

ALTERNATIVA DE BAIXO CUSTO PARA IMAGENS EM ELETROLUMINESCÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Gilberto Figueiredo – figueiredo@iee.usp.br

Marcelo Pinho Almeida – marcelopa@iee.usp.br

Alex Manito – alex@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente.

Resumo. *Este trabalho apresenta uma solução de baixo custo para obter imagens em eletroluminescência (EL) de módulos fotovoltaicos. O princípio de funcionamento e as aplicações da técnica são descritos, assim como a instrumentação necessária para realizar as medidas. A adaptação de câmeras fotográficas convencionais equipadas com sensores CCD pode ser uma alternativa para registrar imagens em eletroluminescência, tanto em laboratório como em campo. A funcionalidade da alternativa é comprovada a partir da análise de imagens de módulos instalados em sistemas operativos, ocasião que possibilitou a comparação entre eletroluminescências obtidas com uma câmera adaptada e outra comercialmente disponível. A solução apresentada neste trabalho também auxiliou na avaliação de amostra em ensaio de degradação induzida pelo potencial no qual foram perceptíveis mudanças de padrão nas imagens após os ensaios de degradação e reversão.*

Palavras-chave: *Eletroluminescência, Módulo fotovoltaico, Ensaio*

1. Introdução

As instalações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica possuem particularidades relacionadas à tecnologia utilizada na conversão da energia solar. Entender os princípios de funcionamento, as técnicas e os procedimentos de avaliação são essenciais para o controle de qualidade dos módulos fotovoltaicos utilizados, para o comissionamento, para os ensaios de recepção da instalação e para o diagnóstico de defeitos.

Existem algumas formas de avaliar as características dos dispositivos fotovoltaicos. O comportamento elétrico pode ser representado pela sua curva corrente versus tensão (curva IxV), na qual se mede a capacidade de geração do módulo/gerador fotovoltaico ao fazê-lo fornecer energia a uma carga enquanto se mede a dinâmica de corrente e tensão do dispositivo. O comportamento térmico, em termos da distribuição de temperatura, pode ser avaliado através de imagens termográficas obtidas no momento em que o dispositivo está em operação. Como se nota, em ambos os casos o dispositivo fotovoltaico deve desenvolver potência para a correta aferição das variáveis de interesse.

Por outro lado, utilizar um dispositivo fotovoltaico como absorvedor de corrente elétrica também pode ser útil para caracterizá-lo e investigar defeitos que não podem ser precisados com outras técnicas de medida. Aferir a curva IxV no escuro é um método utilizado para obter parâmetros intrínsecos, como as resistências série e paralela, com maior precisão. Medidas no escuro também são úteis quando se podem registrar imagens do dispositivo fotovoltaico emitindo luz no espectro de eletroluminescência (EL). As imagens podem ser obtidas através de um procedimento simples, o qual é descrito neste trabalho, entretanto o custo das soluções comerciais pode ser um impedimento na utilização da técnica.

Este trabalho apresenta uma descrição das propriedades de EL das células fotovoltaicas, o procedimento para obter as imagens de EL e uma solução de baixo custo para utilizar câmeras convencionais no registro dessas imagens. Ao final são apresentados exemplos de aplicação da solução em módulos FV.

2. Emissão eletroluminescente das células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são uma das várias aplicações das junções pn no campo da optoeletrônica: elas transformam energia de radiação eletromagnética em eletricidade. Já quando uma corrente elétrica é injetada no circuito ativo da célula, ela emite radiação. Este é o fenômeno chamado de luminescência, base dos diodos emissores de luz (LED) e dos lasers semicondutores. A radiação emitida pelos dispositivos fotovoltaicos não se encontra na faixa visível, mas na faixa do infravermelho (IR) do espectro eletromagnético, com comprimentos de onda entre 900 nm e 1300 nm, região conhecida como *Near Infrared* (NIR), não sendo possível observá-la a olho nu. Esta técnica é usada amplamente por fabricantes de células no processo de produção para avaliar a qualidade do produto. A Fig. 1 mostra o traçado da emissão luminescente do silício cristalino em função do comprimento de onda.

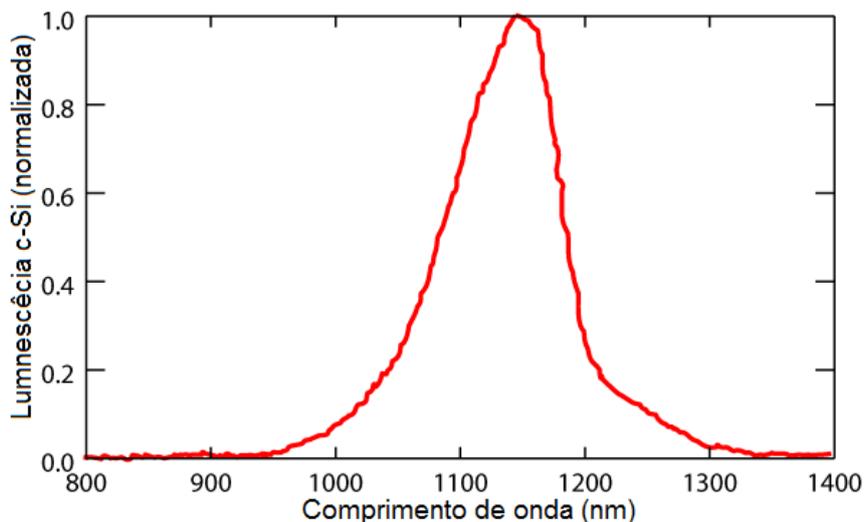


Figura 1 – Emissão do silício cristalino está na faixa do IR.

A intensidade da emissão eletroluminescente está relacionada com a quantidade de portadores minoritários da base e é proporcional à capacidade da junção em separar elétron de lacunas, consequentemente proporcional à tensão da célula fotovoltaica (McEnvoy *et al.*, 2011). A EL é utilizada pelos fabricantes de células fotovoltaicas para obter informações de parâmetros intrínsecos e extrínsecos dos dispositivos fotovoltaicos, como o tempo de vida dos portadores minoritários, a distância de difusão e a resistência série das células. Tal método é baseado na detecção dos sinais da emissão eletroluminescente, a diferentes níveis de corrente, para correlacioná-los com os parâmetros a serem calculados através de modelos determinísticos (Köntges *et al.*, 2009).

A perda total da propriedade eletroluminescente indica que aquela porção afetada não está contribuindo para o efeito fotovoltaico. Certos padrões de imagem caracterizam outros tipos de defeito, tais como microfissuras, gradientes de temperatura, contatos rompidos, falhas na metalização, curto-circuito entre base e emissor, corrosão devido à umidade, atuação do diodo de bypass, regiões de alta resistência série, além da própria perda da capacidade eletroluminescente devido à difusão de iônica indesejada para a camada antirreflexiva (AR) e estrutura cristalina da célula. A mesma técnica também pode ser aplicada para avaliar o nível de degradação temporal do módulo fotovoltaico, como mostram Guo *et al.* (2016). Behrens *et al.* (2017) apresentam um algoritmo para o processamento digital de imagens e vídeos de eletroluminescência de módulos instalados em campo sob diferentes condições de iluminação. Martínez *et al.* (2017) mostram uma solução para tomada de imagens de eletroluminescência e fotoluminescência de módulo fotovoltaicos em operação utilizando câmeras com sensores a base de InGaAs.

A Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*) divulgou, em 2014, um estudo disponível em sua página sobre os defeitos em módulos fotovoltaicos, no qual um de seus capítulos trata de imagens de eletroluminescência. A especificação técnica IEC TS 60904-13 (*Photovoltaic Devices Part 13: electroluminescence of photovoltaic modules*) está em fase de elaboração e buscam normatizar a técnica amplamente usada pelos fabricantes de células fotovoltaicas. A IEC TS 60904-13 prevê ensaios injetando determinados valores de corrente (múltiplos da corrente de curto-circuito, I_{sc}) para avaliar diferentes características e defeitos da junção.

3. Detecção de imagens em eletroluminescência

A captura de imagens em EL depende da utilização de captadores sensíveis ao comprimento de onda da emissão vinda das células fotovoltaicas. Detectores de fotodiodos a base de Arseneto de Índio Gálio (InGaAs) e Germânio (Ge) são largamente utilizados no mercado em soluções de aferições na faixa NIR. Os sensores de InGaAs são preferidos nesta faixa do IR devido a sua resposta mais rápida, melhor eficiência quântica e menor corrente de saturação reversa quando se considera uma mesma área de detecção.

Os sensores CCD (Dispositivo de Carga Acoplado) de câmeras convencionais à base de silício também são capazes de sensibilizar no comprimento de onda de eletroluminescência, conforme pode ser visto na Figura 2. Apesar de estes possuírem baixa eficiência quântica na faixa de maior emissão eletroluminescente (entre 1100 e 1200 nm), quando comparados com o sensor de InGaAs, os sensores CCD tem baixo custo e a resolução da imagem obtida é de boa qualidade, dependendo das condições de iluminação local.

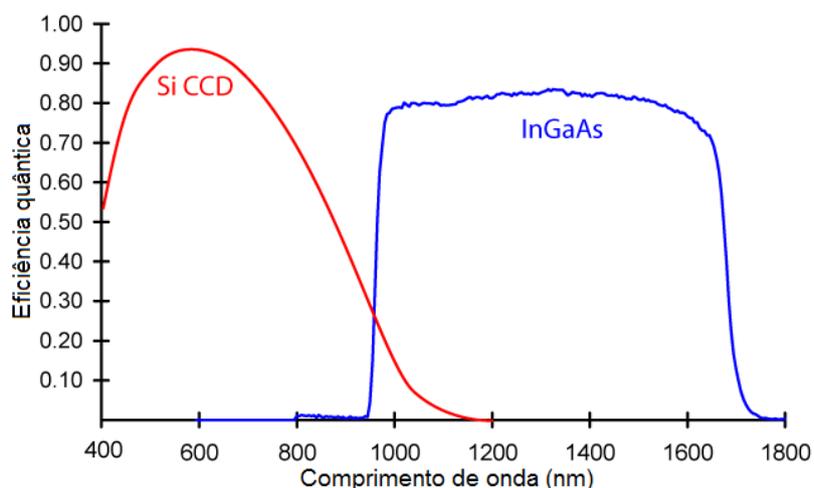


Figura 2 – Sensibilidade espectral dos sensores CCD de silício e à base de InGaAs.

Os sensores CCD de silício são bastante difundidos no mercado, uma vez que as câmeras digitais convencionais utilizam esta aplicação para detecção do espectro da luz visível. Para reduzir o ruído de IR, um filtro é posicionado à frente do sensor CCD, de modo que a remoção do filtro de IR da câmera possibilita a captura de imagens no espectro de EL. Isto torna a tomada de imagens uma ferramenta eficaz e de fácil acesso para avaliar se o módulo apresenta perda das propriedades eletroluminescentes e detectar defeitos nas células afetadas, seja em campo ou em laboratório. A Figura 3 mostra uma imagem de EL de um módulo de 20 W_p composto por 36 células fotovoltaicas. A imagem foi obtida a partir de uma *webcam* adaptada, a qual teve seu filtro de IR removido.

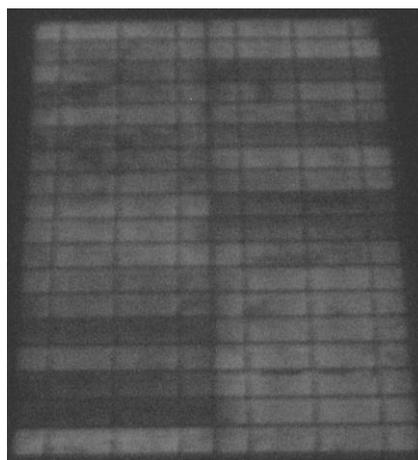


Figura 3 – Imagem de EL de um módulo de 20 W_p.

O procedimento para tomada das imagens é simples: o módulo fotovoltaico deve ser polarizado diretamente, com uma fonte em c.c., de maneira que a corrente flua pelo semiconductor. A IEC TS 60904-13, ainda em fase de discussão, prevê diferentes níveis de corrente injetada de acordo com o objetivo pretendido no ensaio. Dependendo da qualidade da câmera utilizada e do nível de iluminação do local, faz-se necessário injetar níveis de corrente próximos da I_{sc} para obter uma imagem com brilho suficiente para observar o padrão da emissão das células. Também é possível acoplar filtros NIR no conjunto ótico da câmera para registrar as imagens sem a necessidade de um ambiente completamente escuro.

3.1. Solução apresentada

Atualmente é bastante usual a utilização da EL no controle de qualidade do produto em centrais fotovoltaicas. Como precaução contra módulos fotovoltaicos defeituosos que despertem a suspeita de perdas de desempenho futuras na instalação, os contratos mais estritos para fornecimento de produtos preveem nos ensaios de recepção a tomada de imagens de EL de amostras aleatórias dos lotes de módulos recém-chegados. O objetivo é detectar defeitos de fabricação ou causados devido a choques mecânicos durante o transporte dos módulos fotovoltaicos, principalmente em trajetos rodoviários.

Alguns fornecedores disponibilizam no mercado câmeras específicas para tomada de imagens de eletroluminescência tanto em laboratório como em campo. Usualmente o conjunto ótico do equipamento contém um

filtro NIR que permite a obtenção das imagens em condições de iluminação ambiente. As soluções oferecidas normalmente incluem a instrumentação completa para a realização do procedimento, como fonte em c.c., cabeamento e conectores e tripé para sustentação da câmera. O preço, somente para essa câmera, varia entre R\$ 10.000,00 e R\$ 30.000,00.

Neste trabalho se buscou adaptar uma câmera fotográfica convencional, e, para isto, utilizou-se uma câmera digital de 4.1 Megapixels, a qual pode ser vista na Figura 4, lançada no mercado em 2002. O equipamento foi enviado para uma oficina de manutenção de câmeras fotográficas, onde se realizou a retirada do seu filtro de IR. O tempo total do procedimento de adaptação foi de 24h, incluindo envio e a realização do procedimento, e o custo total foi de R\$ 100,00. Atualmente, uma câmera fotográfica digital com resolução superior a utilizada neste trabalho e com maior número de funcionalidades poderia ser adquirida por valor inferior a R\$ 1.000,00.



Figura 4 – Câmera digital utilizada para obtenção das imagens.

3.2. Comparação entre a câmera adaptada e solução comercial

Para avaliar a aplicabilidade da solução apresentada, foram tomadas imagens de EL de módulos fotovoltaicos que estão em operação em um sistema conectado à rede instalado no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, IEE/USP. O gerador possui potência de placa de 156 kW_p e sua operação foi iniciada em 2014. Cabe ressaltar que a motivação por utilizar o procedimento de EL se deu devido a detecção de perdas consideráveis de desempenho da instalação, traduzida também na potência medida a sol real do gerador fotovoltaico após 2 anos de operação, que apresentou 130 kW_p.

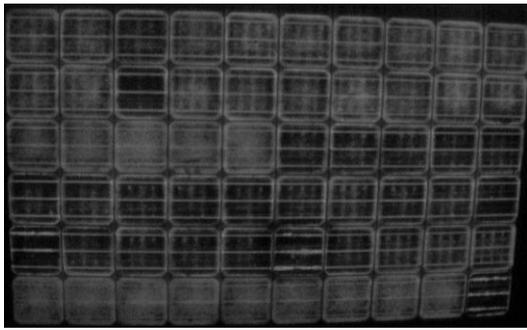
As Figura 5(a) e Figura 5(c) mostram as imagens em eletroluminescência obtidas de dois módulos fotovoltaicos com a câmera modificada. Nas imagens são perceptíveis áreas com perdas da propriedade eletroluminescente em diversas células de ambos os módulos. O padrão apresentado nas imagens sugere que as perdas precoces de potência detectadas a partir da aferição do gerador FV e de módulos individuais estão relacionadas com o ingresso de umidade na parte ativa das células fotovoltaicas.

As Figura 5(b) e Figura 5(d) são imagens dos mesmos módulos fotovoltaicos, porém obtidas com a solução comercial disponível no mercado por fornecedores de soluções para sistemas fotovoltaicos. A nitidez das imagens é superior com a solução comercial, sendo possível visualizar mais claramente os anéis de estriamento em algumas células. Isto é devido à utilização de um filtro NIR no conjunto ótico da câmera.

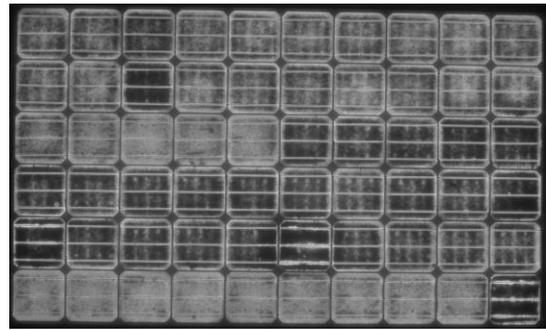
Em termos de padrão da imagem do módulo e detecção de áreas defeituosas, a imagem obtida com a câmera adaptada é considerada satisfatória para a aplicação desejada. No caso de não haver possibilidade de filtrar o espectro visível, pode-se melhorar a qualidade da imagem associando menores índices de iluminação da sala e ajustando nas configurações da câmera fotográfica a sensibilidade do sensor CCD e o tempo de abertura do obturador.

A funcionalidade da solução apresentada foi adicionalmente avaliada no acompanhamento de um ensaio de Degradação Induzida pelo Potencial (PID), uma vez que este tipo de degradação também afeta as propriedades eletroluminescentes das células fotovoltaicas degradadas. O procedimento que avalia a propensão do módulo em sofrer PID, apresentado na IEC TS 62804-1:2015 (*Test methods for the detection of potential-induced degradation*), prevê a tomada de imagens antes e após os ensaios. A especificação técnica considera o registro de imagens em eletroluminescência como ensaio opcional, apesar desta técnica é eficaz como método complementar de detecção da PID em laboratório e em campo.

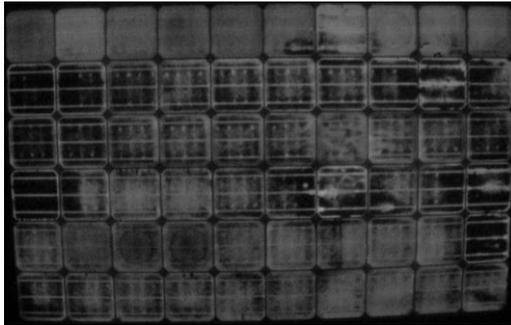
Neste trabalho foi realizado um ensaio cíclico de PID – um ciclo de degradação seguido de um ciclo de recuperação – em alguns módulos que estavam em operação no gerador fotovoltaico da instalação do IEE/USP. A Figura 6 mostra a imagem em eletroluminescência de uma dessas amostras antes do ensaio de PID.



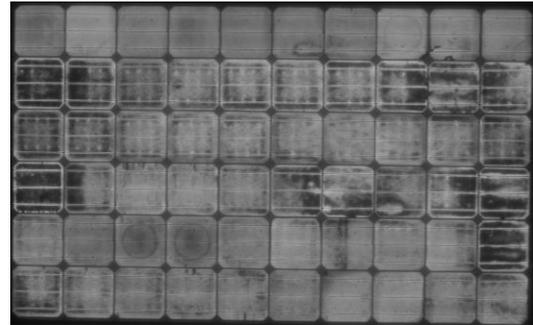
(a) Módulo 1 / Câmera Adaptada



(b) Módulo 1 / Solução Comercial



(c) Módulo 2 / Câmera Adaptada



(d) Módulo 2 / Solução Comercial

Figura 5 – Comparação entre EL de módulos FV obtidas com a câmera adaptada (a, c) e a solução comercial (b, d).

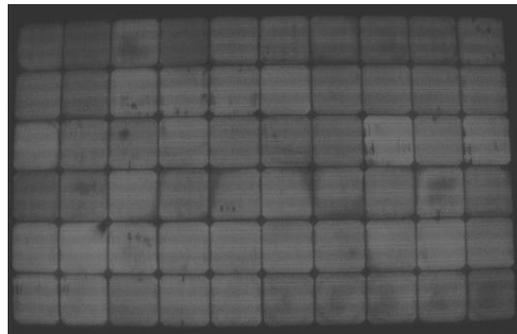
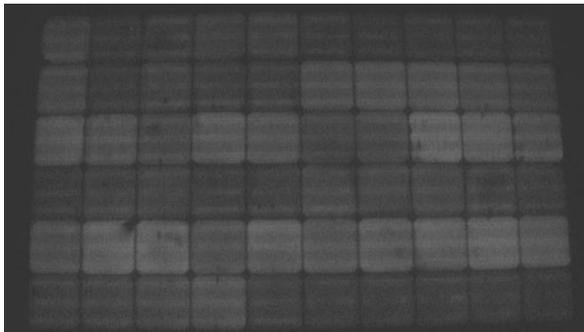
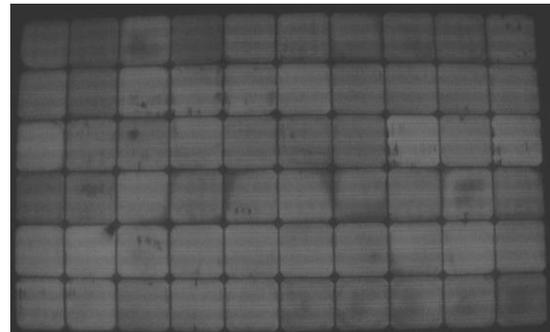


Figura 6 – Imagem de EL do módulo FV antes do ensaio de PID.

As imagens do módulo fotovoltaico após cada ciclo do ensaio são apresentadas na Figura 7. A mudança no padrão da imagem é perceptível, uma vez que pelo menos uma dúzia de células apresentaram escurecimento após o ensaio de degradação, principalmente células localizadas próximo à moldura do módulo fotovoltaico.



(a) Degradação



(b) Recuperação

Figura 7 – Imagens de EL de um módulo após ciclos de degradação (a) e recuperação (b) do ensaio de PID.

A imagem após o ciclo de recuperação, Fig. 7(b), possui o mesmo padrão da imagem inicial, Fig. 6, sugerindo que houve recuperação total. Isto foi comprovado a partir de medidas em um simulador solar no início do experimento e ao final de cada ciclo, que mostram que efetivamente houve recuperação total após a amostra ter sofrido degradação de 10% na potência nominal.

4. Conclusões

Ensaio de propensão à degradação ocasionada por diferentes fatores, como a PID, prevêem a utilização de imagens em EL como método auxiliar. Este trabalho mostrou que a solução apresentada é prática e eficaz na análise de imagens em eletroluminescência para diferentes aplicações.

As condições para realizar a medida e a instrumentação necessárias são de fácil acesso em laboratórios de ensino e pesquisa. A adaptação de câmeras fotográficas convencionais para que sejam sensíveis à emissão eletroluminescente de módulos fotovoltaicos também pode ser utilizada na capacitação de recursos humanos da área de sistemas fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- Behrens, G., Domnik, A., Mertens, K., Arnds, A., Diehl, M., 2017. Digital Image Processing Algorithms for Quality-Enhancement of Electroluminescence Picturing in PV-Fields. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdã.
- Guo, S., Schneller, E., Davis, K. O., Schoenfeld, W. V., 2016. Quantitative analysis of crystalline silicon wafer PV modules by electroluminescence imaging. IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- Köntges, M.; Siebert, M.; Hinken, D., 2009. Quantitative analysis of PV-modules by electroluminescence images for quality control. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburgo.
- Martínez, O., Guada, M., Moretón, A., Rodríguez-Conde, S., González, M.A., Jiménez, J., Pérez, J., Martínez, M., Florez, J.A., Silva, H., Velasco, A., Pérez, L., Parra, V., 2017. Implementation of a Friendly Daylight Electroluminescence System for the Inspection of Solar PV Panels. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdã.
- McEnvoy, A., Markvart, T., Castañer, L., 2011. Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications. Academic Press, 2ª edição.
- IEC TS 60904-13, 2017. Photovoltaic Devices Part 13: electroluminescence of photovoltaic modules (Draft).

LOW COST SOLUTION FOR ELECTROLUMINESCENCE IMAGES OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *This work presents a low cost solution to obtain electroluminescence images of photovoltaic modules. The principles of operation, the applications of the technique and the instrumentation required to perform the measurements are presented. The adaptation of standard CCD photograph cameras may be an alternative to acquire electroluminescence images in the laboratory and in the field. The functionality of the alternative is proved as operational photovoltaic modules were excited to obtain the image of its electroluminescence emission. The images of different cameras – one adapted and another available on the market – are presented and compared. The solution presented in this work is also feasible to assess the propensity to potential induced degradation (PID), as it can be seen in the results of a PID laboratory test.*

Key words: *Electroluminescence, Photovoltaic module, Test*