

IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MICROTRINCAS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE TESTE DE ELETROLUMINESCÊNCIA

Igor Utzig Picco – igor.picco@sengisolar.com.br

Matheus Bisolotti do Carmo

Gabriel Pereira Ugucioni Rocha

Gabriela Nascimento Pereira

Carlos Daniel Flecha Sosa

Carlos Victor do Rêgo Brandão

Murilo Bonetto

Sengi Solar, Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento

055. Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos

Resumo. Tendo em vista o contínuo crescimento de sistemas fotovoltaicos no Brasil e a necessidade de testes de inspeção nos módulos fotovoltaicos, esse trabalho apresenta informações de suporte à interpretação e análise de resultados de testes de eletroluminescência. Através de uma revisão bibliográfica é detalhado o processo de teste de eletroluminescência e os trabalhos já realizados para interpretação de defeitos. São apresentados exemplos de diferentes defeitos que módulos construídos na topologia de meia célula podem apresentar e, por fim, a classificação desses defeitos de acordo com sua severidade na performance do módulo fotovoltaico.

Palavras-chave: Energia Solar, Teste de Eletroluminescência, Microtrincas.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresentou um crescimento expressivo de geração de energia fotovoltaica nos últimos anos, tanto em sistemas distribuídos residenciais e comerciais, quanto em sistemas de geração centralizada (De Brito, Teixeira e De Souza, 2023; Vargas, 2023). Conforme a quantidade de sistemas fotovoltaicos se expande no país, cresce a necessidade e interesse no monitoramento da qualidade dos módulos fotovoltaicos instalados, de maneira a acompanhar a integridade e performance periodicamente. A utilização de técnicas de análise de módulos fotovoltaicos em campo vem se tornando cada vez mais frequente, sendo os principais testes aplicados o teste de infravermelho e o teste de eletroluminescência. O teste de eletroluminescência se figura como o mais promissor devido à capacidade de detalhar defeitos e imperfeições presentes nas células fotovoltaicas, mesmo que sejam internos, imperceptíveis a olho nu e não reflitam em redução imediata na performance no módulo, servindo para a análise de curto prazo e na previsão de comportamento do módulo no longo prazo (Bedrich *et al.*, 2018; Dubey *et al.*, 2018; Hermann *et al.*, 2021; Jahn *et al.*, 2018).

Conforme cresce a utilização de testes de eletroluminescência em instalações fotovoltaicas brasileiras, observa-se a necessidade de estudos que detalham e explicam os diferentes defeitos que podem ser encontrados em módulos fotovoltaicos. Tendo isso em vista, esse trabalho traz informações de suporte para a interpretação de resultados de teste de eletroluminescência em módulos fotovoltaicos. São apresentados os fundamentos do teste de eletroluminescência e os aspectos de identificação de microtrincas de maior ocorrência em módulos instalados em campo, discutindo suas diferentes severidades e impactos. O artigo apresenta como diferencial o detalhamento em módulos de topologia construtiva de meia célula, que apesar de ser o tipo de módulo mais encontrado no mercado atualmente, não é detalhado na literatura.

2. TESTE DE ELETROLUMINESCÊNCIA

O teste de eletroluminescência é amplamente utilizado na análise de células fotovoltaicas, sendo aplicado desde o processo de fabricação de células e módulos fotovoltaicos até a inspeção de módulos instalados em campo. No teste de eletroluminescência é inserido corrente nas células fotovoltaicas e como reflexo, os elétrons ficam excitados na banda de condução, emitindo luz na faixa de espectro quase infravermelho. Essa luz, que não se encontra na faixa visível, pode ser capturada com câmeras adequadas que operam no espectro de luz equivalente. A eletroluminescência corresponde à medição da irradiação de combinação de uma célula fotovoltaica em polarização direta (Dhimish e Holmes, 2019; Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022.; Karimi *et al.*, 2020).

Para células sem defeitos, a emissão de luz é intensa e uniforme, entretanto, irregularidades e perda de potência podem ser identificadas através de áreas escuras de células. Uma região defeituosa apresenta uma área escura, pois, a passagem da corrente inserida no módulo é afetada, portanto, não excita adequadamente os elétrons, resultando na redução de emissão de luz. A incapacidade de liberar luz ao receber o valor adequado de corrente expressa a

incapacidade de geração de potência pela região da célula, sendo assim, a quantidade de área escura em uma eletroluminescência tende a ser correlacionada proporcionalmente com a redução da potência resultante. As causas de áreas escuras podem ser áreas de alta resistência elétrica, áreas com problemas de solda, áreas isoladas eletricamente, locais com polarização reversa, locais com trincas ou quebras (Bdour *et al.*, 2020; Dhimish, 2017; Dolara *et al.*, 2018; Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022).

Apesar de ser amplamente utilizada pela indústria e na inspeção de grandes usinas, o teste de eletroluminescência não é utilizado pelo fluxo de validação das normas IEC 61215 e IEC 61730, demonstrando a obscuridade do teste e baixa confiabilidade para ser um parâmetro de análise nas normativas. Isso ocorre pois o teste de eletroluminescência não se reflete em um resultado único, necessitando de interpretação e análise crítica. Apesar disso, a IEC exige a realização dos testes de eletroluminescência nas linhas de produção de módulos fotovoltaicos, entretanto, normatiza somente as regras de realização de teste através da norma IEC 60904-13, com pouca informação sobre a interpretação dos resultados, concedendo a responsabilidade de interpretação dos resultados do teste ao corpo técnico de cada empresa que o realiza. Isso resulta em uma grande variedade de interpretações, sem padronização, o que pode trazer divergências na interpretação dos resultados (Papargyri *et al.*, 2020).

Como exemplo, é apresentado na Fig. 1 quatro resultados de eletroluminescência: célula em bom estado de operação (a), célula com defeitos significativos (b), célula severamente danificada (c) e por último, uma célula completamente inoperante (d).

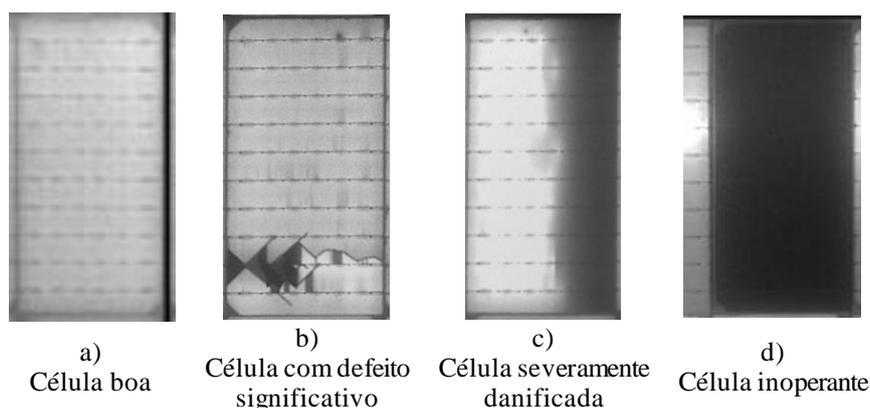


Figura 1 – Exemplos de resultados de teste de eletroluminescência.
Fonte: Do autor (2024).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Causas de microtrincas

Há mais evidências de microtrincas sendo causadas durante a fabricação, transporte e instalação do módulo fotovoltaico do que durante sua operação em campo. Usualmente as trincas se iniciam na fabricação e são propagadas, aumentadas e potencializadas durante o transporte, operação e exposição ao clima. As microtrincas observadas durante os processos de produção apresentam impactos desprezíveis na performance do módulo, sendo as etapas de transporte e instalação os momentos críticos para geração e propagação deste defeito. As principais origens de microtrincas se referem a: 1) Processo de corte de lingote de silício cristalino, 2) Processo de Produção de Célula, 3) Processo de Produção de Módulo, 4) Transporte e instalação de módulos fotovoltaicos inadequados, 5) Operação devido a condições ambientais extremas (Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020).

Durante a fabricação, as células fotovoltaicas recebem cargas termomecânicas que causam deformações permanentes no material. Essas deformações permanentes ocasionam estresses residuais significantes nos materiais que compõe o módulo, que apesar de não gerar defeitos no momento inicial, aumentam a suscetibilidade da célula à ocorrência de microtrincas no decorrer do processo de fabricação do módulo fotovoltaico. As perdas de células por microtrincas costumam ser entre 5 e 10% durante a manufatura. Conforme a espessura do silício utilizado nas células é continuamente reduzido, tende a haver mais ocorrências durante o processo (Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; ITRPV, 2023; Papargyri *et al.*, 2020).

No processo de fabricação de módulos fotovoltaicos as microtrincas são normalmente causadas na etapa de soldagem de células em série devido ao alto calor envolvido no processo, diferentes coeficientes de dilatação térmica entre os materiais, principalmente na interação silício-prata-estanho-cobre, e à topologia do processo de interligação elétrica de células, que utiliza fios entrelaçados, adicionando estresse mecânico às bordas da célula. O processo de laminação também impacta no surgimento e propagação de microtrincas devido à alta temperatura e alta pressão intrínseca ao processo, gerando stress residual no *wafers* de silício. As microtrincas que ocorrem durante a soldagem costumam ser em formato V e localizadas ao redor dos *pads* enquanto as microtrincas que surgem na laminação costumam apresentar a orientação $\pm 45^\circ$. Aspectos como material do encapsulante e espessura do material de interconexão elétrica afetam a ocorrência de microtrincas (Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020).

Caso as microtrincas identificadas no processo de produção tenham impacto significativo na performance do módulo, as células tendem a ser descartadas. Módulos fotovoltaicos comercializados costumam conter microtrincas controladas que não impactam a performance do produto, entretanto, o processo de transporte se configura como grande potencializador e gerador de microtrincas. É estimado que aproximadamente 6% dos módulos apresentem microtrincas após o transporte. O processo de instalação dos módulos também se configura como crítico para a geração e intensificação de microtrincas. O baixo cuidado com o módulo, juntamente com a aplicação de força excessiva e ocorrência de impactos, que acontecem com frequência durante a instalação, geram microtrincas e danos no produto (Penek, Fada e Martin, 2019; Bdour *et al.* 2020).

Microtrincas se configuram como o mecanismo de falha dominante para os primeiros dois anos de operação de módulos em campo. Posteriormente, estas imperfeições podem também surgir por falhas construtivas durante a operação, presente juntamente com outros defeitos (Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Köntges *et al.* 2017).

3.2. Classificação de Microtrincas

Normalmente se classificam como microtrincas as trincas com menos de 30 μm de espessura, não visíveis a olho nu, também podendo ser classificadas de acordo com a camada da célula que ocupa, denominadas como microtrincas superficiais e microtrincas internas - ou subfaciais. (Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020)

Em Papargyri *et al.*, (2020) são apresentados trabalhos que classificam microtrincas de acordo com sua severidade através das classes A, B e C. Microtrincas de Classe A não resultam em áreas eletricamente desconectas, sem danos significativos na potência de saída da célula. Caso a microtrinca cause desconexão parcial, com escurecimento de EL, ela é classificada como B. Caso resulte em separação total de uma região do resto da interconexão elétrica da célula é classificada como classe C, sendo o tipo mais severo, que impacta a produção de potência e durabilidade do produto. Entretanto essa classificação não resulta em clareza na análise visual de microtrincas, necessitando de análise estrutural microscópica e caracterização elétrica.

A orientação e posição de uma microtrinca é importante para a análise no seu impacto de perda de potência, sendo usualmente o padrão de análise e classificação de microtrincas observadas em testes de eletroluminescência. A orientação e localização deste defeito, principalmente em relação aos barramentos elétricos da célula, impactam de maneira mais significativa na performance de um módulo fotovoltaico do que sua extensão, tornando a direção e localização um dos critérios mais importantes para classificar microtrincas observadas em testes de eletroluminescência. As classificações mais utilizadas são microtrincas diagonais $\pm 45^\circ$, microtrincas paralelas ao barramento da célula, microtrincas perpendiculares ao barramento da célula e microtrincas com múltiplas direções (Bdour e Al-Sadi, 2020; Dhimish, 2020; Grunow *et al.*, 2005; Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022 e Papargyri *et al.*, 2020).

Os trabalhos de Bdour e Al-Sadi (2020), Dhimish (2020), Grunow *et al.* (2005) e Papargyri *et al.*, (2020) apresentam o detalhamento do impacto de microtrincas, suas diferentes classificações, sua origem, caracterização e os parâmetros que mais afetam a ocorrência destes defeitos. Entretanto, devido às grandes mudanças tecnológicas na construção de módulos fotovoltaicos, uma grande quantidade de resultados apresentados não se aplica de maneira adequada para os módulos fotovoltaicos atuais, construídos majoritariamente com topologia de meia célula e múltiplos barramentos elétricos por célula.

3.3. Impactos de microtrincas na performance e durabilidade do módulo

A intensidade de como cada microtrinca impacta na performance dos módulos depende principalmente dos estresses ambientais em que ele é sujeito durante sua operação, fazendo com que previsões iniciais não sejam precisas, servindo somente como ponto inicial de análise.

A maioria das microtrincas geradas na manufatura não afetam o desempenho de módulo fotovoltaico em um momento inicial, entretanto, a má instalação, estresse mecânico e estresse térmico tendem a intensificar os defeitos. As trincas espessas, que apresentam mais de 30 μm de espessura, visíveis a olho nu, causam alto dano na performance do módulo fotovoltaico, entretanto, são facilmente identificadas e as células são frequentemente retiradas durante o processo de fabricação dos módulos fotovoltaicos (Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020).

É ressaltado em múltiplos trabalhos como a presença de microtrincas não reflete diretamente em redução de performance de módulos fotovoltaicos, tendo em sua maioria, impacto negligenciável na potência de saída. É salientado como os problemas que a maioria das microtrincas trazem não são a redução de potência e dano direto no módulo, mas sim o aumento da fragilidade do módulo fotovoltaico, tornando-o mais suscetível ao surgimento de defeitos posteriores, durante as etapas de transporte, instalação e operação (Bdour *et al.*, 2020; Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020).

Em Kajari-Schröder, Kunze e Köntges (2012) e Köntges *et al.* (2011) foi demonstrado como o efeito inicial de microtrincas são desprezíveis, mas após processos de degradação acelerada o efeito se torna expressivo, fazendo com que os módulos que apresentam microtrincas performem de maneira inadequada após os testes de degradação acelerada, concluindo que módulos que exibem este defeito são mais frágeis a intempéries térmicas e mais suscetíveis a degradação intensificada.

Em Bdour *et al.* (2020) foi relacionado a ocorrência de microtrincas em módulos fotovoltaicos com o impacto financeiro no investimento de uma usina fotovoltaica. Foi constatado que para a maioria das microtrincas analisadas, a degradação anual e tempo de retorno de investimento de usinas não são significativamente afetados, estando dentro da

curva linear apresentada pelo fabricante. Em Buerhop *et al.* (2018) e Sander e Dietrich (2013) são apresentados exemplos de diversos estudos que submeteram módulos fotovoltaicos que já continham trincas previamente a operação em campo sem observar o surgimento de novas trincas e decaimento de potência.

Foi apresentado em Dhimish *et al.* (2017) e Goudelis, Lazaridis e Dhimish (2022) que microtrincas diagonais e perpendiculares aos barramentos só trazem impactos significativos na performance de módulos fotovoltaicos quando ocorrem em grande quantidade de células e em grandes áreas afetadas pelo defeito. Em contrapartida, microtrincas paralelas aos barramentos e com múltiplas direções apresentam maior criticidade devido ao isolamento elétrico de regiões da célula, que resultam na geração de pontos de aquecimento. Foi medido o impacto de cada tipo de microtrinca e quantizado o número de defeitos necessários para trazer impactos significativos na geração de energia elétrica e durabilidade dos módulos. Para microtrincas diagonais e paralelas internas aos barramentos, foi concluído que o impacto é significativo apenas quando o módulo apresenta três ou mais ocorrências, o que corresponde a 5% da quantidade de células dos módulos analisados. Para microtrincas perpendiculares ao barramento o impacto só é significativo a partir da quarta ocorrência. As microtrincas ramificadas, com múltiplas direções, impactam na performance do módulo a partir da segunda ocorrência, demonstrando sua maior criticidade.

Em Bdour e Al-Sadi (2020) é apresentada uma tabela com diferentes trincas e seu grau de impacto na performance e durabilidade de módulos fotovoltaicos, entretanto, o trabalho analisa somente módulos construídos com topologia de célula inteira e com pouca quantidade de barramentos elétricos.

Diversos trabalhos tentaram realizar a modelagem do impacto de microtrincas em parâmetros elétricos, tentando relacionar o tamanho e a quantidade de trincas com a variação de performance elétrica dos módulos fotovoltaicos. Foi observado que não é possível fazer uma correlação direta entre quantidade de microtrincas e degradação de potência devido às diferentes características de trinca. Cada característica modifica completamente o mecanismo de redução de potência, tornando a classificação mais difícil (Papargyri *et al.*, 2020).

Em relação aos trabalhos que mediram o impacto nos parâmetros elétricos, foi estimado em Peshek, Fada e Martin (2019) que módulos que apresentam microtrincas podem exibir de 2,4% a 8% de redução de potência máxima. Em Grunow *et al.* (2005) foi quantizado o impacto nos parâmetros elétricos como corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e eficiência de conversão para diferentes microtrincas. Em Dhimish (2020) foi obtido valores de redução de potência de 0,9% a 42,8% devido à presença desses defeitos nas células. Em Koch *et al.* (2010) é apresentado que microtrincas no meio da célula, trazem até 4% de perda de potência, enquanto paralelas aos barramentos, que isolam áreas, resultam em perdas de potência de até 60%.

O impacto de uma microtrinca se torna mais intenso quando ela isola eletricamente uma região da célula fotovoltaica. O isolamento elétrico de uma região da célula é crítico não só devido à redução de potência, mas pela geração de pontos de aquecimento na célula. A redução de potência afeta a performance do módulo enquanto a ocorrência de pontos de aquecimento é sempre crítica para a durabilidade e desempenho de potência dos módulos fotovoltaicos. É conhecido que a geração de potência de uma célula é proporcional à sua área de funcionamento, fazendo com que, sempre que uma trinca isole uma região, a queda de potência tenda a ser proporcional à área isolada. Caso a microtrinca não isole região nenhuma da célula, ela não causa impacto significativo na performance do módulo. Usualmente este defeito reflete no surgimento de uma região eletricamente isolada da célula quando ela é externa a um barramento elétrico ou quando ela é interna, com área fechada, sem que os barramentos passem pelo interior da área. A partir do ponto em que a microtrinca alcança uma resistência elétrica de 10Ω ocorre a separação de camadas, gerando áreas inativas na célula. A área inativa reflete em polarização inversa, fazendo com que ocorra o consumo de potência e dissipação de calor (Dolara *et al.*, 2018; Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020)

As microtrincas são os principais causadores de pontos de aquecimento em módulos fotovoltaicos, que figuram como um dos principais problemas de durabilidade. Ao se propagarem, as microtrincas podem gerar múltiplas áreas isoladas que tendem a se transformar em pontos de aquecimento (Bdour *et al.*, 2020; Bressan *et al.*, 2018; Dhimish, 2020). Outro defeito que tem sua causa associada às microtrincas são os chamados “*snail-trail*”. Essas falhas podem causar o acúmulo de umidade no interior do módulo, geralmente entre a camada de prata e o encapsulante, que se reflete no surgimento de *snail-trails* durante a operação do módulo (Bdour e Al-Sadi, 2020; Dolara *et al.*, 2016).

O trabalho de Dolara *et al.* (2018) apresentou a modelagem do impacto de uma microtrinca na performance do módulo em relação a sua distribuição espacial. Foi relacionado a área escura de uma célula com seu impacto na performance de geração. O artigo demonstrou que a proporção de área escura no teste de eletroluminescência não é suficiente para estimar a redução de potência gerada. É necessário a análise da localização e tipo de microtrinca. A Fig. 2 apresenta o gráfico de dispersão obtido, juntamente com a regressão linear realizada. Foi obtido um valor de R^2 relativamente baixo. Ocorreram casos em que uma célula com 14% de área escura teve um desempenho menor do que uma célula com 22% de área escura, deixando claro a não linearidade entre os dois parâmetros.

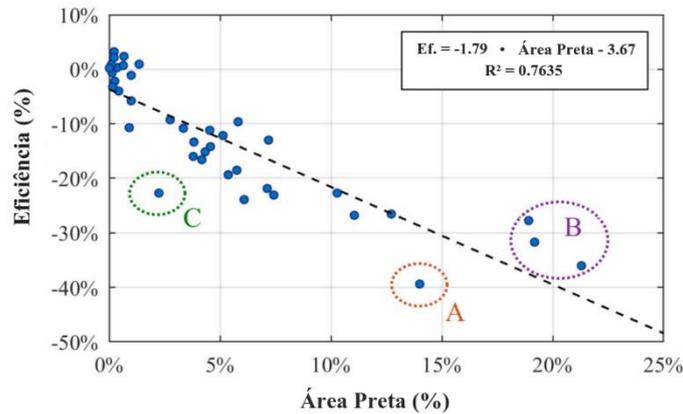


Figura 2 – Área escura *versus* eficiência de célula.
Fonte: Adaptado de Dolara *et al* (2018).

4. IDENTIFICAÇÃO E CATEGORIZAÇÃO DE MICROTRINCAS ATRAVÉS DE EL

Nessa sessão são apresentadas diversas microtrincas usualmente encontradas na literatura e na análise prática de módulos fotovoltaicos. Todas as imagens foram obtidas pelo autor através do equipamento OPT M960B utilizando os parâmetros elétricos normatizados na IEC 60904-13. Todos os módulos testados são módulos de 144 meia células.

4.1. Trinca

É usualmente utilizado a nomenclatura “Trinca” quando o defeito apresenta mais de $30 \mu\text{m}$ de espessura e pode ser visível a olho nu. As trincas costumam apresentar danos estruturais à célula, prejudicando de maneira significativa a performance e durabilidade do módulo (Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020). A Fig. 3 apresenta múltiplos exemplos de trincas em células fotovoltaicas.

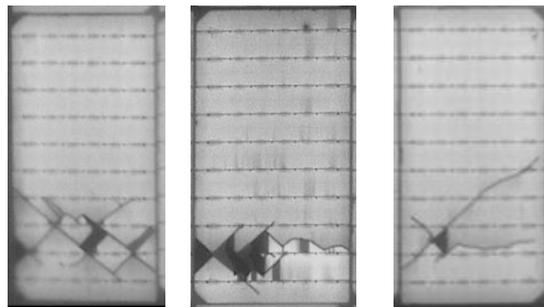


Figura 3 – Exemplos de trincas.
Fonte: Do autor (2023).

4.2. Microtrinca comum diagonal

Microtrincas comuns diagonais costumam apresentar espessura menor que $30 \mu\text{m}$, uma só direção e apresentam orientação de $\pm 45^\circ$. Essas imperfeições exibem baixa severidade de defeitos pois não resultam em isolamentos elétricos de áreas da célula. A ocorrência desse tipo de falha é comumente associada ao processo de laminação na literatura técnica (Bdour *et al.*, 2020; Bdour e Al-Sadi, 2020; Dolara *et al.*, 2018; Köntges *et al.*, 2011;). A Fig. 4 apresenta múltiplos exemplos de microtrincas comuns diagonais em células fotovoltaicas.

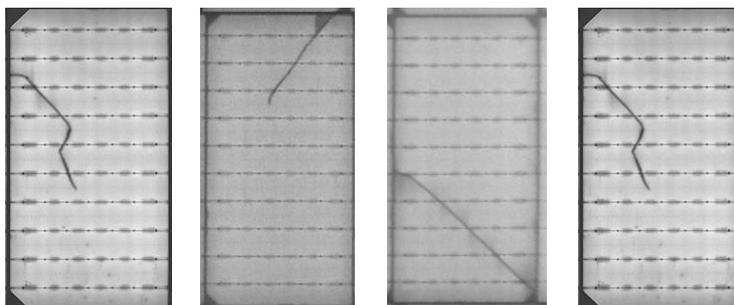


Figura 4 – Exemplos de microtrincas comum diagonais.
Fonte: Do autor (2023).

4.3. Microtrinca comum entre barramentos

Este tipo de defeito costuma apresentar espessura menor que 30 μm , uma só direção e estar contido entre múltiplos barramentos de células. Essas falhas demonstram baixa severidade de defeitos, pois, as áreas ao redor das trincas têm um caminho elétrico de escoamento disponível, não estando isoladas eletricamente. (Dolara *et al.*, 2018; Grunow *et al.*, 2005; Papargyri *et al.*, 2020). A Fig. 5 apresenta exemplos de microtrincas comum entre barramentos em células fotovoltaicas.

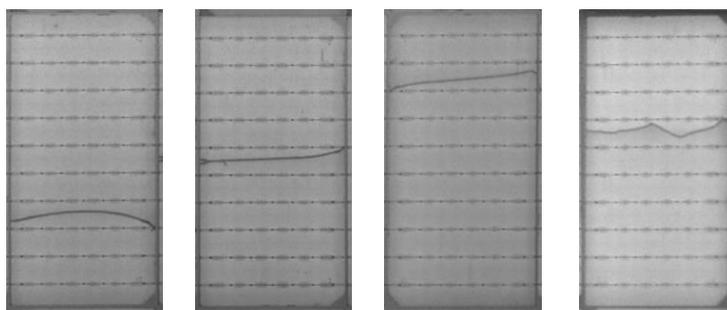


Figura 5 – Exemplos de microtrincas comum entre barramentos.
Fonte: Do autor (2023).

4.4. Microtrinca comum externas aos barramentos

Defeitos como as microtrincas comuns externas aos barramentos costumam apresentar espessura menor que 30 μm , uma só direção e estão nos cantos das células, no caso de células inteiras soldadas com fitas. Em casos de meia células, elas estão presentes na parte superior ou inferior da célula, após o último fio. Essas falhas apresentam severidade significativa, pois, as áreas entre as microtrincas e o canto da célula estão isoladas eletricamente, gerando redução de potência e possível ocorrência de pontos de aquecimento. Devido ao fato de a área isolada ser pequena, a severidade não é tão crítica (Bdour e Al-Sadi, 2020; Dolara *et al.*, 2018; Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022). A Fig. 6 apresenta múltiplos exemplos de microtrincas comum externa aos barramentos em células fotovoltaicas.

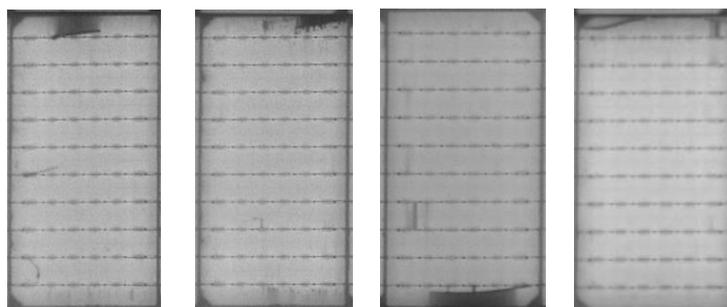


Figura 6 – Exemplos de microtrincas comum externa aos barramentos.
Fonte: Do autor (2023).

4.5. Microtrinca ramificada

Estas falhas apresentam uma direção inicial na qual múltiplas ramificações se originam. Esse tipo de microtrinca costuma ser classificada com uma alta severidade devido à fragilização da célula, que permite a contínua expansão, resultando na geração de múltiplas áreas isoladas que resultam em pontos de aquecimento (Bdour *et al.*, 2020; Dhimish, 2020; Grunow *et al.*, 2005; Papargyri *et al.*, 2020). A Fig. 7 apresenta múltiplos exemplos de microtrincas ramificadas em células fotovoltaicas.

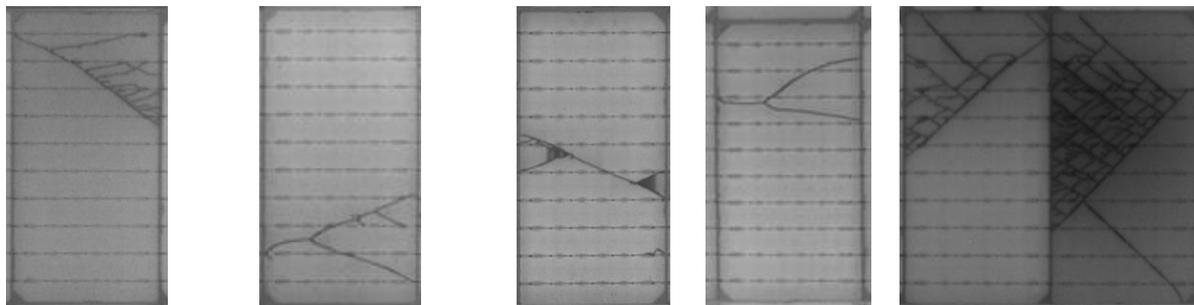


Figura 7 – Exemplos de microtrincas ramificadas.
Fonte: Do autor (2023).

4.6. Microtrinca Explosiva

Estas imperfeições são caracterizadas por um ponto pequeno que origina microtrincas. Normalmente são provenientes de impactos pontuais na traseira do módulo fotovoltaico. Esse defeito apresenta severidade inicial desprezível, entretanto, apresenta alto potencial para expansão (Dolara *et al.*, 2018; Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020). A Fig. 8 apresenta múltiplos exemplos de microtrincas explosivas em células fotovoltaicas.

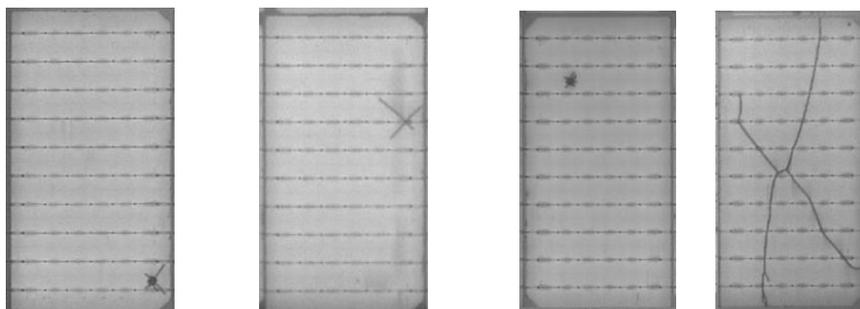


Figura 8 – Exemplos de microtrincas explosivas.
Fonte: Do autor (2023).

4.7. Microtrinca V

Microtrincas V são formadas durante o processo de soldagem de células em série devido ao alto calor envolvido no processo e os diferentes coeficientes de dilatação térmica entre os materiais. Esse tipo de falha é localizado no canto da célula ao redor dos *pads* do canto da célula. Esse defeito apresenta baixa severidade, porém, possibilidade de expansão (Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022; Papargyri *et al.*, 2020). A Fig. 9 apresenta múltiplos exemplos de microtrincas V em células fotovoltaicas.

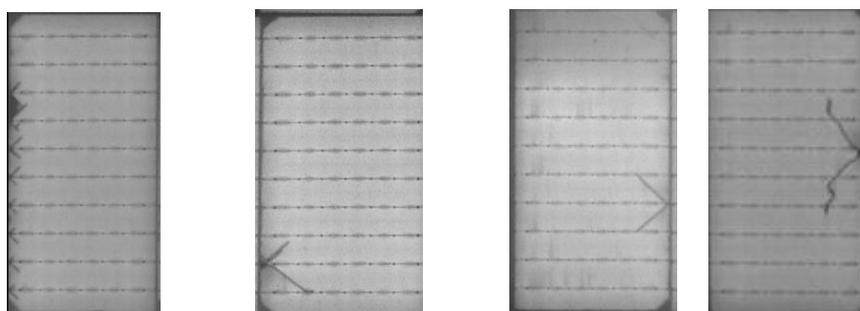


Figura 9 – Exemplos de microtrincas V.
 Fonte: Do autor (2023).

4.8. Microfragmentações

Quando ocorre uma fragmentação interna na célula, deixando uma região totalmente inoperante, é observado uma região totalmente preta rodeada por microtrincas. Esse tipo de ocorrência é usualmente denominado de microfragmentação e apresentam baixo impacto na performance do módulo fotovoltaico caso seja no canto da célula (Bdour e Al-Sadi, 2020; Dolará *et al.*, 2018; Goudelis, Lazaridis e Dhimish, 2022). A Fig. 10 apresenta múltiplos exemplos de microfragmentações em células fotovoltaicas.

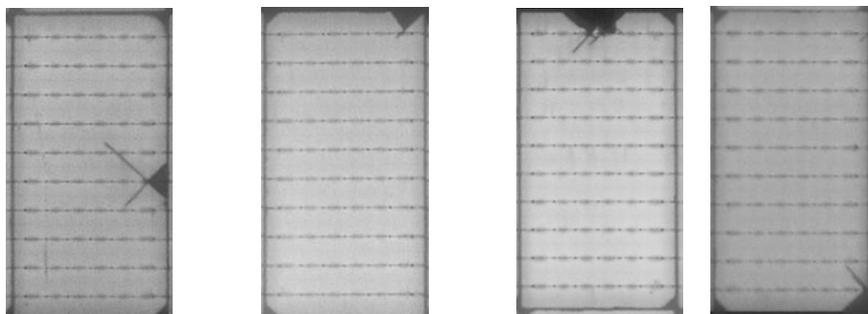


Figura 10 – Exemplos de microfragmentações.
 Fonte: Do autor (2023).

4.9. Microfragmentação de impacto

Microfragmentações de impacto acontecem devido à impactos mecânicos na parte traseira. Esse tipo de falha representa defeitos significativos no módulo e podem ser identificados a olho nu ou através do toque no backsheet. A Fig. 11 apresenta múltiplos exemplos de microfragmentações de impacto em células fotovoltaicas.

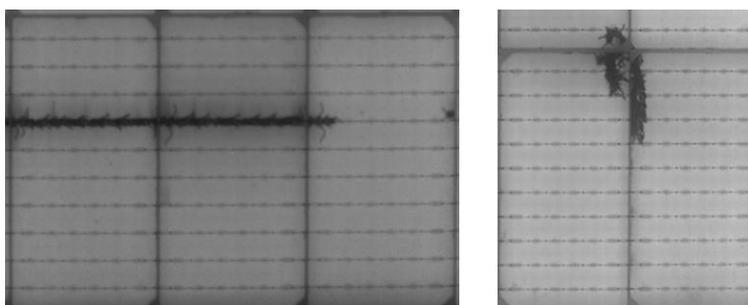


Figura 11 – Exemplos de microfragmentações de impacto.
 Fonte: Do autor (2023).

5. CLASSIFICAÇÃO DE SEVERIDADE DE MICROTRINCAS

A Tab. 1 apresenta a classificação de severidade das diferentes microtrincas apresentadas no artigo de acordo com a revisão bibliográfica realizada. A tabela serve como parâmetro inicial de análise, tendo em vista que aspectos específicos de cada defeito irão definir mais precisamente sua severidade. A classificação de severidade tem como foco a performance de geração do módulo fotovoltaico.

Tabela 1 - Classificação de severidade de defeitos observados em teste de eletroluminescência.
 Fonte: Do Autor (2024).

DEFEITO	SEVERIDADE
Trinca	Alta
Microtrinca comum diagonal	Baixa
Microtrinca comum entre barramentos	Baixa
Microtrinca comum externa aos barramentos	Média
Microtrinca ramificada	Alta
Microtrinca explosiva	Baixa
Microtrinca V	Baixa

Microfragmentações	Alta
Microfragmentação de impacto	Alta

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o funcionamento do teste de eletroluminescência em módulos fotovoltaicos, sua aplicação e detalhamentos sobre as microtrincas, um dos principais defeitos observados com a aplicação do teste. Apresentando uma extensa revisão bibliográfica, esse artigo serve como suporte para a identificação e classificação de defeitos das células fotovoltaicas. Esse trabalho apresenta como diferencial a contextualização dos defeitos mais estudados na literatura para o aspecto construtivo de módulos fotovoltaicos de meia célula, além de uma expansão da lista de defeitos.

Foram observados tópicos pouco abordados na literatura atual que podem servir como sugestões de estudos futuros, sendo alguns deles: análise comparativa do impacto de microtrincas em módulos construídos com tecnologias de meia célula e célula inteira, comparação do impacto causado por estes defeitos em células com diferentes quantidades de barramentos e comparação da diferença do efeito dessas falhas em diferentes tecnologias construtivas de células, abordando as tecnologias em ascensão atualmente: TOPCon e HJT.

Agradecimentos

Agradecimentos a Sengi Solar pelo suporte, financiamento e incentivo a este trabalho. Agradecimento a equipe de Pesquisa e Desenvolvimento pelo suporte na elaboração do trabalho. Agradecimentos ao programa PADIS pelo incentivo e fomento ao P&D nacional.

REFERÊNCIAS

- Bdour, M. *et al.* 2020. A comprehensive evaluation on types of microcracks and possible effects on power degradation in photovoltaic solar panels. *Sustainability*, 12(16), 6416.
- Bdour, M., Al-Sadi, A. 2020. Analysis of different microcracks shapes and the effect of each shape on performance of PV modules. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 876, No. 1, p. 012005).
- Bedrich, K. G. *et al.* 2018. Quantitative electroluminescence imaging analysis for performance estimation of PID-influenced PV modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(5), 1281-1288.
- Bressan, M., *et al.* 2018. Development of a real-time hot-spot prevention using an emulator of partially shaded PV systems. *Renewable energy*, 127, 334-343.
- Buerhop, C. *et al.* 2018. Evolution of cell cracks in PV-modules under field and laboratory conditions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(4), 261-272.
- De Brito, E. S. M.; Teixeira, T.; De Souza, F. P. 2023. As potencialidades e os limites da energia solar fotovoltaica no Brasil. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 16, n. 9, p. 15663-15680.
- Dhimish, M. 2020. Micro cracks distribution and power degradation of polycrystalline solar cells wafer: Observations constructed from the analysis of 4000 samples. *Renewable Energy*, 145, 466-477.
- Dhimish, M. *et al.* 2017. The impact of cracks on photovoltaic power performance. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2(2), 199-209.
- Dhimish, M., Holmes, V. 2019. Solar cells micro crack detection technique using state-of-the-art electroluminescence imaging. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 4(4), 499-508.
- Dolara, A. *et al.* 2016. Snail trails and cell microcrack impact on PV module maximum power and energy production. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(5), 1269-1277.
- Dolara, A. *et al.* 2018. Impact of cell microcracks size and spatial distribution on output power of PV modules. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1-6). IEEE.
- Dubey, R. *et al.* 2018. On-site electroluminescence study of field-aged PV modules. 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)
- Goudelis, G., Lazaridis, P. I., Dhimish, M. 2022. A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction. *Energies*, 15(12), 4303.
- Grunow, P. *et al.* 2005. Influence of micro cracks in multi-crystalline silicon solar cells on the reliability of PV modules. *Proceedings of the 20th EUPVSEC*, 2042-2047.
- Hermann, W. *et al.* 2021. Qualification of PV Power Plants using Mobile Test Equipment. In *Task 13 Reports* (pp. 73-84).
- ITRPV. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2022 Results. 2023.
- Jahn, U., *et al.* 2018. Review on infrared and electroluminescence imaging for PV field applications. Report IEA-PVPS T13-10:2018
- Kajari-Schröder, S., Kunze, I., Kšntges, M. 2012. Criticality of cracks in PV modules. *Energy Procedia*, 27, 658-663.
- Karimi, A. M. *et al.* 2020. Generalized and mechanistic PV module performance prediction from computer vision and machine learning on electroluminescence images. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(3), 878-887.

- Koch, S, *et al.* 2010. Dynamic mechanical load tests on crystalline silicon modules. In 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference–Valencia.
- Köntges, M. *et al.* 2011. The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks. *Solar energy materials and solar cells*, 95(4), 1131-1137.
- Köntges, M., *et al.* 2017. Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field: International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13, Subtask 3: Report IEA-PVPS T13-09: 2017. International Energy Agency.
- Papargyri, L. *et al.* 2020. Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review. *Renewable Energy*, 145, 2387-2408.
- Peshek, T. J., Fada, J. S., Martin, I. T. 2019. Degradation processes in photovoltaic cells. In *Durability and Reliability of Polymers and Other Materials in Photovoltaic Modules* (pp. 97-118). William Andrew Publishing.
- Sander, M., Dietrich, S. 2013. Influence of manufacturing processes and subsequent weathering on cell cracks in PV modules. 28th EU PVSEC.
- Vargas, P. P. 2023 *Energia Solar Fotovoltaica: Análise de sua expansão no Brasil*. Monografia de graduação, UFSC, Florianópolis

IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION OF MICROCRACKS IN PHOTOVOLTAIC MODULES THROUGH ELECTROLUMINESCENCE TESTING

Abstract. *Considering the continuous growth of photovoltaic systems in Brazil and the need for inspection tests, this work presents supporting information for analyzing and interpreting electroluminescence tests results applied on photovoltaic modules. Through literature review, the electroluminescence testing process is detailed, along with previous studies conducted for interpreting observed microcracks. Examples of various microcracks that modules built in the half-cell technology might exhibit are provided along with the classification based on their severity in the photovoltaic module's performance.*

Keywords: *Solar Energy, Electroluminescence Test, Microcracks.*