

ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE ELETROLUMINESCÊNCIA E DE CORRENTE ELÉTRICA PRODUZIDA POR FEIXE LASER EM CÉLULAS SOLARES

Bruno Krever Lopes – Bruno.krever@acad.pucrs.br

Adriano Moehlecke – moehleck@pucrs.br

Augusto dos Santos Kochenborger – augustokochen@gmail.com

Izete Zanesco – izete@pucrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Escola Politécnica,
Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar)

Resumo. O crescimento exponencial da indústria de módulos fotovoltaicos amplia a demanda de técnicas de controle de qualidade para células e módulos fotovoltaicos. A técnica LBIC (*light-beam induced current* - corrente elétrica induzida por feixe luminoso) é não destrutiva e amplamente utilizada em laboratórios de pesquisa para estudo e controle de qualidade de células solares. Embora essa técnica forneça informações detalhadas sobre os defeitos nas células solares, sua aplicabilidade na indústria é limitada, devido ao elevado tempo de processamento. A eletroluminescência (EL) é uma técnica que consiste em fotografar a célula durante a excitação por meio de uma diferença de potencial, fazendo com que emita radiação eletromagnética na faixa do infravermelho. Na indústria de módulos fotovoltaicos e em sistemas fotovoltaicos, esta técnica está sendo utilizada para identificação de células solares com microfissuras e defeitos, que não poderiam ser identificadas por inspeção visual. Nesse artigo é realizada uma análise comparativa das técnicas de EL (com câmera fotográfica digital simples) e LBIC com o objetivo de encontrar uma correlação entre o brilho obtido nas imagens de EL e os mapas de comprimento de difusão de portadores minoritários (L_D) obtidos pela técnica LBIC. Foram comparadas a distribuição bidimensional de L_D e a imagens de EL de células solares de silício multicristalino com estrutura n^+pp^+ . Os resultados indicaram semelhanças entre as imagens de EL e mapas de LBIC, observando-se que as regiões de menor brilho nas imagens EL correspondem a regiões de menor L_D . Os resultados também apontam ser possível obter imagens satisfatórias de EL mesmo com uma câmera simples, contudo aplicando uma tensão elétrica de polarização direta maior que 6 V. Portanto, este método de menor custo e de menor tempo de processamento poderá ser utilizado para análise do L_D .

Palavras-chave: Células solares, eletroluminescência, LBIC.

1. INTRODUÇÃO

No último século está se tornando cada vez mais necessária a substituição do atual sistema energético de origem fóssil pelas fontes de energia renovável, com o intuito de preservar o meio ambiente e diminuir consideravelmente os custos de produção de energia. Dentre as diversas tecnologias associadas à fontes de energia renovável, a energia solar fotovoltaica cresceu consideravelmente nos últimos anos, podendo futuramente tornar-se a tecnologia com maior representatividade no cenário brasileiro, abastecendo 32 % da demanda energética do país até 2040 (Ramos *et al.*, 2018).

A indústria de células solares vinha utilizando silício multicristalino e a estrutura n^+pp^+ , com região n^+ dopada com fósforo e uma região p^+ de BSF (*back surface field*) formada por pasta de alumínio depositada por serigrafia e difusão em forno de esteira. As eficiências obtidas com esses dispositivos na indústria atingem entre 16 % e 17 % (Battaglia; Cuevas; De Wolf, 2016). Atualmente, as células solares com emissor e face posterior passivadas (PERC - *passivated emitter and rear cell*) são as mais utilizadas na indústria de módulos fotovoltaicos, sendo previsto que será a estrutura preponderante na próxima década (ITRPV, 2021). O desempenho da célula solar é afetado diretamente por defeitos estruturais e de processamento. Sendo assim técnicas não destrutivas que permitem detectar esses defeitos são cada vez mais importantes no cenário industrial (Kaminski *et al.*, 2004).

A técnica da medição da corrente de curto-circuito induzida por um feixe de radiação monocromática (LBIC - *light-beam induced current*) é não destrutiva e permite a detecção de variações na corrente elétrica devido a efeitos de recombinação que geram variações no comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários (Kaminski *et al.*, 2004). O método do LBIC é baseado na medição ponto a ponto da corrente elétrica. Radiação laser de um comprimento de onda específico incide sobre um determinado ponto da célula solar e, então, é medida a corrente elétrica gerada no ponto. A corrente elétrica medida representa a corrente de curto-circuito (I_{SC}), que corresponde a corrente elétrica máxima que se pode obter na célula solar. A medida é repetida ponto a ponto em toda a célula solar, sendo que quanto maior a I_{SC} , maior a geração e coleta de pares elétrons-lacunas e menores as taxas de recombinação. A Fig. 1 mostra um mapa da distribuição bidimensional da corrente de curto-circuito. Se forem utilizados diodos laser com diferentes comprimentos de onda e for determinada a corrente elétrica produzida pela irradiância de cada laser e a refletância da superfície, pode-

se calcular a eficiência quântica interna (EQI) e estimar o comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários (L_D). A EQI refere-se à eficiência com a qual os fótons que não são refletidos ou transmitidos na célula podem gerar portadores de carga coletáveis. O L_D é estimado pela intersecção da reta de $1/EQI$ com o eixo x, que corresponde ao inverso do coeficiente de absorção (α) (Schroder, 2005), conforme mostrado na Fig. 2. Para realizar a medição com diferentes diodos laser necessita-se de aproximadamente 8 horas para obtenção de mapas de L_D de células solares. Embora a técnica de LBIC permita obter informações altamente detalhadas sobre os defeitos nas células solares, sua aplicabilidade na indústria é limitada. Isso se deve a um problema comum relacionado a técnica de LBIC, que é o elevado tempo de medição (Geisthardt e Sites, 2014).

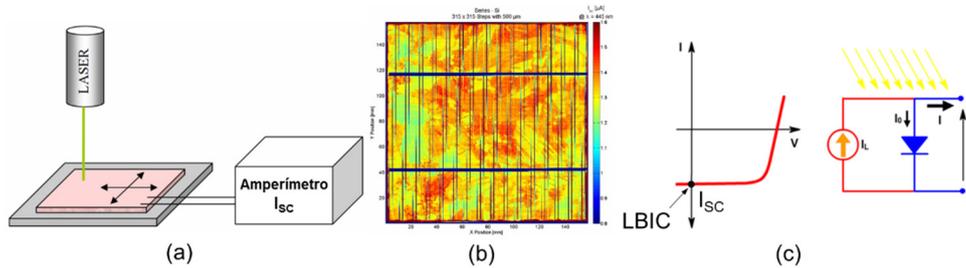


Figura 1 - (a) Esquema de montagem experimental para o uso do método LBIC, (b) diagrama bidimensional de I_{sc} e (c) ponto de operação na curva I- V de uma célula solar.

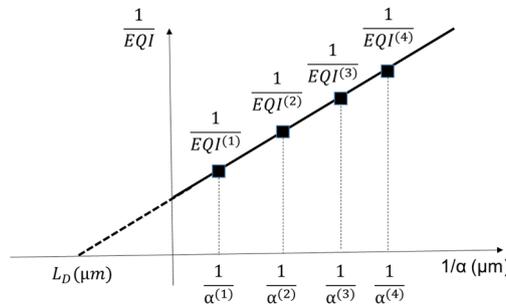


Figura 2 - Relação entre o inverso da eficiência quântica interna (EQI) e o inverso do coeficiente de absorção (α) de uma célula solar (Schroder, 2005).

A técnica de eletroluminescência (EL) vem adquirindo um amplo destaque tanto nos laboratórios de pesquisa quanto na indústria de células solares. Isso se deve ao fato das imagens de EL fornecerem informações espaciais do desempenho das células solares com alta resolução e em menos de um segundo (Fuyuki e Tani, 2011). Nesta técnica, o dispositivo é mantido no escuro e aplica-se uma tensão elétrica para que opere em polarização direta, com correntes elétricas similares ao valor da corrente de curto-circuito (quando o dispositivo é submetido a irradiância padrão de 1000 W/m^2). Assim, devido a recombinação radioativa presente em semicondutores, a célula solar passa a agir como um diodo emissor de luz (LED). A Fig. 3 mostra a montagem experimental para obtenção de imagens de EL.

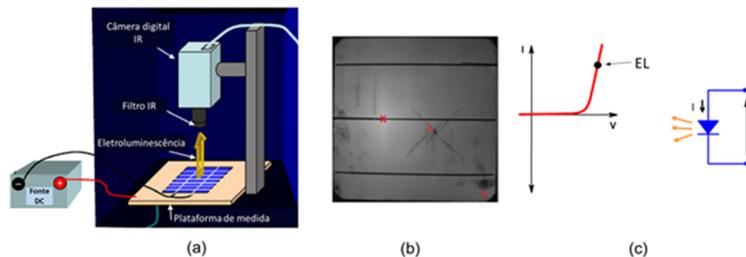


Figura 3 - (a) Esquema básico para obtenção de imagens de eletroluminescência (EL); (b) Imagem de eletroluminescência e (c) Curva I-V e ponto de operação da célula solar (ponto EL), mantida no escuro, para emissão de radiação infravermelha.

Nessas condições, a célula emite radiação eletromagnética na faixa do infravermelho com comprimentos de onda entre 1000 nm e 1200 nm . Os fotodetectores comumente usados para essa técnica são os sensores de silício (Si-CCD) e os de arseneto de índio e gálio (InGaAs). Embora os fotodetectores de InGaAs possuam uma sensibilidade a faixas de comprimentos maiores que o Si-CCD, os fotodetectores de silício apresentam resoluções melhores e um custo inferior (Crozier *et al.*, 2009). A Fig. 4 indica a sensibilidade do Si-CCD, em relação a eficiência quântica da célula solar e a eletroluminescência emitida.

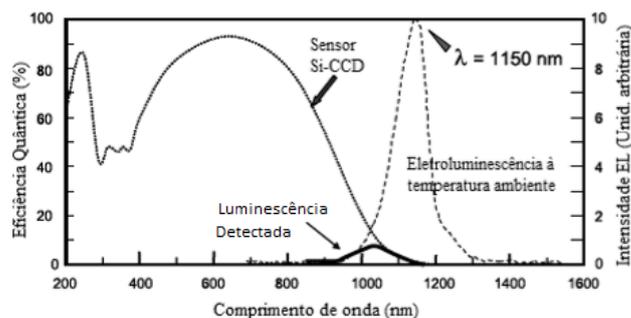


Figura 4 - Espectro de emissão e sensibilidade do Si-CCD (Santos, 2016).

As câmeras de infravermelho utilizadas para a EL são equipamentos de alto custo. Entretanto é possível obter imagens de EL com câmeras digitais comuns com CCD (dispositivo de carga acoplada) de silício, apenas removendo seu filtro de infravermelho, diminuindo consideravelmente o custo para a realização desta técnica (Frazão, 2016; Frazão *et al.*, 2017; Pedrosa Filho e Teixeira, 2019).

A relação entre a eletroluminescência e o comprimento de difusão foi descrita inicialmente por Fuyuki *et al.* (2005) e testada novamente por Würfel *et al.* (2007). Eles demonstraram experimentalmente que o comprimento de difusão de uma célula solar pode ser obtido por meio da medida da irradiância ou luminescência local que gera uma imagem de EL, supondo que a irradiância varie linearmente com o comprimento de difusão. Contudo qualquer alteração na tensão pode resultar em grandes erros no cálculo do comprimento de difusão já que a irradiância emitida pelo dispositivo está associada exponencialmente à tensão aplicada (Würfel *et al.*, 2007). Segundo Fruehauf e Turek (2015), a quantidade de fótons emitidos pela célula solar durante o processo de eletroluminescência depende de mecanismos de recombinação, das propriedades ópticas do material que compõe a célula e da tensão aplicada na mesma. A Eq. (1) relaciona a dependência da emissão da luminescência local ($\phi(x)$), com a tensão elétrica, onde $V(x)$ corresponde à tensão num determinado ponto x e $C(x)$ ao fator de calibração que se relaciona com as propriedades óticas da célula solar e da câmera fotográfica e V_T é a tensão térmica (Fruehauf e Turek, 2015):

$$\phi(x) = C(x)\exp\left(\frac{V(x)}{V_T}\right) \quad (1)$$

O objetivo deste trabalho é comparar as imagens obtidas pela técnica de eletroluminescência com mapas de comprimento de difusão de portadores minoritários (L_D) obtidos pela técnica LBIC (*light beam induced current*). São apresentados resultados experimentais e a análise comparativa de imagens de EL e da distribuição bidimensional de L_D em células solares de silício multicristalino com o objetivo de obter uma ferramenta de menor custo e de menor tempo de processamento para obtenção do L_D .

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação da câmera fotográfica

O primeiro passo para a realização deste trabalho foi modificar uma câmera fotográfica simples com um CCD de silício para que ela fosse capaz de detectar radiação no espectro infravermelho. A câmera utilizada foi a Sony cyber shot DSC W570, disponível no laboratório. Esta câmera possui, como a maioria das câmeras fotográficas, um filtro de infravermelho e foi necessário removê-lo para obter imagens de EL. O passo a passo consiste em remover as capas protetoras de plástico da parte frontal e posterior da câmera, depois remover o compartimento na qual está disposta a tela digital da câmera, e logo abaixo é possível visualizar o filtro de infravermelho (que consiste em uma pequena película de tom verde) que foi removido utilizando uma pinça. A Fig. 5 mostra o passo a passo descrito.

2.2 Especificações da Sony cyber shot DSC W570

O CCD de uma câmera corresponde a um sensor feito de materiais semicondutores que converte a radiação eletromagnética em sinais elétricos. O sensor é coberto por um filtro com seções do tamanho de pixels que separa a luz em três canais de cores RGB (Red, Green and Blue/ Vermelho, Verde e Azul). Cada cor possui 256 tonalidades proporcionando aproximadamente 16 milhões de combinações de cores. A câmera Sony cyber shot DSC W570 possui um CCD modelo Super HAD $\frac{1}{2}$.3 de 7,75 mm desenvolvido pela Sony (DSC-W570 Especificações | Sony PT [s.d.]). A câmera possui 16,1 megapixels efetivos, ou seja, é capaz de gerar imagens com aproximadamente 16 milhões de pixels.

A Sony cyber shot DSC W570 não permite variar o tempo de exposição da câmera, que corresponde ao tempo que leva para adquirir uma imagem, ou seja, o tempo em que a radiação é detectada pelo sensor. A única forma de variar o tempo de exposição nessa câmara é indiretamente alterando sua sensibilidade a luz ou ISO, que pôde ser variado em três

categorias: ISO 800, ISO 1600 ou ISO 3200 sendo que quanto maior o número ISO, maior a sensibilidade do sensor à luz. No ISO máximo de 3200, o tempo de exposição corresponde a um segundo.

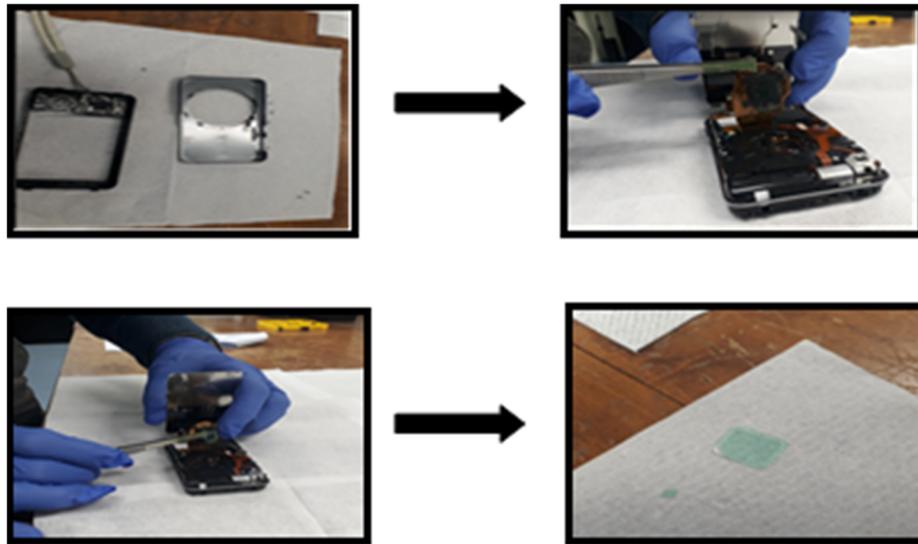


Figura 5 - Etapas para remoção do filtro de infravermelho da câmera digital.

2.3 Sistema experimental

A execução da técnica de eletroluminescência com câmera de baixa sensibilidade exige que a célula solar esteja inserida em um ambiente sem iluminação. Assim, fez-se necessário construir uma caixa com dimensões de 56 cm x 20 cm x 20 cm. A largura de 56 centímetros foi definida para que a caixa preencha toda a plataforma com controle da temperatura na qual a célula solar foi colocada, e a altura foi dimensionada de forma a se conseguir adquirir imagens de dispositivos com 61,58 cm² e 36 cm², levando em conta a distância focal da câmera. As áreas anteriormente citadas são relativas a células solares de silício monocristalino e multicristalino, respectivamente, desenvolvidas no NT-Solar/PUCRS. A câmera fotográfica durante a realização do EL fica acoplada na parte superior da caixa na qual foi realizado um furo com as dimensões da lente da câmera Sony cyber shot DSC W570. Assim, quando a câmera é acoplada, evita-se a entrada de luz. Utilizou-se a plataforma termostática de um simulador solar e a fonte de tensão/corrente e amperímetro usados neste equipamento para caracterização de células solares. Foram analisadas células solares de silício monocristalino e multicristalino com a técnica de EL. As células solares de silício monocristalino foram utilizadas na etapa inicial de ajuste de parâmetros elétricos para obtenção de imagens de EL.

O equipamento WT-2000PV, da Semilab, mostrado na Fig. 6, foi utilizado para a medição da corrente de curto-circuito induzida por um feixe de radiação monocromática, utilizando-se quatro diferentes comprimentos de onda da radiação laser: 973 nm, 953 nm, 845 nm e 648 nm. A partir da medida da corrente de curto-circuito e da refletância da superfície, pode-se estimar o comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários. Neste equipamento, um diodo laser, de comprimento de onda específico, produz radiação laser que incide sobre um ponto da célula solar colocada sobre uma plataforma, obtendo-se um diagrama bidimensional da corrente de curto-circuito, refletância e comprimento de difusão de portadores de carga minoritários. Foram analisadas 10 células solares de silício multicristalino de estrutura n⁺pp⁺ com a técnica de LBIC.



Figura 6 - (a) Equipamento WT-2000PV, da Semilab, para caracterização de células solares mediante a técnica LBIC e (b) detalhe do cabeçote com os lasers usados.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 Ajuste de parâmetros para obtenção de imagens de eletroluminescência

A primeira etapa das medidas consistiu na realização de testes preliminares de EL com células solares de silício monocristalino com estrutura n^+pp^+ . Durante a obtenção de imagens de EL das células solares, foram variados os parâmetros elétricos de tensão e corrente aplicados na célula solar e o ISO da câmera, que pôde ser variado de três valores: ISO 800, ISO 1600 ou ISO 3200. Os parâmetros de tensão utilizados foram definidos a partir de uma revisão bibliográfica de estudos de eletroluminescência (Frazão, 2016; Frazão *et al.*, 2017; Sánchez *et al.*, 2018; Pedrosa e Teixeira, 2019), sendo de: 0,8 V, 1 V, 1,4 V e 2 V. A Fig. 7 apresenta algumas das imagens de EL obtidas.

Os testes iniciais com as células de silício monocristalino apontaram que só é possível visualizar o efeito de EL com a câmera utilizada aplicando no mínimo 1,4 V de tensão elétrica na célula solar, que resulta em uma corrente de 3 A. Frazão e colaboradores (Frazão *et al.*, 2017 e Frazão, 2016) foram capazes de detectar imagens a partir de 0,6 V aplicados na célula solar. Contudo, a câmera utilizada era classificada como semiprofissional, sendo que, para obter imagens satisfatórias fazia-se necessário um tempo mínimo de 6 minutos de exposição para captura da imagem. A câmera Sony cyber shot DSC W570 não permite controlar diretamente o tempo de exposição da câmera, sendo possível apenas variá-lo indiretamente alterando o ISO e obtendo o máximo tempo de exposição de 1 s.

Todos os testes foram realizados com a mesma câmera, sob temperatura controlada (25 °C). Para aumentar a intensidade do efeito de EL e, conseqüentemente, a qualidade da imagem obtida optou-se por aplicar valores de tensão e corrente maiores que os apresentados na literatura (Frazão, 2016; Frazão *et al.*, 2017; Sánchez *et al.*, 2018).

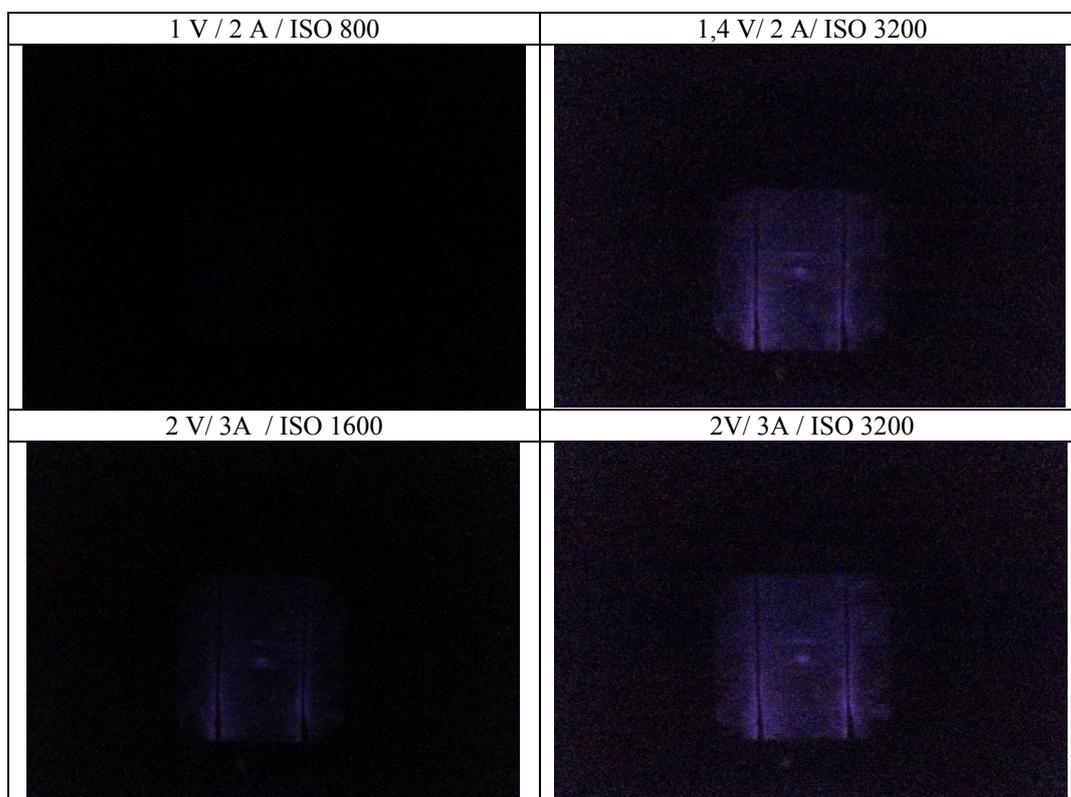


Figura 7 - Imagens obtidas durante os testes preliminares de EL. Para cada imagem se apresenta a tensão elétrica aplicada, corrente elétrica medida e ISO ajustado na câmera.

3.2 Caracterização das células solares de silício multicristalino

Foram analisadas 10 células solares de silício multicristalino com estrutura n^+pp^+ e área de 36 cm² (60 mm x 60 mm). Estas células solares foram selecionadas para a análise por apresentar fronteiras de grão em sua estrutura, ou seja, apresentam uma quantidade maior de zonas de recombinação em relação aos dispositivos de silício monocristalino, facilitado a visualização de defeitos tanto nas imagens de EL quanto nos mapas de LBIC. Para obter as imagens de EL das células de silício multicristalino variou-se a corrente elétrica em 6, 8 e 10 A.

Para analisar de forma comparativa os mapas de LBIC com as imagens de EL, utilizou-se o software ImageJ (ImageJ, 2021). Esse é um programa gratuito de domínio público desenvolvido no National Institutes of Health destinado a processamento de imagens digitais. Esse *software* possui um layout simples e intuitivo, permitindo realizar diversos

processos como alterar o formato da imagem, obter o histograma, realizar operações matemáticas entre as imagens, etc. A primeira etapa da análise consistiu em comparar imagens de EL adquiridas de uma mesma célula, porém com aplicação de tensões e correntes elétricas distintas, a fim de se observar as variações na intensidade de EL. Para essa etapa não foi necessário realizar qualquer modificação nas imagens visto que elas foram adquiridas com a mesma câmera, com as mesmas condições de luminosidade e tempo de exposição, variando-se apenas a corrente elétrica aplicada. A fim de analisar graficamente as imagens foi selecionada uma linha de pixels de forma a abranger zonas de defeitos identificados visualmente em ambas. Na Fig. 8 são apresentadas duas imagens de EL obtidas com as células solares no escuro e com corrente elétrica de 8 A e 6 A. Foram traçadas duas linhas de pixels nestas imagens e na Fig. 9 apresentam-se os resultados de intensidade correspondentes.

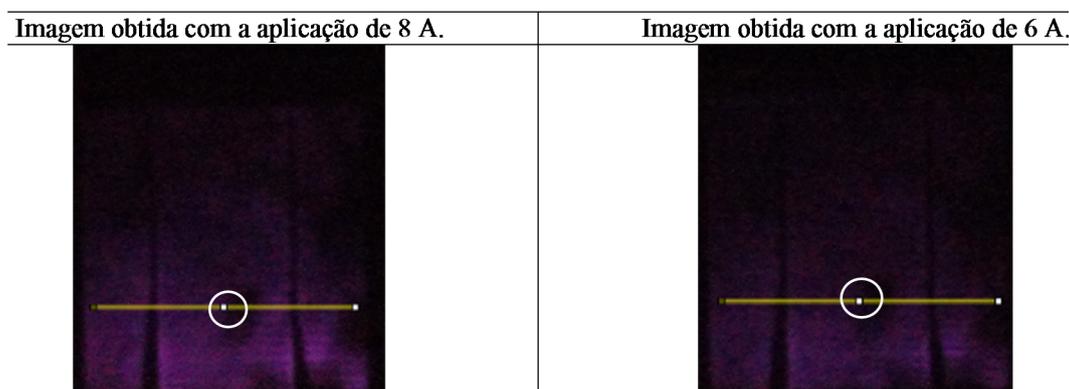


Figura 8 - Imagens de EL com diferentes correntes elétricas aplicadas em uma célula solar de silício multicristalino.

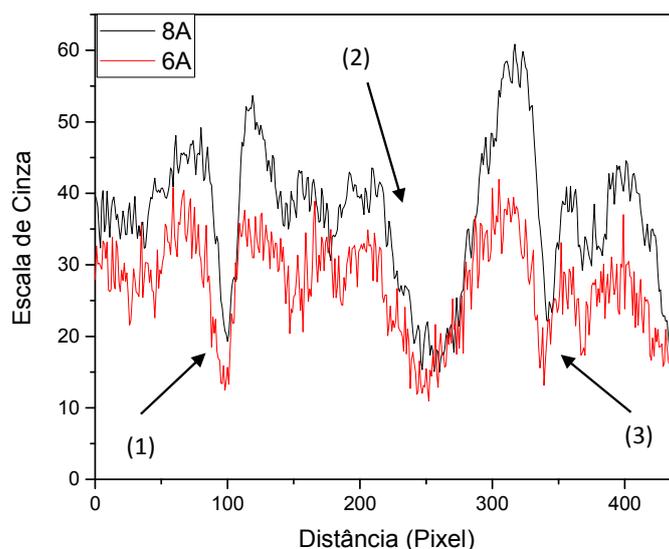


Figura 9 - Variação da intensidade na imagem de EL em termos de nível de cinza ao longo das linhas de pixels identificadas na Fig. 8.

As regiões assinaladas na Fig. 9 (1 e 3) correspondem respectivamente as trilhas metálicas da célula, enquanto a região 2 corresponde a uma zona escura presente na imagem entre as trilhas, sendo possível visualizá-la nas imagens presentes na Fig. 8. Essa zona escura corresponde a um centro de recombinação ocasionado provavelmente pela presença de impurezas na região. Analisando a Fig. 9, não se identificam diferenças significativas entre os perfis traçados, apenas na intensidade dos valores correspondentes na escala de cinza. Assim, embora a imagem de EL obtida com 8 A seja visualmente mais clara, a análise gráfica demonstra que com 6 A já é possível identificar os defeitos presentes na célula solar. A maior dificuldade para a visualização de defeitos nas imagens de EL está no processo de captura da imagem, relacionado ao baixo tempo de exposição disponível. Optou-se por utilizar as imagens de EL obtidas com 8 A de corrente para a comparação com os mapas de LBIC.

A Fig. 10 apresenta imagens de EL e mapas de L_D obtidos por LBIC na qual já se pode observar visualmente a existência de regiões com menor L_D nos mapas de LBIC e de menor brilho nas imagens de EL, destacando a existência de defeitos nas células solares. Nos mapas de LBIC, a cor vermelha corresponde a L_D da ordem de 90 μm a 100 μm , os menores valores obtidos nestas células solares.

A segunda etapa da análise no *software* ImageJ consistiu em traçar uma linha de pixels em regiões equivalentes entre as imagens de EL e os mapas de LBIC, a fim de realizar uma comparação gráfica entre ambas. Porém antes de poder

realizar a análise quantitativa, foi necessário passar as imagens de EL e os mapas de LBIC por uma série de processos a fim de torná-los semelhantes. Primeiramente fez-se necessário recortar as imagens e redimensioná-las por interpolação bi linear que utiliza a média ponderada dos pixels originais que se encontram ao redor do novo pixel de modo a deixar as imagens e os mapas com um mesmo número de pixels. As imagens de EL originais possuíam 1920 pixels de largura e 1080 pixels de altura, enquanto os mapas de LBIC, 315 pixels de largura por 334 de altura, sendo ambas redimensionadas para um tamanho de 253x247 pixels. O segundo passo foi alterar os canais de cores das imagens e dos mapas para uma escala de cinza de 8 bits. Essas conversões eliminam parte da informação presente nas imagens sendo que parte dos dados originais acabam por serem perdidos. Porém, como as imagens de EL e os mapas de LBIC advêm de fontes distintas, as modificações eram necessárias para poder compará-las. A Fig. 10 apresenta um mapa de LBIC e a imagem de EL da célula solar 01 P40 após a etapa de correções e a Fig. 11 mostra a resultante das linhas de pixels indicada.

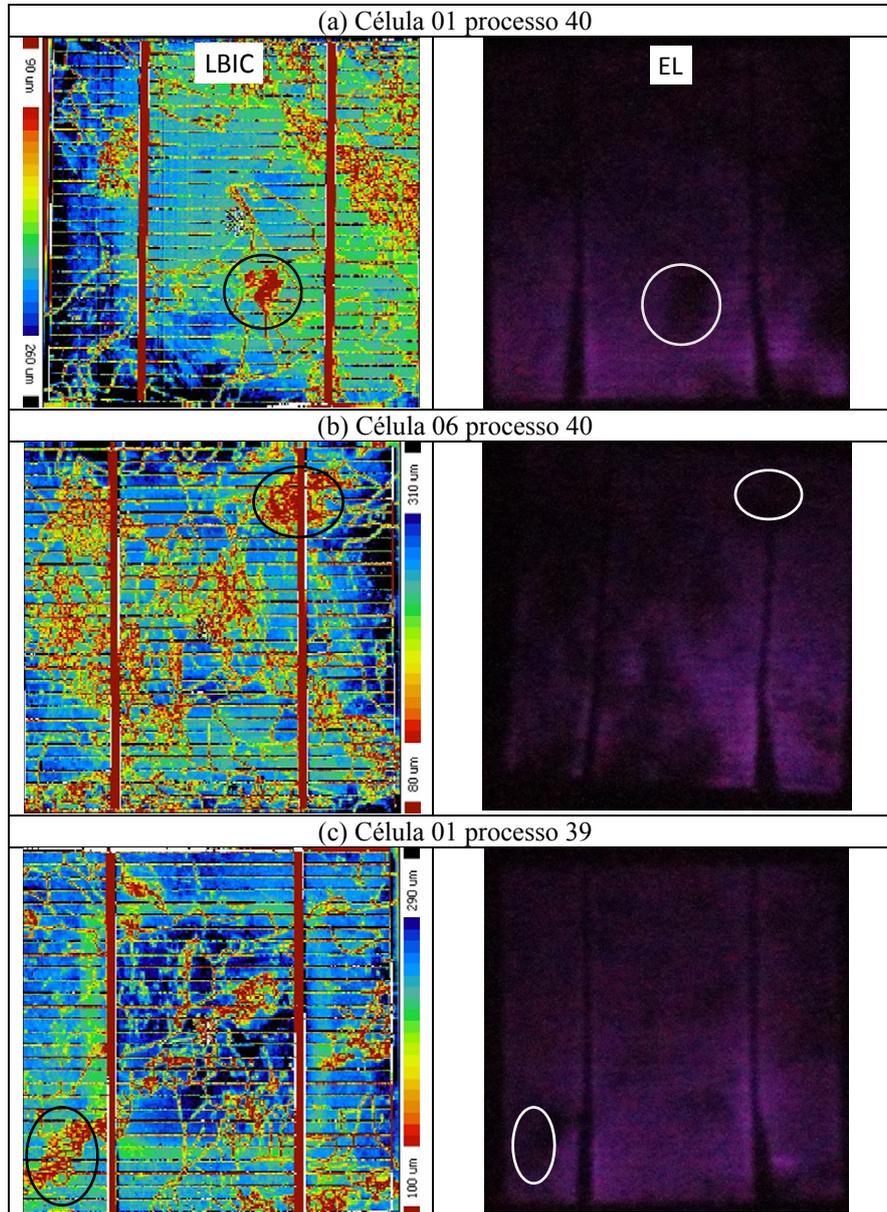


Figura 10 - Mapas de LBIC, com escala de cores indicando o intervalo de L_D e imagens de EL de células solares de silício multicristalino.

Essa célula solar (01 P40) foi escolhida para análise por apresentar uma região defeituosa visualmente clara entre as trilhas metálicas, um pouco abaixo do centro, já evidenciada na imagem e no mapa original disponível na Figura 10.a. Graficamente observa-se que essa região é representada por uma queda na luminosidade, formando um “vale” entre os pixels 125 e 150. A fim de se analisar as semelhanças entre os dados, ambos os gráficos foram normalizados utilizando o software de análise gráfica Origin (<https://www.originlab.com/>), resultando no gráfico apresentado na Fig. 13.

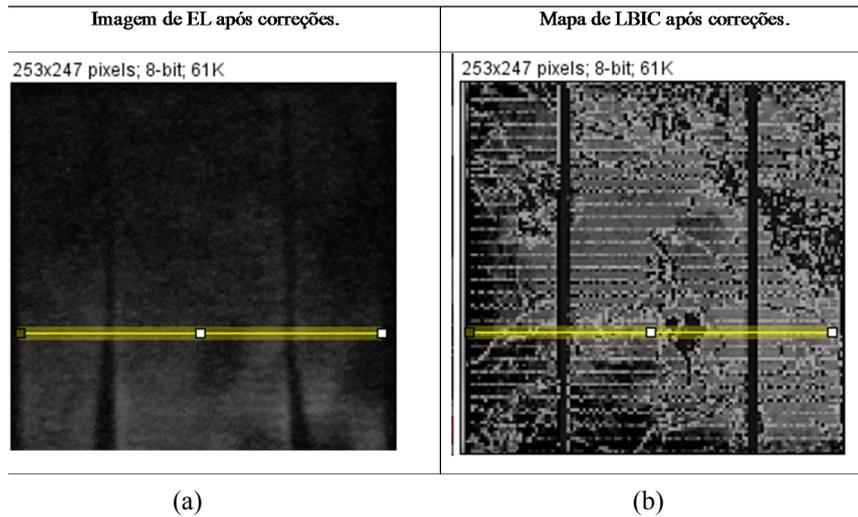


Figura 11 - (a) Imagem de EL e (b) distribuição de L_D (em escala de cinza) obtida por LBIC da célula 01 P40, após as correções para análise.

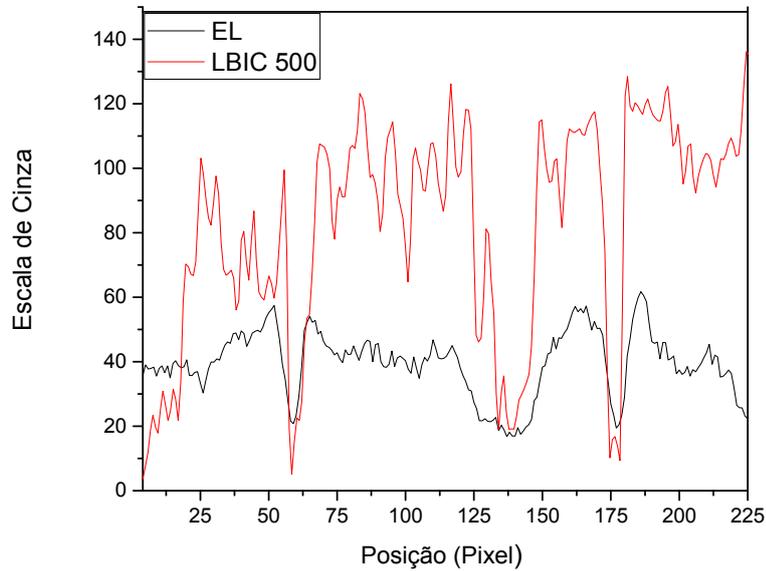


Figura 12 - Comparação entre os níveis de cinza (brilho na imagem monocromática) originados das linhas de pixels identificadas na Fig. 11.

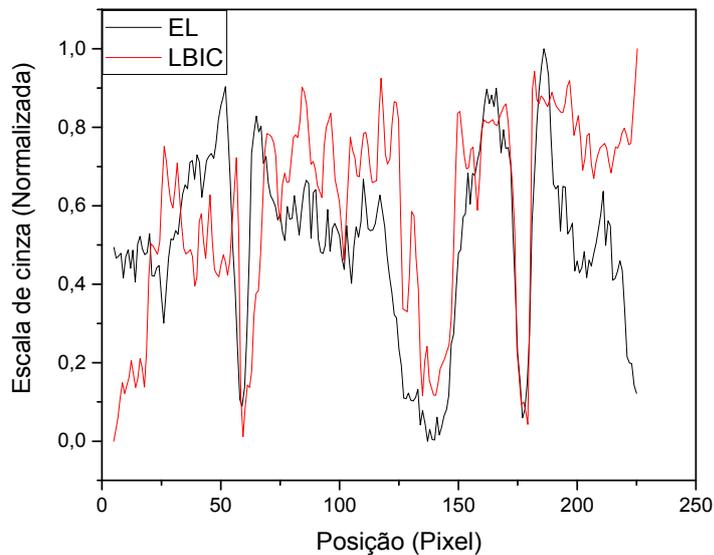


Figura 13 - Comparação entre níveis de cinza normalizados das linhas de pixels identificadas na Fig. 11.

Analisando a Fig. 13 nota-se que há uma maior semelhança nas regiões de baixos valores na escala de cinza, ou seja, as regiões na qual se encontram as trilhas metálicas ou zonas de alta recombinação, indicando que a detecção de regiões com defeitos ou contaminantes na célula solar mesmo com uma câmera fotográfica simples. Embora o resultado obtido da célula 01 P40 seja promissor, esse resultado não se repetiu em todos os gráficos resultantes das linhas de pixels, sendo que alguns apresentaram grandes diferenças nas escalas de cinza, como se pode observar na Fig. 14, resultados obtidos da célula 01 P39 (imagem disponível na Fig. 10.c). Na Fig. 14 é possível observar semelhanças nas regiões que representam as trilhas metálicas. Contudo, não é possível identificar semelhanças nas regiões restantes do gráfico. Esta célula solar analisada contém mais defeitos em pequenas regiões que a célula representada na Fig. 13. O uso da câmera digital simples, com tempo de exposição limitado, não permite a correlação de brilho da imagem com os valores de L_D obtidos do LBIC quando as diferenças entre L_D para diferentes regiões é relativamente pequena ou os defeitos são de área relativamente pequena, como os aparentes na célula 01 P39.

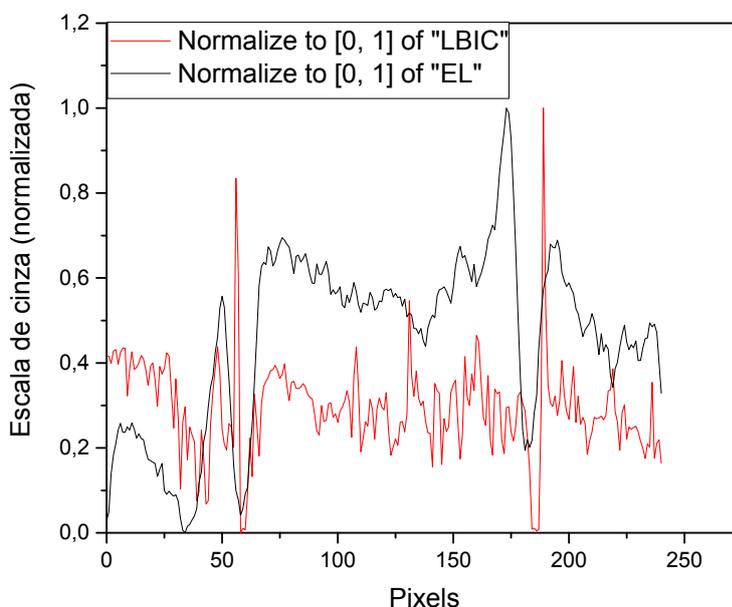


Figura 14 - Comparação entre níveis de cinza (normalizado) das imagens de EL e de LBIC originados das linhas de pixels da célula 01 P 39.

4. CONCLUSÕES

Nesse artigo apresentou-se a análise qualitativa-comparativa da técnica de LBIC com a técnica de eletroluminescência em células solares de silício. A câmera utilizada para a obtenção das imagens de EL foi a Sony cyber shot DSC W570 que possui um CCD de silício, sendo capaz de captar a radiação no infravermelho após a remoção do filtro. As imagens de eletroluminescência obtidas tanto para células solares de silício multicristalino quanto monocristalino, permitiram identificar defeitos/zonas de recombinação dos portadores de carga minoritários por inspeção visual da imagem. Contudo foi necessário aplicar valores de tensão pelo menos 10 vezes maiores que os comumente utilizados para essa técnica, já que a câmera utilizada não permite variar o tempo de exposição.

As imagens de EL em células solares de silício multicristalino foram comparadas qualitativamente com os mapas de L_D , por meio dos parâmetros de intensidade de pixel, a fim de identificar a possibilidade de se obter o L_D utilizando câmeras fotográficas simples, pela técnica proposta. Os gráficos resultantes da análise indicaram uma grande similaridade nos valores de intensidade nas regiões defeituosas das células, indicando que é possível estimar o L_D de regiões de alta recombinação dos portadores de carga minoritários mediante o uso de imagens de EL. Entretanto, com a câmera utilizada, observou-se que há uma limitação de área do defeito a ser detectado para estabelecer a correlação entre imagem de EL e de distribuição bidimensional de L_D obtida por LBIC.

Novas medidas e comparações entre imagens de EL e LBIC continuarão a ser realizadas em células solares de silício para a obtenção de uma correlação entre ambas e possibilitar o uso de imagens de EL para estimar o comprimento de difusão de portadores de carga minoritários.

Agradecimentos

Os autores agradecem as bolsas de estudos concedidas pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científica e Tecnológico) e pela FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul) para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Battaglia, C., Cuevas, A., De Wolf, S., 2016. High-efficiency crystalline silicon solar cells: Status and perspectives. *Energy and Environmental Science*, v. 9, n. 5, pp. 1552–1576.
- Crozier, J.L., Van Dyk, E.E., Vorster, F.J., 2009. High resolution spatial electroluminescence imaging of photovoltaic modules. Nelson Mandela Metropolitan University. Disponível em: [http://www.crses.sun.ac.za/files/services/conferences/annual-student-symposium-2012/23 November/11 Crozier.pdf](http://www.crses.sun.ac.za/files/services/conferences/annual-student-symposium-2012/23%20November/11%20Crozier.pdf)
- DSC-W570 Especificações | Sony PT. Disponível em: <https://www.sony.pt/electronics/support/compact-cameras-dscw-series/dsc-w570/specifications>. Acesso em: 30 nov. 2021.
- Frazão, M., Silva, J.A., Lobato, K., Serra, J.M., 2017. Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera. *Measurement*, 99, pp. 7-12.
- Frazão, M.S., 2016. Eletroluminescência de Células Solares. Dissertação de mestrado. Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Fruehauf, F., Turek, M., 2015. Quantification of Electroluminescence Measurements on Modules. 1 ago. 2015, [S.l.]: Elsevier Ltd, pp. 63–68. Acesso em: 15 jun. 2021.
- Fuyuki, T. *et al*, 2005. Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence. *Applied Physics Letters*, v. 86, n. 26, pp. 1–3, 27 jun. 2005. Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1978979>. Acesso em: 17 jun. 2021.
- Fuyuki, T., Tani, A., 2011. Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells by electroluminescence. Springer, New York, NY, pp. 159–162. Acesso em: 14 jun. 2021.
- Geisthardt, R.M., Sites, J.R., 2014. Nonuniformity characterization of CdTe solar cells using LBIC. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 4, n. 4, pp. 1114–1118.
- ImageJ, 2021. <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>. Acesso em 20/07/2021.
- ITRPV- International Technology Roadmap for Photovoltaics, 2020 Results, 2021. 12th edition. Disponível em: <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads>>. Acessado em 4 de junho de 2021.
- Kaminski, A. *et al.*, 2004. Light beam induced current and infrared thermography studies of multicrystalline silicon solar cells. *Journal of Physics Condensed Matter*, v. 16, n. 2, pp. 8–18, 2004.
- Pedrosa Filho, M.H., Teixeira, V.A., 2019. Low cost electroluminescence lab implementation. ISES Solar World Congress, Santiago, Chile, pp. 1-7. Disponível em: <http://proceedings.ises.org/paper/swc2019/swc2019-0082-OliveiraPedrosaFilho.pdf>
- Ramos, C. *et al.*, 2018. Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. Sebrae, p. 364. Disponível em: [http://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal Sebrae/Anexos/estudo energia fotovoltaica - baixa.pdf](http://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/estudo%20energia%20fotovoltaica%20-%20baixa.pdf).
- Schroder, D. K., 2005. Semiconductor Material and Device Characterization. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/0471749095>. Acesso em: 14 jun. 2021.
- Würfel, P. *et al.*, 2007. Diffusion lengths of silicon solar cells from luminescence images. *Journal of Applied Physics*, v. 101, n. 12.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTROLUMINESCENCE AND LIGHT-BEAM INDUCED CURRENT TECHNIQUES IN SOLAR CELLS

Abstract. *The exponential growth of the solar cell industry increases the demand for quality control techniques for photovoltaic cells and modules. LBIC (light-beam induced current) is a non-destructive mapping technique widely used in research laboratories for the study and quality control of solar cells. Although this technique provides highly detailed information about defects in solar cells, its applicability in industry is limited due to the high processing time. Electroluminescence is an imaging technique, which consists of photographing the cell during its excitation through a electric potential difference, causing it to emit electromagnetic radiation in the infrared range. In the photovoltaic industry and PV systems, this technique is being used to identify solar cells with micro-cracks and contamination, which could not be identified by visual inspection. This article proposes a comparative analysis of the EL (with a simple camera) and LBIC techniques to find a correlation between the brightness obtained in the EL images with the diffusion length maps of minority carriers obtained by the LBIC technique. Two-dimensional distribution of L_D and images of multicrystalline silicon solar cells with n^+pp^+ structure were compared. The results indicated similarities in the intensity graphs obtained in the regions where there are low L_D values. The results also show that it is possible to obtain satisfactory EL images even with a simple camera, however applying a minimum voltage of 6 V. In the future, this method could provide a lower cost and shorter processing time tool for L_D analysis.*

Key words: Solar cells, electroluminescence, LBIC