ocasionar um fluxo de corrente de fuga da camada ativa da célula para a terra devido a polarização de íons de sódio no vidro. Essa polarização é justificada pela suplantação de cargas negativas fixas, devido ao acúmulo de cargas positivas na camada antirreflexiva, módulos de tecnologia de silício que utilizam a configuração p na base e n no emissor em suas células tendem ser afetados quando há um potencial negativo nas células em relação a um potencial positivo na moldura (Figueiredo; Zilles, 2015).

A transferência de material iônico ocasionado pela existência desse campo elétrico, dependendo da sua intensidade, pode inverter partes do emissor e repelir elétrons da célula fotovoltaica, reduzindo a capacidade da junção $p-n$ em produzir o efeito fotovoltaico devido aos danos ocasionados em sua rede cristalina. Esse fenômeno pode ser reversível, uma estratégia consiste na aplicação de um potencial reverso ao potencial de operação do sistema, porém a ocorrência de PID durante um período prolongado de tempo pode ocasionar degradações irreversíveis ocasionadas pelas reações eletroquímicas na célula fotovoltaica, conforme apresentado por Figueiredo e Zilles, 2015.

O grau de degradação do conjunto de células que compõem o módulo fotovoltaico pode ser avaliado pela técnica de captação de imagem no espectro eletroluminescente, correspondente pela emissão de radiação entre 0,9 μm e 1,3 μm , ocasionada pela recombinação de elétrons e lacunas na junção $p-n$ ao ser polarizada diretamente. As células afetadas pelo efeito de PID apresentam uma redução significativa na emissão de radiação, podendo ser captada por uma câmera de eletroluminescência (IEC TS 60904-13, 2018).

Os fabricantes de câmeras para captar eletroluminescência geralmente utilizam sensores detectores a base de Germânio (Ge) ou Arseneto de Índio Gálio (InGaAs), porém os sensores de Arseneto de Índio Gálio exercem preferência por apresentarem uma eficiência quântica melhor, além de menor corrente de saturação reversa e respostas mais rápidas nesta faixa de comprimento de onda (IEC TS 60904-13, 2018). Os sensores do tipo CCD de silício equipam câmeras fotográficas digitais convencionais possuem eficiência quântica inferior quando comparados aos de Arseneto de Índio Gálio, porém têm baixo custo e também proporcionam imagens de boa qualidade. As câmeras digitais convencionais são equipadas com um filtro que elimina a incidência da radiação infravermelha, portanto, a remoção deste filtro é uma

solução eficiente para determinadas aplicações de eletroluminescência com baixo custo ao comparar-se com uma solução comercial, conforme apresentado por Figueiredo et al., 2018.

O objetivo deste trabalho é apresentar a capacitação do LABSOL-UFRGS no acompanhamento do efeito de degradação induzida por tensão em módulos fotovoltaicos, diagnosticado por sucessivas curvas características $I&V$ e através de eletroluminescência.

2. MÉTODO

O estudo é dividido nas seguintes etapas: (1) Seleção dos módulos fotovoltaicos; (2) Caracterização elétrica e avaliação da degradação pelo método de eletroluminescência; (3) Ensaio de PID , ciclo de degradação; (4) Caracterização elétrica e avaliação da degradação pelo método de eletroluminescência; (5) Ensaio de PID , ciclo de recuperação; (6) Caracterização elétrica e avaliação da degradação pelo método de eletroluminescência; (7) Avaliação e comparação dos resultados de todas as etapas.

No LABSOL-UFRGS foram selecionados 2 módulos fotovoltaicos de silício cristalino com características semelhantes, porém de fabricantes distintos identificados por Módulo A e Módulo B. A Tab. 1 exhibe os parâmetros nominais para as Condições Padrão de Teste (STC).

Tabela 1 - Especificações elétricas dos módulos para as condições de irradiância 1.000 W/m^2 , temperatura de célula $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e espectro AM 1,5.

CARACTERÍSTICA	MÓDULO A	MÓDULO B
Potência máxima - P_{max}	240W	240W
Tolerância	-0/+3%	-3/+3%
Tensão de máxima potência - V_{mp}	29,70V	30,8V
Corrente de máxima potência - I_{mp}	8,1A	7,8A
Tensão de circuito aberto - V_{oc}	36,9V	36,9V
Corrente de curto circuito - I_{sc}	8,58A	8,47A
Tensão máxima de sistema - V_{max}	1000V	1000V

2.1 Caracterização Elétrica

A caracterização elétrica de cada módulo é realizada com o uso de um *Simulador Solar Pulsado de Grande Área* ($LAPSS$, do inglês *Large Area Pulsed Solar Simulator*) fabricado pela PASAN, modelo SunSim 3C, instalado nas dependências do LABSOL-UFRGS. O equipamento está em conformidade com o padrão internacional IEC TS 60904-9:2007, sendo classificado como AAA, possui um flash de 10ms e capacidade de irradiar uma região de teste com dimensões de até $2\text{m} \times 2\text{m}$.

O objetivo deste ensaio é determinar as curvas características $I-V$. A curva $I-V$ é corrigida para a condição STC em conformidade a IEC TS 60891:2009 diretamente pelo software do $LAPSS$. A configuração é para a condição STC , irradiância de 1.000W/m^2 , espectro solar AM 1,5 e temperatura de 25°C .



Figura 1 – Módulo fixado no $LAPSS$.

A temperatura é determinada com um PT-100 fixado na região central do módulo, em contato com o polímero (tedlar®) da região oposta a região ativa, aguardando-se a estabilização térmica entre o módulo e o sensor antes de cada medida. A Fig. 1 ilustra a região ativa do módulo, face que recebe radiação do flash durante o ensaio.

2.2 Eletroluminescência

A tomada de imagens para a avaliação da degradação pelo método de eletroluminescência é realizada utilizando-se uma câmera fotográfica convencional ilustrada na Fig. 2, que sofreu uma modificação com a remoção do filtro de absorção da radiação infravermelha. A câmera é fabricada pela Canon, modelo EOS Rebel T6 de 18 Megapixels, com uma lente modelo EFS 18-55mm. Essa solução apresenta resultados muito próximos aos que seriam obtidos por uma câmera de eletroluminescência (EL) comercial, porém a um custo muito inferior e com mais limitações.



Figura 2 – Câmera e conjunto óptico. (Adaptado Nova Eletrônicos, 2019).

O suporte de fixação para módulo do *LAPSS* também é utilizado para fixar os módulos na tomada de imagens de EL, a câmera é posicionada ao fundo do túnel do simulador sobre um tripé específico para sustentação. O procedimento adotado consiste na seleção do foco em modo manual, sob iluminação artificial ajustando-se o zoom e o foco do conjunto óptico.

A velocidade do obturador é ajustada para 30s, tempo muito elevado comparando a tomada de imagens convencionais de fotografias, a sensibilidade do sensor da câmera é ajustada para ISO 1600. No intuito de evitar qualquer trepidação no momento de disparo, configura-se um retardo de 3s no disparo. A corrente injetada em cada módulo consiste em reproduzir 0,9 da I_{sc} , em conformidade com a IEC TS 60904-13:2018. Cada módulo é polarizado diretamente, a corrente é controlada com uma fonte digital fabricada pela Kepco, modelo BOP 100-10MG.

2.3. Efeito de *PID*

A metodologia descrita na norma IEC TS 62804-1:2015 é utilizada para avaliar a propensão de cada módulo sofrer *PID*. O procedimento consiste em cobrir toda a superfície ativa do módulo com um material condutor, abrangendo inclusive a estrutura metálica, optou-se pela utilização de papel alumínio ilustrado na Fig. 3, sugerido na norma, visto seu baixo custo e excelente maleabilidade.



Figura 3 – Módulo coberto por papel alumínio.

No ciclo de degradação, Fig. 4, o terminal negativo da fonte é conectado aos terminais curto-circuitados do módulo, o terminal positivo é conectado ao papel alumínio e a estrutura metálica.

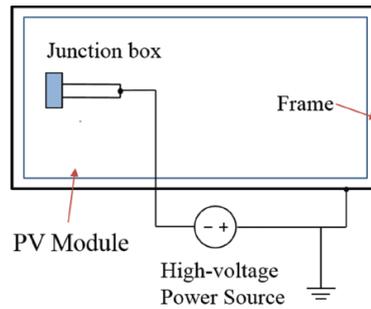


Figura 4 – Esquema elétrico de ligações ciclo de degradação. (Adaptado de Luo et al., 2017).

Durante todo os procedimentos ambos os módulos permaneceram em um ambiente climatizado a 25°C com tolerância de ± 1 °C, umidade relativa inferior a 60% e sem a incidência de radiação solar direta. Utilizando uma fonte fabricada pela Instrum do Brasil, modelo Hipot 5 kV 5 mA, aplica-se a tensão máxima de sistema de 1.000 V em cada módulo durante o período de 168h (7 dias). Concluído esse procedimento, entre o período de 2h a 6h, cada módulo é submetido novamente aos ensaios de caracterização elétrica para determinação das curvas P - V e I - V . Posteriormente são repetidos os ensaios de eletroluminescência.

No ciclo de recuperação todo procedimento é semelhante ao ciclo de degradação, entretanto a polaridade elétrica na aplicação de tensão é invertida, o terminal negativo da fonte é conectado aos terminais curto-circuitados do módulo, o terminal positivo é conectado ao papel alumínio e a estrutura metálica. A Fig. 5 ilustra essa alteração.

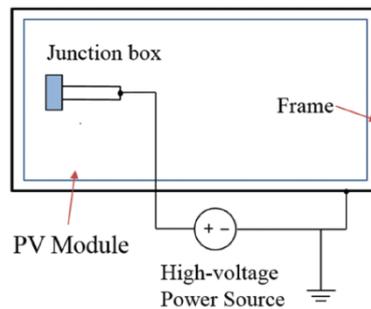


Figura 5 – Esquema elétrico de ligações ciclo de recuperação. (Adaptado de Luo et al., 2017).

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1 Módulo A

Os parâmetros de caracterização elétrica obtidos nos ensaios realizados no LAPSS no módulo do Módulo A estão agrupados na Tab. 2. Na etapa inicial, anterior ao ensaio de PID, observa-se que a potência máxima registrada é de 238,83Wp, compatível com a potência máxima nominal de 240Wp.

Tabela 2 – Comparação dos resultados dos ensaios no LAPSS do módulo do Fabricante A.

ETAPA	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA				
	P_{max} (Wp)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)
Inicial	238,8	29,66	8,05	37,08	8,59
Degradação	165,9	27,27	6,08	36,39	8,53
Recuperação	233,1	29,67	7,86	37,13	8,61

Na imagem de eletroluminescência da Fig. 6, observa-se uma emissão homogênea de radiação nas 60 células que compõem o módulo, porém também é possível observar a ocorrência de pequenos defeitos manifestados na forma de pequenos pontos e riscos em locais aleatórios. Esses efeitos podem ter sido ocasionados nas etapas de fabricação, transporte rodoviário e/ou no manuseio do módulo durante a estocagem, além disso, podem justificar essa pequena redução na potência máxima medida comparada com a potência máxima nominal.

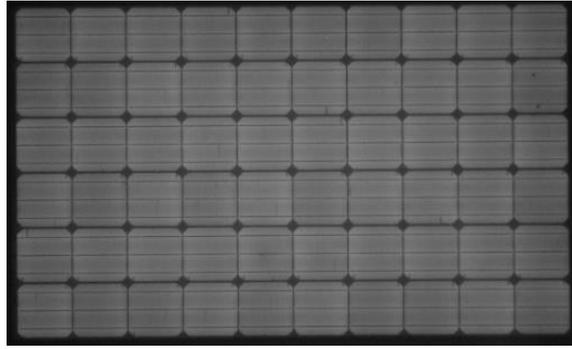


Figura 6 – Eletroluminescência do módulo A, etapa inicial.

Na segunda etapa, após o ensaio de *PID*, ciclo de degradação, observa-se a ocorrência de degradação no módulo, a potência máxima registrada é de 165,9Wp, representando cerca de 69,4% da potência máxima inicial. Na imagem de eletroluminescência da Fig. 7, observa-se uma emissão não homogênea de radiação em todas as células, justificando essa redução.

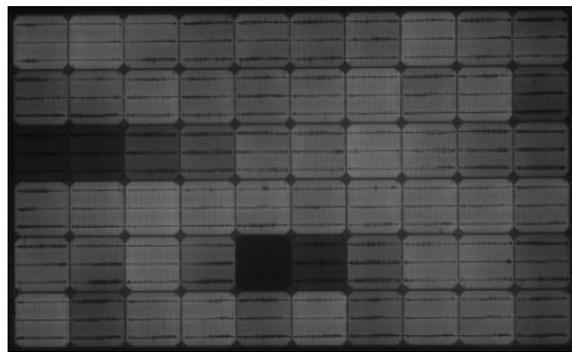


Figura 7 – Eletroluminescência do módulo A, ciclo de degradação.

Na terceira etapa, ciclo de recuperação, observa-se a ocorrência de recuperação parcial da degradação gerada no módulo, a potência máxima registrada é de 233,1Wp, representando cerca de 97,6% da potência máxima inicial. Na imagem de eletroluminescência da Fig. 8 e da Fig. 9, verificam-se pequenos sinais de degradação em algumas regiões de cada células.

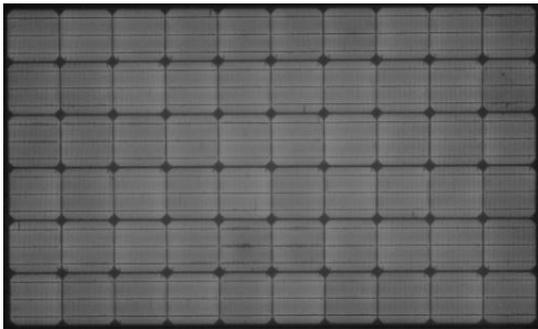


Figura 8 – Eletroluminescência do módulo do Fabricante A, ciclo de recuperação.

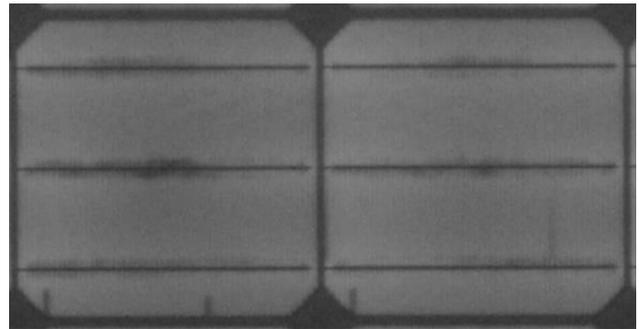


Figura 9 – Zoom de uma pequena região da imagem da Fig. 8.

Ao analisar as curvas *I-V* e *P-V* determinadas no *LAPSS* e ilustradas nas Figs. 10 e 11, respectivamente, verifica-se um comportamento discrepante da corrente e da potência para quase toda a faixa de domínio da tensão no ciclo de degradação, porém, no ciclo de recuperação, esse comportamento ocorre somente próximo ao ponto de máxima potência.

O histograma ilustrado na Fig. 12 apresenta a quantidade de pixels em uma escala de cinza e compara as imagens de eletroluminescência do módulo antes e após o ensaio de *PID* no ciclo de degradação, observa-se uma redução de tons médios e aumento de tons escuros. Entretanto na imagem da Fig. 13, ao comparar com a imagem de eletroluminescência após o ensaio de *PID* no ciclo de recuperação, observa-se uma pequena redução de tons mais claros.

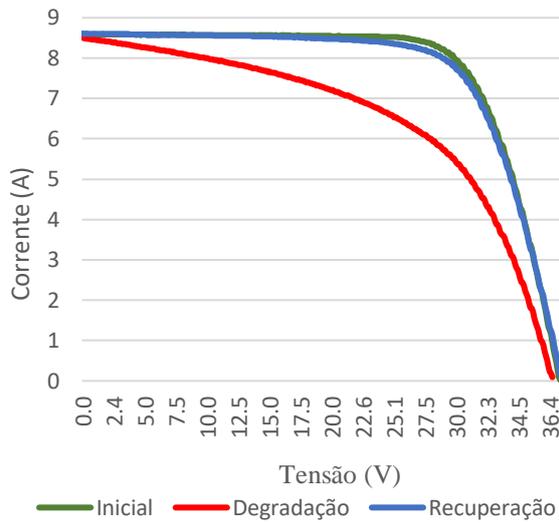


Figura 10 – Curva I-V do módulo A.

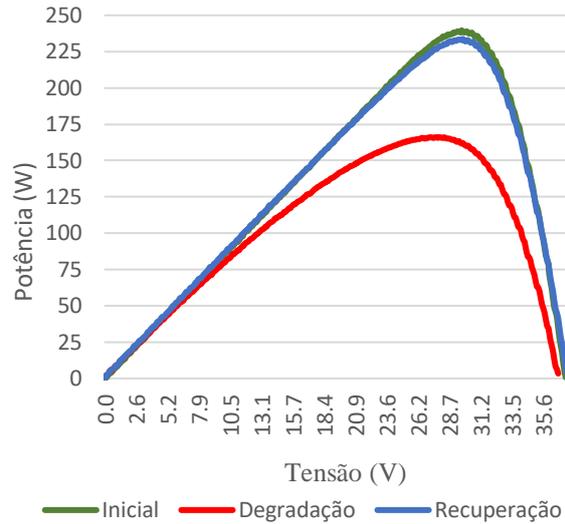


Figura 11 – Curva P-V do módulo B.

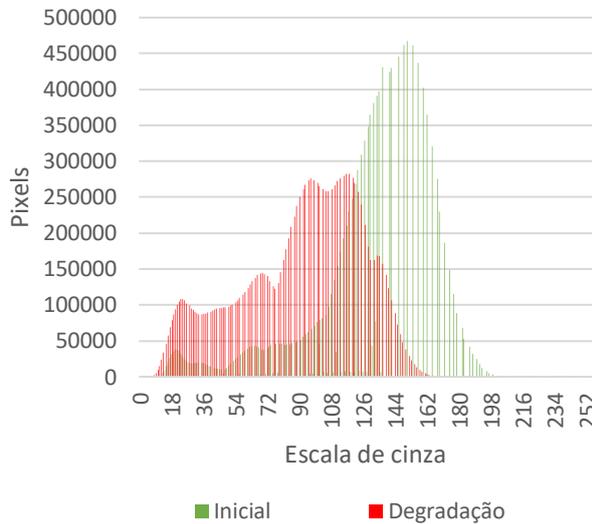


Figura 12 – Histograma comparando a imagem inicial com a imagem do ciclo de degradação, módulo A.

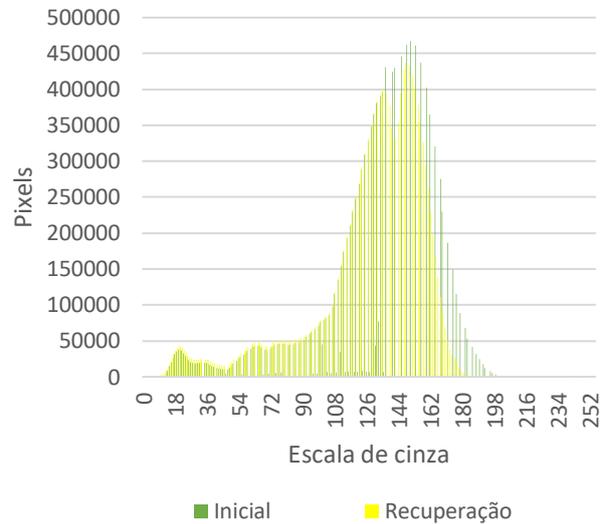


Figura 13 – Histograma comparando a imagem inicial com a imagem do ciclo de recuperação, módulo A.

3.2. Módulo B

Os parâmetros de caracterização elétrica do módulo B estão agrupados na Tab. 3. Na etapa inicial, observa-se que a potência máxima registrada é de 239,4 Wp, compatível com a potência máxima nominal de 240 Wp.

Tabela 3 – Comparação dos resultados dos ensaios no LAPSS do módulo do Fabricante B.

ETAPA	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA				
	P_{max} (Wp)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)
Inicial	239,4	29,42	8,14	37,06	8,78
Degradação	82,0	14,68	5,58	24,95	8,71
Recuperação	232,4	29,04	8,00	36,88	8,85

Da mesma forma, semelhante ao Módulo A, na imagem de eletroluminescência da Fig. 14, observa-se uma emissão homogênea de radiação nas 60 células que compõem o módulo e pequenos defeitos.

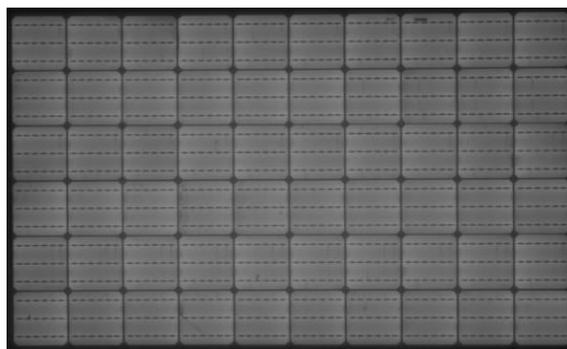


Figura 14 – Eletroluminescência do módulo B, etapa inicial.

Na segunda etapa, observa-se a ocorrência de degradação mais severa no módulo B ao comparar com o módulo A, a potência máxima registrada é de 82,0 Wp, representando cerca de 34,2% da potência máxima inicial. Essa severidade pode ser observada nas imagens de eletroluminescência da Fig. 15 e da Fig. 16, a maior parte das células que compõem o módulo apresenta uma baixa emissão de radiação, algumas não foram captadas pela câmera.

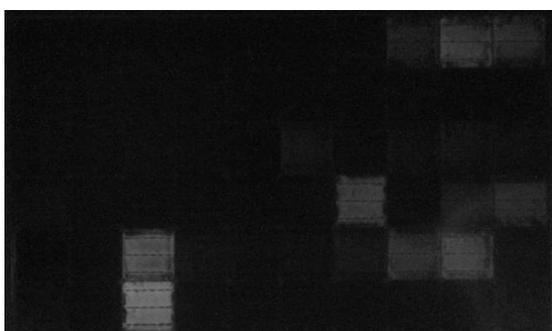


Figura 15 – Eletroluminescência do módulo B, ciclo de degradação.

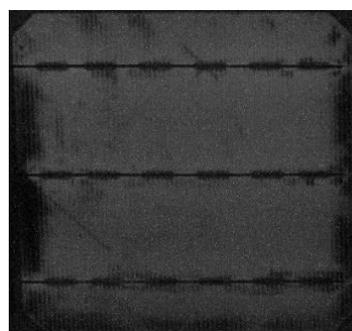


Figura 16 – Zoom de uma pequena região da imagem da Fig. 13.

Na terceira etapa, ciclo de recuperação, também ocorreu a recuperação parcial da degradação gerada no módulo, a potência máxima registrada é de 232,4 Wp, representando cerca de 97,1% da potência máxima inicial. Na imagem de eletroluminescência da Fig. 17 e da Fig. 18, verificam-se pequenos sinais de degradação em algumas regiões de cada células.

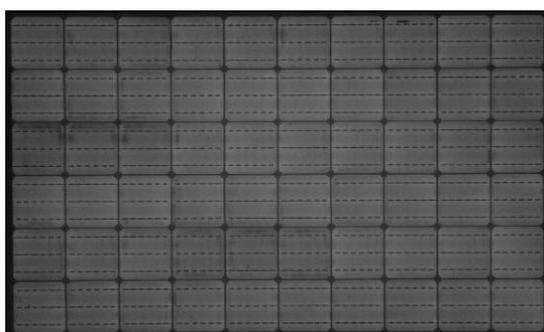


Figura 17 – Eletroluminescência do módulo B, ciclo de recuperação.

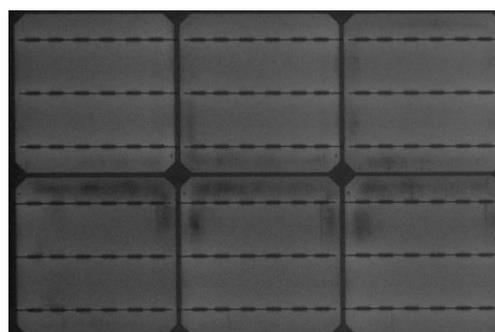


Figura 18 – Zoom de uma pequena região da imagem da Fig. 15.

As curvas *I-V* e *P-V*, ilustradas nas Fig. 19 e Fig. 20, além da Tab. 1, percebe-se alteração significativa na tensão de circuito aberto V_{oc} no ciclo de degradação. Além disso, verifica-se um comportamento discrepante da corrente e da potência para toda a faixa de domínio da tensão. Entretanto, semelhante ao Módulo A, no ciclo de recuperação, esse comportamento ocorre somente próximo ao ponto de máxima potência.

O histograma ilustrado na Fig. 21 compara as imagens de eletroluminescência do módulo antes e após o ensaio de *PID* no ciclo de degradação, observa-se uma redução muito acentuada de tons médios e aumento significativo de tons escuros. Entretanto, na imagem da Fig. 22 ao comparar com a imagem de eletroluminescência após o ensaio de *PID* no ciclo de recuperação também se observa uma pequena redução de tons mais claros, semelhante ao módulo A.

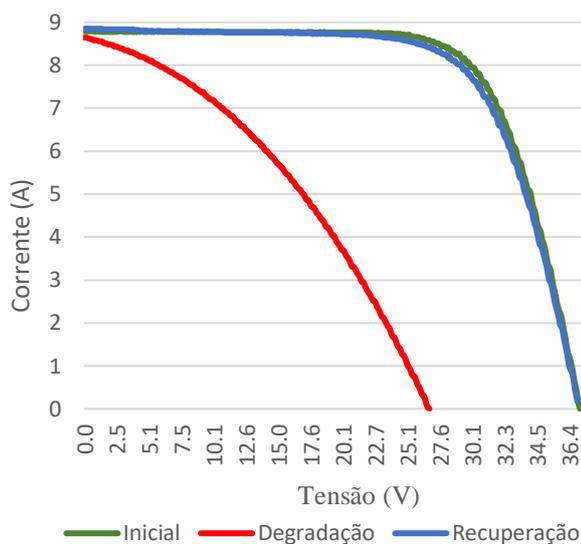
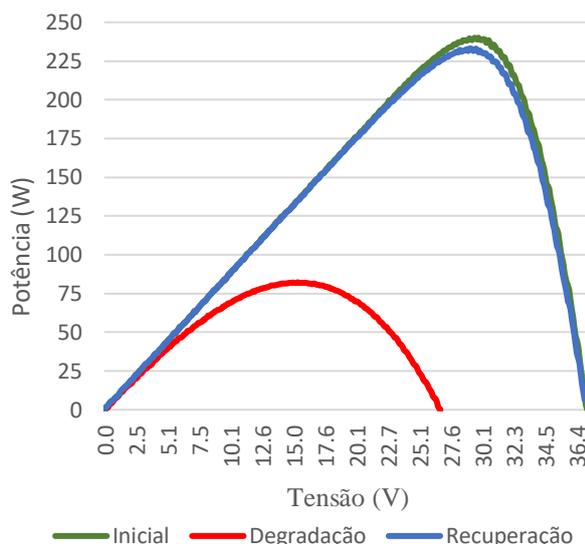
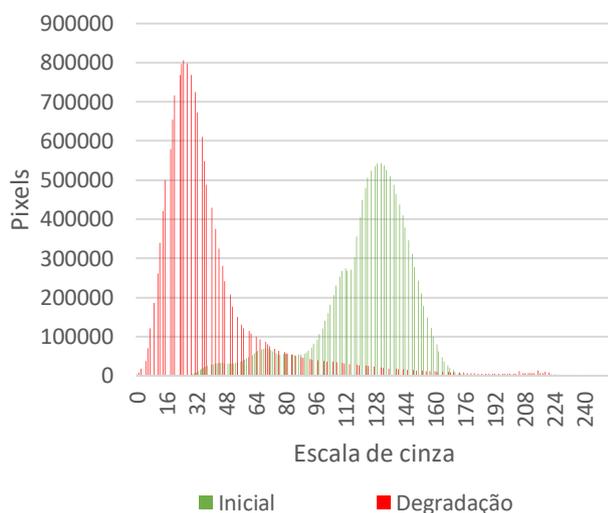
Figura 19 – Curva I - V do módulo do Fabricante B.Figura 20 – Curva P - V do módulo do Fabricante B.

Figura 21 – Histograma comparando a imagem inicial com a imagem do ciclo de degradação, módulo B.

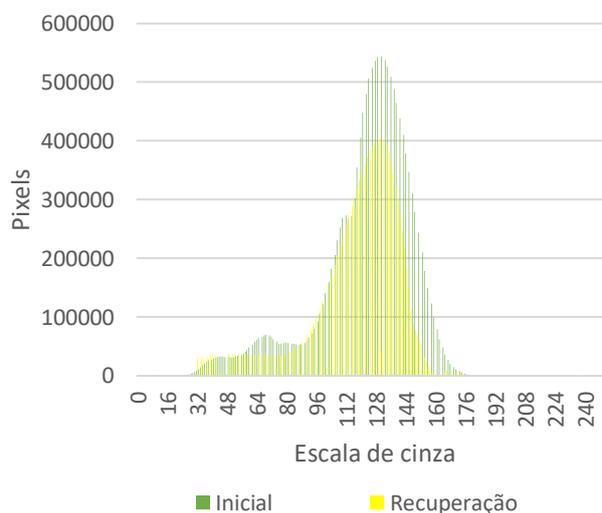


Figura 22 – Histograma comparando a imagem inicial com a imagem do ciclo de recuperação, módulo B.

A mera interpretação visual das imagens de eletroluminescência consiste em um método qualitativo de análise muito eficiente, porém há situações em que os experimentos podem apresentar resultados muito próximos não sendo possível observar visualmente as diferenças. Logo, a norma IEC TS 60904-13:2018 menciona a possibilidade de utilização de um histograma da imagem como um método quantitativo como forma de complementar o método qualitativo. A comparação entre os histogramas das Figs. 12 e 21 reforça a diferença de intensidade em que o PID se manifestou nas aplicações deste trabalho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho reproduziu o fenômeno de PID com base na norma IEC TS 62804-1, após os ensaios de PID , no ciclo de degradação, o módulo fotovoltaico do Fabricante B apresentou um grau de degradação mais acentuada ao compara-se com o do Fabricante A. No ciclo de recuperação, ambos apresentam recuperação quase completa, ao analisar as curvas características observa-se uma pequena redução de performance próximo ao ponto de máxima potência. Além disso, utilização de uma câmera fotográfica adaptada para captação da emissão eletroluminescente demonstrou ser muito eficiente, produzindo imagens muito nítidas e com ótima resolução. A comparação da frequência dos tons de cinza nas imagens, registrada pelos histogramas, ajuda a análise da degradação e da regeneração.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio parcial da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

- Figueiredo, G., Zilles, R., 2015. Degradação Induzida pelo Potencial, Revista Brasileira de Energia Solar, vol. VI, n. 6, pp. 128-137.
- Figueiredo, G., Almeida, M. P., Manito, A., G., Zilles, Alternativa de Baixo Custo para Imagens em Eletroluminescência de Módulos Fotovoltaicos, Gramado – Rio Grande do Sul, Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.
- Pinho, J. T.; Galdino, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. 4a Edição ed. Rio de Janeiro, RJ: Ce, Cepel - Cresesb, 2014.
- Leite, D. S., 2012. Degradação Induzida pelo Potencial (PID) em Módulos Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Luo, W., Khoo, Y. S., Hacke, P., Naumann, V., Lausch, D., Harvey, S. P., Singh, J.P., Chai, J., Wang, Y., Aberle, A.G., Ramakrishna, S. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review. Energy and Environmental Science, 2017, pp. 43–68.
- Nova Eletrônicos. Disponível em: <<http://www.novaeletronicos.com.br>>. Acesso em: 18 outubro de 2019.
- IEC TS 60904-9:2007. Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements.
- IEC TS 60891:2009. Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.
- IEC TS 60904-13, 2018. Photovoltaic Devices Part 13: electroluminescence of photovoltaic modules.

ANALYSIS OF THE POTENTIAL INDUCED DEGRADATION ON CRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *This work aims to analyze the Potential Induced Degradation (PID) in the performance of crystalline silicon photovoltaic modules, a phenomenon reported in medium and large power plants that usually operate with higher voltages. The methodology adopted in LABSOL UFRGS uses a solar simulator for electrical characterization and a conventional camera adapted to capture the electroluminescent emission. Two modules from different manufacturers were subjected to a voltage of 1kV for 7 days, tested and then subjected to voltage again with inverted polarity. In the first period occurs PID and in the second regeneration. The I&V curves, electroluminescence images and image histograms show significant differences in the degradation intensity of the two modules used as an example.*

Key words: *Potential Induced Degradation, Electroluminescence on PV modules.*