

ESTUDO DE CASO SOBRE INCIDÊNCIA E PADRÕES DE TRINCAS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO BIFACIAIS VIDRO-VIDRO DE GRANDE ÁREA

Kevin Luiz Rocha de Azevedo – kevin-az@hotmail.com

Marília Braga

Ricardo Rütther

Universidade Federal da Santa Catarina, Fotovoltaica-UFSC

Resumo: Este estudo de caso detalha um fenômeno de trincas espontâneas, cuja origem permanece desconhecida, manifestando-se em módulos bifaciais de silício monocristalinos durante um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento no laboratório Fotovoltaica-UFSC, localizado em Florianópolis/SC – Brasil. Os módulos em questão, com potência de 645 Wp e dimensões de 2400 x 1300 x 33 mm, peso de 38 kg e área de 3 m², apresentam ambas as faces revestidas com vidro semitemperado de 2 mm. O projeto foi concebido como uma usina fotovoltaica de 100 kWp composta por 158 módulos, tendo como propósito a análise de desempenho de módulos bifaciais e de filme fino de última geração sob diversas condições de albedo, e condições extremas de temperatura, irradiância e sujidade, visando avaliar o desempenho dos sistemas e buscando maximizar a geração fotovoltaica. Entretanto, ao longo do projeto, foi necessária a organização de uma frente de pesquisa específica para a análise das trincas que surgiram nos módulos, buscando compreender o fenômeno, sua relevância no contexto geral da tecnologia e seus impactos na segurança e desempenho de sistemas fotovoltaicos. O estudo seguinte abrangeu a taxa de surgimento de trincas, seus padrões de formatos, número de ramificações, incidência em aspectos construtivos e outros critérios relevantes. Os resultados, embora não conclusivos, propõem ponderações em relação aos testes realizados para certificações atualmente empregados, assim como também traz reflexões a respeito de testes de qualidade dos insumos utilizados na fabricação de módulos e da rápida implementação de novas tecnologias e a cautela necessária perante as inovações tecnológicas.

Palavras-chave: Qualidade de Módulos FV, Trincas, Análise de Falhas

1. INTRODUÇÃO

O panorama atual para geração de energia fotovoltaica (FV) possui uma crescente diversidade de inovações e avanços tecnológicos, onde podemos observar uma variedade de soluções adotadas para alcançar maiores eficiências energéticas e redução de custos de produção. Neste sentido, o mercado de módulos fotovoltaicos apresenta forte tendência em dois pontos distintos: produtos cada vez maiores visando aumentar sua área efetiva para geração de energia (VDMA, 2023; VILLALVA, 2015), e a utilização de vidros de revestimento progressivamente mais finos em comparação a módulos mais antigos (VDMA, 2023), barateando sua manufatura e otimizando custo e benefício.

Contudo, o progresso da tecnologia não é isento de desafios de implementação, e essa dualidade se manifesta nas instalações contemporâneas. A usina fotovoltaica instalada para o projeto pesquisa e desenvolvimento (P&D) realizado pela equipe de pesquisa técnica em energia solar do laboratório Fotovoltaica-UFSC (www.fotovoltaica.ufsc.br) apresentou problemáticas ligadas a rápida adesão destas inovações.

O projeto visava a análise do potencial para maximização da vida operacional e geração energética de módulos fotovoltaicos bifaciais de silício monocristalino submetidos a diversas condições de albedo, e condições extremas de temperatura e irradiância. Entretanto, durante sua execução houve o surgimento inesperado e generalizado de trincas nos vidros frontais e traseiros dos módulos utilizados, gerando preocupações relacionadas à segurança e desempenho. (CHENG *et al.*, 2018; KONTGES *et al.*, 2011).

O estudo de caso deste artigo explora e relaciona o conflito entre o acelerado ritmo de inovação e os desafios emergentes das novas tecnologias, ao passo em que discorre o ocorrido durante o projeto de P&D e esclarece as medidas adotadas pela equipe técnica para compreender o fenômeno, possuindo como objetivo principal levantar possíveis ponderações pertinentes a serem consideradas diante das tendências indicadas pelo mercado.

2. PLANTA PILOTO

O objeto deste estudo de caso é uma planta FV piloto, situada na cidade de Florianópolis/SC (27,43°S, 48,44°O). O local onde a usina está instalada possui clima subtropical úmido (Cfa) de acordo com a classificação Köppen-Geiger (ALVARES, 2013), e o regime predominante de vento é o de quadrante norte, apesar do vento sul ser o mais conhecido na região, com suas rajadas fortes e persistentes.

A usina, mostrada na imagem da Fig 1, possui potência instalada de aproximadamente 100 kWp, sendo composta por 158 módulos FV instalados em estruturas de fixação fornecida por um dos maiores fabricantes de estruturas deste tipo no mundo. A capacidade instalada da usina é dividida entre seis sistemas, conforme apresentado na Tab 1. O *layout* da usina foi escolhido com base nas diferentes comparações entre sistemas que poderiam ser analisadas, em especial, a

comparação de desempenho entre sistemas bifaciais instalados sobre diferentes tipos de solo. Isto resulta em sistemas idênticos, sempre com exceção de apenas uma variável (tipo de solo, tecnologia FV ou estrutura de fixação). O foco da análise deste estudo de caso será nos módulos bifaciais de silício cristalino.



Figura 1 – Foto aérea da planta piloto objeto deste estudo de caso.

Tabela 1 – Principais informações dos diferentes sistemas FV que compõem a planta piloto deste estudo de caso.

#	Tipo de Solo	Estrutura de Fixação	Tecnologia FV	Potência do Módulo FV	Número de Módulos FV	Potência FV Total
1	Bica Corrida	Fixo	Si MONO PERC Bifacial	645 Wp	26	16,77 kWp
2	Bica Corrida	Rastreador	CdTe	450 Wp	26	10,8 kWp
3	Bica Corrida	Rastreador	Si MONO PERC Bifacial	645 Wp	26	16,77 kWp
4	Areia	Rastreador	Si MONO PERC Bifacial	645 Wp	26	16,77 kWp
5	Bica Corrida + Caulim	Rastreador	Si MONO PERC Bifacial	645 Wp	26	16,77 kWp
6	Brita Branca	Rastreador	Si MONO PERC Bifacial	645 Wp	26	16,77 kWp

Os módulos bifaciais de silício monocristalino tipo PERC são de fabricante *Tier 1* com 645 Wp de potência individual, possuindo dimensões aproximadas de 2400 x 1300 x 37 mm, pesando cerca de 38 kg e apresentando aproximadamente 3 m² de área, classificado como um modelo de área grande. Os módulos possuem moldura de alumínio anodizado e são revestidos tanto na parte frontal quanto na parte traseira com vidros semi temperados de 2 mm. A Fig 2 traz uma imagem representativa do módulo FV utilizado na planta analisada neste estudo de caso.

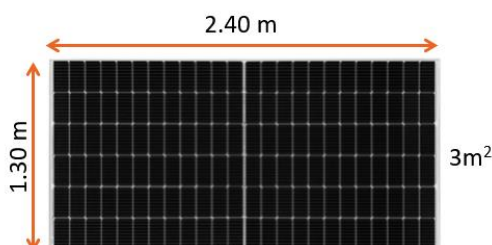


Figura 2 – Representação aproximada do módulo fotovoltaico utilizado na planta piloto objeto deste estudo de caso.

3. PRIMEIRAS TRINCAS E ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A instalação da planta piloto foi concluída em maio de 2022. Em julho do mesmo ano foram identificadas trincas em 2 módulos bifaciais de silício. Sequencialmente, em agosto do mesmo ano, outros 11 módulos apresentaram trincas, sendo que estas foram associadas a um episódio de vento intenso com velocidades de até 90 km/h que ocorreu no início

do mesmo mês. Estes 13 módulos identificados com trincas entre julho e agosto de 2022 foram substituídos por módulos sem danos ainda no final de agosto de 2022. A Fig 3 apresenta o desenho de algumas das trincas identificadas nos módulos retirados da usina nesta primeira substituição.

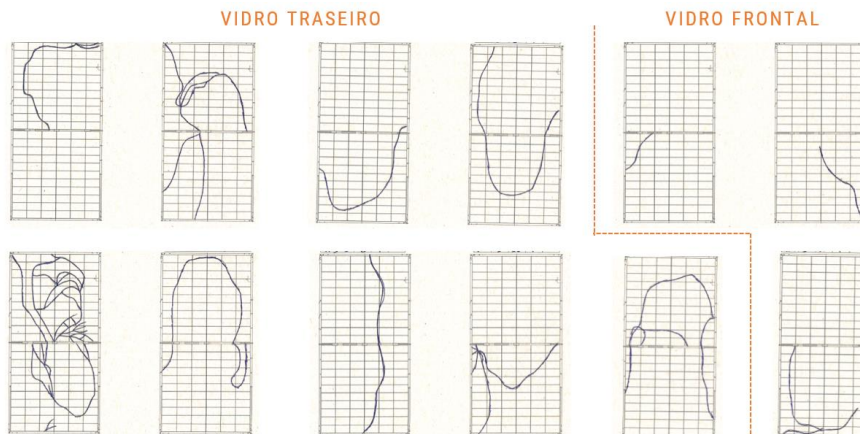


Figura 3 – Padrão das trincas encontradas nos módulos substituídos preliminarmente em agosto de 2022.

Após a substituição, entre o fim de agosto de 2022 até março de 2023, a identificação de trincas foi recorrente, com outros 91 módulos apresentando trincas, totalizando 104 módulos com alguma falha neste sentido em menos de um ano de operação da planta. A evolução do número acumulado de módulos trincados ao longo dos meses pode ser observada na Fig. 4. Vale destacar que cada aumento abrupto no número acumulado de módulos danificados representa uma inspeção visual da planta piloto, ou seja, o momento no qual a trinca foi identificada, e não necessariamente a data de surgimento da mesma. Observa-se uma taxa média de 10 módulos trincados por mês neste período da análise, com um aumento na taxa de trincas em meses de verão, o que não representa a causa raiz do problema, mas possivelmente um catalisador.

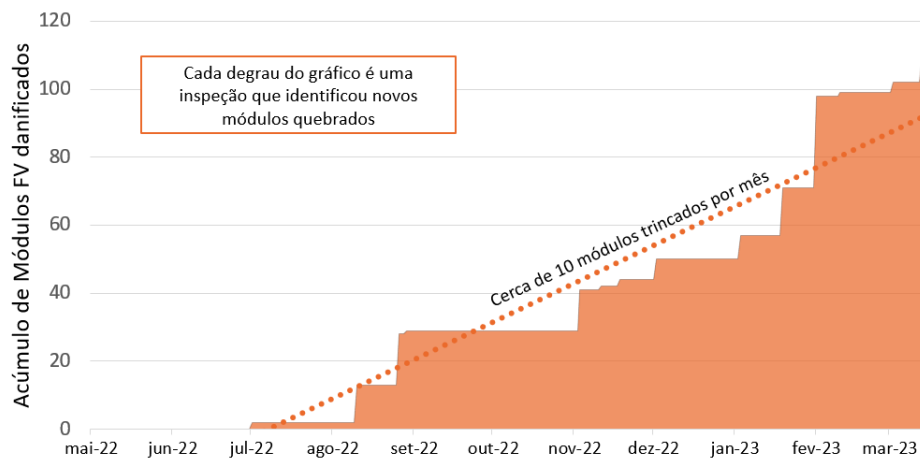


Figura 4 – Gráfico representando o número acumulado de módulos com vidros trincados na Fase 1 do estudo de caso da planta piloto.

A presença de trincas gera preocupação tanto por razões de perdas em eficiência como também questões relacionadas à segurança (CHENG *et al.*, 2019; KONTGERS *et al.*, 2010 apud DHIMISH *et al.*, 2017). Difíceis de serem visualizadas a olho nu e não possuindo métodos para detecção que não necessitem interromper seu funcionamento, estas podem ocasionar falhas de isolamento, acarretando o desligamento de parte da usina devido ao sistema de detecção de falhas dos inversores instalados. Problemas com isolamento são igualmente desafiadores de serem localizados, pois são invisíveis em termografia infravermelha aérea por não apresentarem alteração no padrão térmico dos módulos. Para a identificação das falhas, se faz necessária a realização de ensaios dedicados de resistência de isolamento em todas as *strings* do sistema, até a identificação do módulo específico que está apresentando a falha.

Com o desligamento de parte da usina sendo uma possibilidade preocupante, o que geraria perdas significativas para o rendimento da instalação e comprometendo os resultados do objetivo principal do projeto, a equipe técnica do laboratório mobilizou-se e adicionou uma nova frente de pesquisa para especificamente dar início ao estudo do fenômeno das trincas.

Este estudo de caso trata especificamente da análise de trincas nos módulos de silício monocristalinos, excluindo os módulos de filme fino, e está dividido em duas fases. A avaliação detalhada da Fase 1 resumiu-se na análise dos 71

módulos danificados nos quatro rastreadores até a data de março de 2023, apesar de haver diversos módulos com trincas no sistema fixo também. A Fase 2 consistiu na reposição de todos os 104 módulos monocristalinos dos quatro rastreadores, para então observar e analisar o crescimento gradual do surgimento das trincas nestes módulos novos, após a substituição também de algumas estruturas de fixação.

4. RESULTADOS DA FASE 1

A Fig. 5 destaca na imagem aérea da planta piloto os 71 módulos danificados que foram analisados na Fase 1 do estudo de caso, destacando a localização e o número de módulos em que as trincas que ocorrem no vidro frontal (15 módulos), no vidro posterior (32 módulos) ou em ambos (24 módulos). As análises desenvolvidas buscam padrões e tendências nas trincas do vidro dos módulos FV, a fim de produzir conteúdo que possa ser empregado na identificação da causa raiz deste problema. Sendo assim, as trincas nos módulos foram identificadas e catalogadas quanto as suas características de forma, número de ramificações, presença em pontos fixação laterais e/ou em caixas de junção. Um exemplo de trinca no vidro frontal de um módulo danificado na Fase 1 pode ser visto na Fig 6.



Figura 5 – Imagem aérea da usina FV destacando os módulos trincados analisados na Fase 1 deste estudo de caso. Módulos com o vidro frontal quebrado são representados em vermelho, enquanto trincas no vidro posterior estão em amarelo e módulos com trincas em ambos os lados são destacados em laranja. O texto da imagem traz o número total de módulos trincados e o valor porcentual em relação ao número total de módulos da planta.



Figura 6 – Trinca encontrada em um dos módulos da usina FV durante a Fase 1 do estudo.

Foram identificados quatro padrões de formato das trincas, sendo eles: estrela, linha, círculo incompleto e círculo completo. A distribuição destes formatos em relação ao total de módulos danificados pode ser vista no gráfico da Fig. 7, que traz também imagens exemplo das classificações quanto ao formato das trincas. Observa-se uma predominância de trincas lineares (53%), com um percentual ainda significativo de trincas formando círculos incompletos (28%).

Muitas das trincas apresentam ramificações em seu corpo, sendo categorizadas de três formas distintas: nenhuma, poucas e muitas. A distribuição destas categorias em relação aos módulos trincados e analisados na Fase 1 pode ser observada no gráfico da Fig. 8. É possível observar que a maior parte das trincas possui muitas ramificações (46%),

podendo haver uma relação entre o número de ramificações e o tempo decorrido após a trinca inicial, com esforços posteriores à trinca causando ramificações adicionais na mesma após a perda inicial da rigidez do vidro.

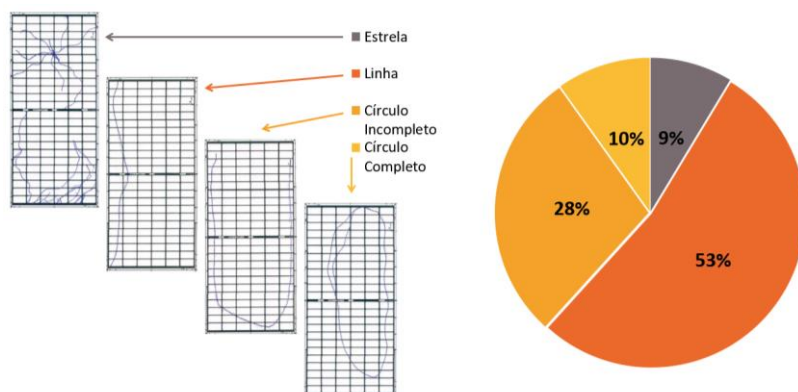


Figura 7 – Classificação dos módulos trincados da Fase 1 do estudo com base no formato da trinca. Valores percentuais têm como base os 71 módulos bifaciais de silício cristalino trincados instalados em rastreadores.

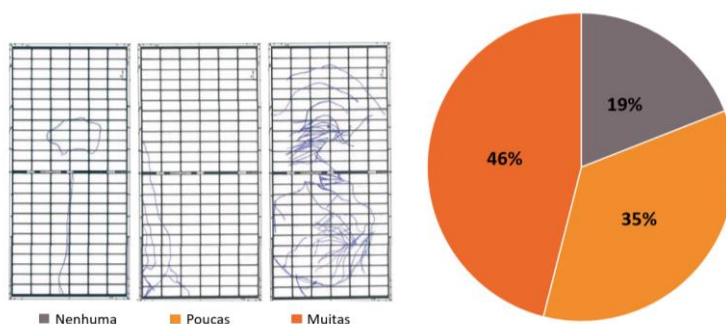


Figura 8 – Classificação dos módulos trincados da Fase 1 do estudo com base no número de ramificações das trincas. Valores percentuais têm como base os 71 módulos bifaciais de silício cristalino trincados instalados em rastreadores.

Os módulos instalados em sistemas com rastreamento em um eixo são fixados através de suportes metálicos de cerca de 1200 mm de comprimento denominados correias do tipo ômega. Cada suporte é fixado em dois pontos laterais do módulo e cada módulo necessita de duas correias (uma de cada lado) para ser instalado no rastreador. Foi analisado se as trincas passavam e/ou possuíam origem em algum destes pontos de fixação, de modo a buscar uma relação que pudesse indicar que a causa raiz do problema estaria relacionada a esforços no ponto de fixação do módulo no suporte através do sistema correia-parafuso-moldura-vidro.

A compilação destes dados pode ser observada no gráfico da Fig. 9, onde podemos notar que cerca de metade dos módulos quebrados não apresenta trincas que passem por qualquer um destes quatro pontos. Pode-se assim destacar a hipótese de que há relação entre o ponto de fixação e o surgimento das trincas.

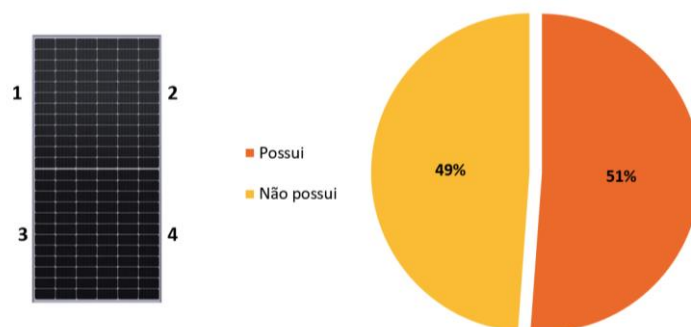


Figura 9 – Classificação dos módulos trincados da Fase 1 do estudo com base na intersecção das trincas com os pontos de fixação dos módulos. Valores percentuais têm como base os 71 módulos bifaciais de silício cristalino trincados instalados em rastreadores.

Os módulos FV apresentam em sua parte traseira três caixas de junção situadas na região da linha central horizontal. A presença de trincas em uma ou mais destas caixas de junções foi analisado, pois neste ponto há uma perfuração no vidro traseiro do módulo para viabilizar uma interface de conexão entre as células e a parte externa ao encapsulamento. Esta perfuração faz com que este seja um ponto mais frágil do vidro traseiro, possivelmente mais susceptível ao alívio de tensões geradas no vidro (trincas). A compilação destes dados pode ser encontrada no gráfico da Fig. 10.

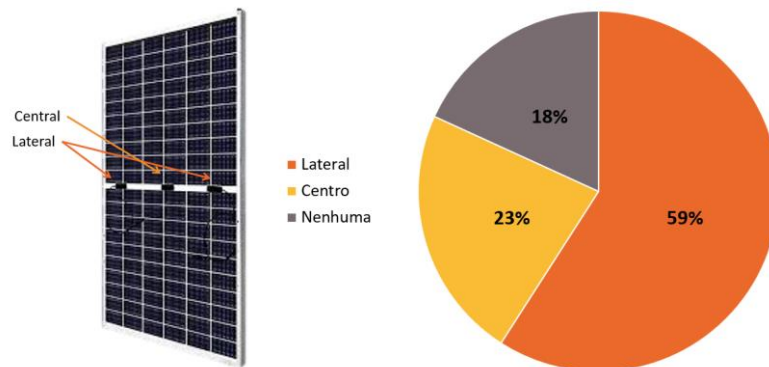


Figura 10 – Classificação dos módulos trincados da Fase 1 do estudo com base na intersecção das trincas com as caixas de junção dos módulos. Valores percentuais têm como base os 56 módulos bifaciais de silício cristalino trincados no vidro posterior e instalados em rastreadores.

Observa-se que a maior parte das trincas no vidro posterior dos módulos passa por alguma das caixas de junção (82%), havendo uma predominância em trincas próximas às caixas laterais (59%), o que pode indicar apenas uma distribuição de certa forma homogênea entre as trincas que passam pelas três caixas de junção (duas laterais e uma central). Este resultado não necessariamente indica que as trincas têm causa raiz relacionada à instalação das caixas de junção, mas sim que este ponto é mais frágil e acaba sendo um ponto de alívio das tensões no vidro através da trinca.

A planta piloto e seus sistemas FV foram monitorados mensalmente com avaliação de sua potência máxima (curva IV), termografia infravermelha (aérea e com câmera manual) e imagens de eletroluminescência, entre outros testes elétricos quando necessário. Até a primeira metade de março de 2023 não foi detectada degradação de desempenho nos módulos instalados que estavam danificados. Entretanto, no fim de março de 2023 foi possível identificar a entrada de umidade e delaminação na região do vidro trincado de alguns módulos fotovoltaicos. Durante os ensaios de resistência de isolamento, constatou-se que o isolamento dos sistemas havia sido comprometido.

Sendo assim, no fim de março de 2023 todos os módulos bifaciais de silício cristalino instalados nos quatro rastreadores de um eixo foram substituídos por módulos novos, independentemente dos seus estados, totalizando 104 substituições. Os módulos utilizados para repor aqueles retirados foram adquiridos junto com os módulos originais, sendo idênticos entre si e fazendo parte do mesmo container. Neste mesmo momento, as correias de suporte do tipo ômega de dois dos quatro rastreadores foram substituídas para peças menores de 790 mm, por recomendação da empresa fabricante dos módulos FV. Durante a substituição, a equipe técnica do fabricante dos rastreadores avaliou novamente a instalação da planta piloto, suas estruturas de sustentação e propriedades construtivas dos módulos, assegurando que a construção e implementação das instalações não possuíam relação com as trincas encontradas nos módulos.

5. RESULTADOS DA FASE 2

A então denominada “Fase 2” baseou-se no acompanhamento da evolução do surgimento de trincas nos módulos novos entre abril de 2023 e novembro de 2023 de maneira semelhante à Fase 1. O crescimento do número de módulos com trinca no vidro ao longo deste período pode ser observado na Fig. 11. Observa-se uma taxa de trincas menor do que na Fase 1, com cerca de apenas 3% dos módulos de silício em rastreadores da usina sendo danificados a cada mês da análise, em média. Este mesmo indicador para a Fase 1 foi de 9,6% ao mês. Na Fase 1 foi ainda possível verificar um aumento na taxa de trincas nos meses de verão, os quais não puderam ser avaliados durante a Fase 2 ainda.

Podemos observar na Fig. 12 que a distribuição quanto ao formato das trincas deu-se de maneira muito uniforme, não havendo predominância exacerbada de um dos padrões em específico, diferentemente da Fase 1, onde o formato “linha” correspondia à mais de 50% dos módulos dos formatos encontrados em módulos que apresentaram fissuras.

Na Fig. 13, podemos observar que as trincas avaliadas na Fase 2 possuem menos ramificações do que aquelas analisadas na Fase 1, com 64% dos módulos com nenhuma ou poucas ramificações; enquanto na Fase 1 este percentual era de 54%, com 46% das trincas apresentando muitas ramificações. Este fato pode estar relacionado ao fato de que o estudo anterior foi conduzido apenas ao fim do período de avaliação, após trincas inicialmente com poucas ramificações terem se expandido em função da perda da rigidez do vidro, enquanto a análise da Fase 2 foi conduzida com inspeções detalhadas e semanais do formato das trincas.

Para a Fase 2, a presença de trincas nas caixas de junções deu-se de maneira equilibrada, não havendo predominância de fissuras em uma região em específico. Contudo, houve um incremento significativo em trincas que não passam por nenhuma das três caixas, o que afasta ainda mais a hipótese de que o aspecto construtivo das caixas e sua interface como

o interior do encapsulamento do módulo esteja relacionado com a causa raiz das trincas, mas sim que este ponto é mais frágil e acaba, ocasionalmente, sendo um ponto de alívio das tensões no vidro. A compilação destes dados pode ser observada no gráfico da Fig. 14.

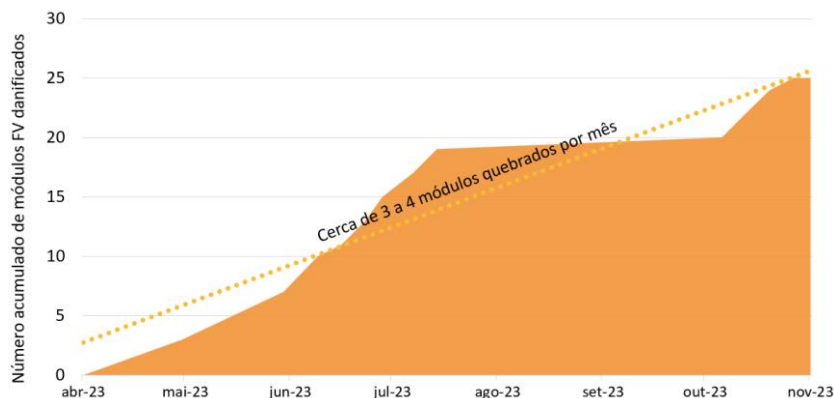


Figura 11 – Gráfico representando o número acumulado de módulos com vidro trincado na Fase 2 do estudo de caso da planta piloto.

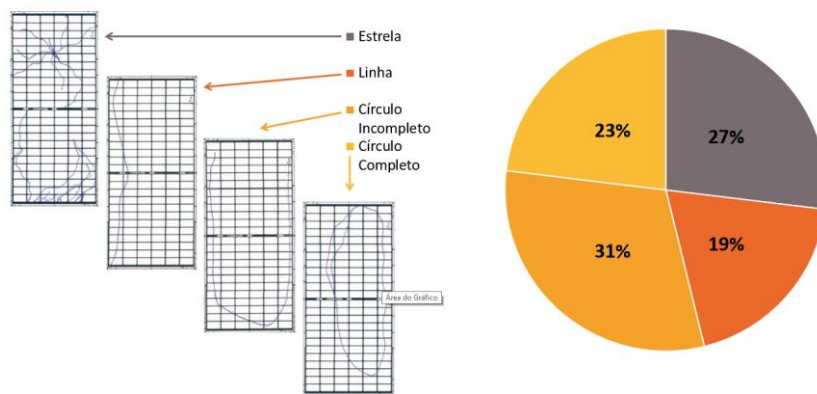


Figura 12 – Classificação dos módulos trincados da Fase 2 do estudo com base no formato da trinca. Valores percentuais têm como base os 25 módulos bifaciais de silício cristalino trincados instalados em rastreadores.

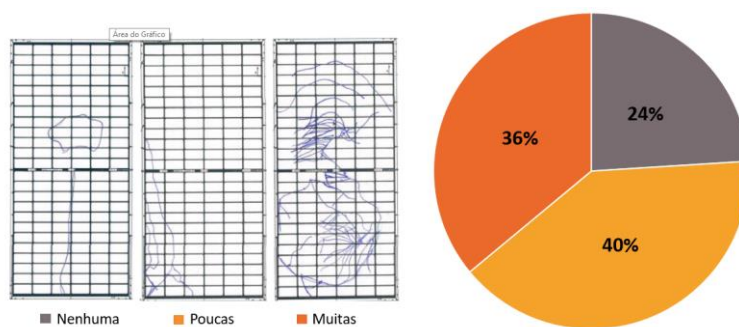


Figura 13 – Classificação dos módulos trincados da Fase 2 do estudo com base no formato da trinca. Valores percentuais têm como base os 25 módulos bifaciais de silício cristalino trincados instalados em rastreadores.

Como podemos analisar na Fig. 15, a Fase 2 apresentou maior incidência de trincas presentes nos pontos de fixação. Ambos os tamanhos de suporte correia tipo ômega apresentam trincas (Fig. 16), mostrando que esta não é a causa raiz do problema. Ainda assim, como o espaço amostral é pequeno, não é realmente possível correlacionar o aspecto construtivo dos ômegas com uma maior incidência de trincas.

Durante a última inspeção realizada em 25 de outubro de 2023, a planta piloto apresentava 25 módulos trincados, como mostra a Fig. 16. Nota-se uma diminuição no número de trincas ao total, assim como também uma desaceleração da sua taxa de ocorrência. Este fato pode estar relacionado a época do ano em que as duas fases do estudo ocorreram: a Fase 1 teve o surgimento de mais trincas no verão, enquanto a Fase 2 teve temperaturas mais amenas.

Observa-se que há uma incidência menor de trincas nos rastreadores com correia de suporte tipo ômega menores (790 mm, dois rastreadores do meio); entretanto, como todos os rastreadores apresentam um número considerável de trincas, não é possível estabelecer correlação entre a causa raiz do problema e o tamanho da correia. Além disso, um quarto dos módulos do sistema analisado apresentam fissuras, um percentual significativo e ainda preocupante. A equipe técnica responsável continua a monitorar o aparecimento de trincas ao longo do ano de 2023.

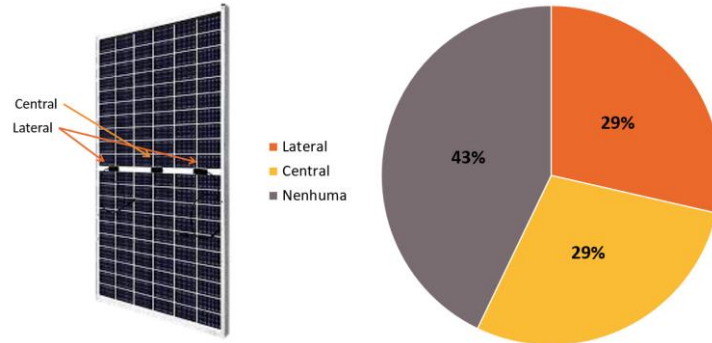


Figura 14 – Classificação dos módulos trincados da Fase 2 do estudo com base na intersecção das trincas com as caixas de junção dos módulos. Valores percentuais têm como base os 11 módulos bifaciais de silício cristalino trincados no vidro posterior e instalados em rastreadores.

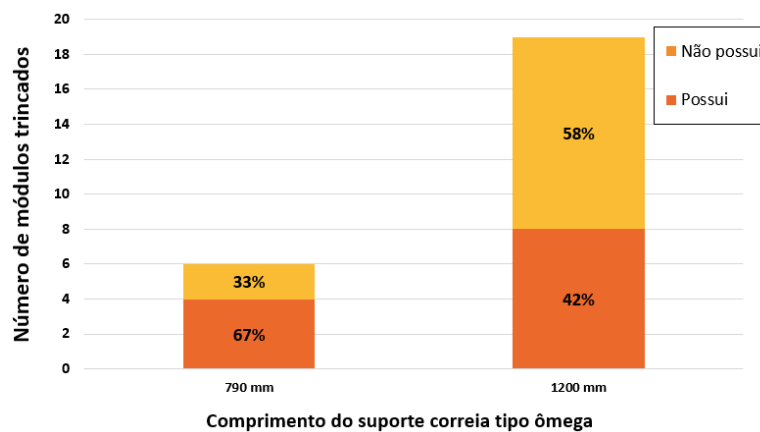


Figura 15 – Classificação dos módulos que apresentaram trincas em pontos de fixação. Valores percentuais tem como base os 6 módulos trincados em rastreadores com ômega de 790 mm e 19 módulos com ôegas de 1200 mm.



Figura 16 – Imagem aérea da usina FV destacando os módulos trincados analisados na Fase 2 deste estudo de caso. Os rastreadores com correia de suporte ômega mais curtos são indicados na imagem.

6. DISCUSSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

Ao longo do acompanhamento do projeto, foram realizadas tentativas para identificar correlações entre vários fatores estruturais e ambientais que poderiam estar relacionados ao surgimento de novos módulos danificados, bem como avaliar os impactos das trincas no desempenho e segurança dos sistemas. Excetuando o episódio de ventos fortes em agosto de 2022, não foram identificadas correlações entre eventos climáticos e o surgimento de novas trincas. Isso é particularmente notável, pois a manifestação de módulos quebrados ocorreu de forma contínua ao longo do período analisado, independentemente de condições climáticas extremas. Foi possível correlacionar um aumento na taxa de surgimento de trincas com meses de maior temperatura; contudo, isto não indica a causa raiz do problema, apenas que temperaturas mais elevadas podem ser um catalisador do problema em questão.

Foram realizadas tentativas de relacionar a posição dos módulos nos rastreadores com o surgimento de trincas, com base na hipótese de a torção do eixo estar causando os problemas, mas não foi encontrada correlação. Foi observada a posição das trincas na planta fotovoltaica, para verificar se, apesar da pequena escala, determinada zona ou lado da usina estaria mais susceptível ao vento predominante ou outro agente de *stress* mecânico; no entanto, dado que as rachaduras surgiram uniformemente por toda a usina, não foi possível estabelecer uma correlação entre posição relativa e um maior número de quebras. As análises do formato e demais características das trincas não foram conclusivas em identificar a causa raiz do problema, apesar de ainda haver certos padrões e aspectos mais sensíveis nos módulos, como as caixas de junção no vidro posterior.

A experiência obtida pela equipe neste estudo de caso mostra que as trincas em vidro semitemperado são de difícil identificação através da inspeção visual ou imagens de drone, sendo este tipo de atividade certamente inviável em usinas de maior escala. Durante o período de avaliação do estudo de caso, observou-se que falhas elétricas associadas a trincas demoram para se manifestar, sendo que o primeiro indício se dá através da falha de isolamento. Esta falha é de difícil identificação em campo, podendo causar o desligamento de frações importantes da usina quando capturada pelo inversor, principalmente pela manhã e em dias chuvosos ou úmidos. Observou-se que somente em um estado avançado a trinca evolui para uma delaminação, podendo causar um ponto quente e perdas na eficiência do módulo, que será finalmente visível em testes que facilitam a localização espacial do módulo danificado, como a termografia infravermelha aérea.

A atribuição da causa a problemas estruturais nos módulos torna-se desafiadora, uma vez que esses passam por rigorosos testes de qualificação para obter certificações, como os *Module Quality Tests* (MQTs) da IEC 61215:2021 e os *Module Safety Tests* (MSTs) da IEC 61730:2016, e o regime de testes do INMETRO, que estabelecem padrões mínimos. Além disso, há ainda testes adicionais muitas vezes realizados por fabricantes de módulos FV, buscando um diferencial de maior confiabilidade de seus produtos. Contudo, ainda assim há exemplos de testes independentes com resultados que podem indicar um alerta. A exemplo, o laboratório PVEL, através de uma nova metodologia para testes de tensão mecânica (*Mechanical Stress Sequence* – MSS), mostra que um mesmo módulo que apresentou bons resultados ao teste padrão das certificações não possui o mesmo resultado a novas metodologias de avaliação. A utilização de uma nova metodologia sugere a necessidade de explorar novos cenários para uma certificação abrangente, incluindo a montagem em rastreadores, por exemplo, e uso de cargas dinâmicas.

Considerando o crescente desenvolvimento da capacidade fotovoltaica no Brasil, que adota rapidamente módulos de alta potência em projetos extensos, especialmente os bifaciais, é crucial atentar para os desafios associados. Com módulos cada vez maiores com moldura e vidros mais finos, sendo estes últimos sujeitos a um tratamento térmico inferior, podem surgir módulos mecanicamente frágeis e susceptíveis a quebra sob fatores de estresse mecânico como em áreas sujeitas a ventos fortes e eventos climáticos intensos.

Além de questões de *design* de módulo, é possível ainda que as falhas sejam fruto da baixa qualidade dos materiais empregados na construção dos módulos FV. No passado, a indústria já observou problemas generalizados relacionados a baixa qualidade de *backsheets*, por exemplo, que afetaram o desempenho, taxa de falhas e durabilidade de módulos FV em todo o mundo (WEBER *et al.*, 2023). Neste caso, o problema estava relacionado com o fornecedor e qualidade do fornecedor do *backsheet*, podendo, em um mesmo lote de módulos FV, haver diversos *backsheets* diferentes, com boa e má qualidade. Isto trouxe uma maior atenção da indústria para os materiais empregados na construção dos módulos FV (*Bill of Materials* - BoM), sendo que hoje fabricantes de módulos já oferecem produtos especiais com materiais mais resistentes a custos diferenciados para aplicações mais extremas, como solar flutuante. No contexto de trincas no vidro, é possível que a qualidade do vidro empregado na construção dos módulos tenha relação direta com a susceptibilidade do mesmo a sofrer trincas em campo. O vidro semitemperado ainda oferece uma complexidade maior no teste de sua qualidade, quando comparado com o vidro temperado utilizado anteriormente. Com base nisso, sugere-se que a qualidade do vidro a ser empregado na construção dos módulos FV seja verificada ainda em fábrica, senão de forma voluntária e cotidiana pelo fabricante, ao menos contratualmente no fornecimento, de modo a garantir a qualidade do produto final, e proteger o fabricante do módulo no caso de ocorrência de trincas nos módulos em campo por razões ambientais ou de instalação inadequada.

A questão de trincas se estende ainda à responsabilidade e ao sigilo entre os envolvidos em projetos de grande escala, onde a falta de compartilhamento de problemas dessa natureza dificulta a identificação e análise de ocorrências semelhantes em outros locais, afetando assim a capacidade do setor de avaliar e resolver o problema. A atribuição de responsabilidade é questionável também, sendo que EPC e O&M, como elos mais vulneráveis da cadeia, frequentemente são alvos de culpabilização, e o processo de responsabilidade pode ser extremamente demorado, trazendo despesas e ônus aos responsáveis pelo desempenho da usina.

Diante da aparente desconexão entre a certificação do produto, a aprovação do projeto e as falhas experimentadas em campo, levanta-se a indagação sobre a representatividade dos testes realizados para as diversas certificações. Os procedimentos atuais podem não ser suficientemente rigorosos para acompanhar as novas tendências do mercado. Assim, recomenda-se também a revisão das normativas visando a realização de testes mais específicos para cada produto e projeto (diferentes tipos de montagem, BoMs, etc.), e com metodologias inovadoras que possam abordar fatores ainda não considerados, como cargas dinâmicas.

Este estudo de caso continua em andamento, assim como o constante monitoramento da planta piloto para alcance dos objetivos originais do projeto. Entretanto, dado o grau das problemáticas já citadas apresentadas pelas trincas, determinar sua causa raiz tornou-se um objetivo de igual ou maior importância do que os inicialmente estabelecidos. Nesse sentido, a equipe responsável segue tomando decisões e adotando medidas com foco neste objetivo. Foram instalados extensômetros em módulos selecionados para novas análises e possíveis *insights* provenientes de seus resultados. Parcerias e colaborações com fabricantes de módulos, rastreadores, e institutos de pesquisa, no âmbito nacional e internacional, foram fechadas, permitindo a aquisição de novos módulos de fabricantes distintos e proporcionando a realização de análises complementares buscando um maior espaço amostral de dados, variáveis e cenários. Adicionalmente, a equipe tem atuado em conjunto com empresas do setor na análise de casos semelhantes em usinas comerciais, sendo que o trabalho conjunto tem se mostrado essencial no aprofundamento do conhecimento neste tema.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CTG Brasil pelo suporte financeiro a este estudo através do projeto PD-10381-0620/2020 realizado em parceria com o SENAI-RN ISI-ER e a UNESP-Ilha Solteira no âmbito do programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os autores agradecem também aos colegas do laboratório Fotovoltaica-UFSC que não participaram diretamente desta pesquisa, mas ajudaram na instalação e manutenção dos sistemas utilizados no estudo, e pelas discussões frutíferas sobre os temas abordados nesse artigo. Em especial, gostaríamos de agradecer aos colegas Anelise Medeiros Pires, Thamires Alves da Silva, Alessandro Zamboni, Gustavo Xavier Pinto de Andrade, Eduardo Augusto Brunetto e Lessandro Formagini que auxiliaram no levantamento e análise das trincas avaliadas na Fase 1 deste estudo de caso. Marília Braga agradece ainda o apoio recebido da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –Brasil (CAPES) através de suas bolsas de doutorado.

REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., Sparovek, G., Köppen's climate classification map for Brazil, 2013, Meteorologische Zeitschrift Vol. 22 No. 6 (2013), p. 711 – 728
- Cheng, T., Al-Soeidat, M., Lu, D.D.-C. and Agelidis, V.G., 2019. Experimental study of PV strings affected by cracks, The Journal of Engineering, July 2019, Volume 2019, Issue 18, pp. 5124 – 5128
- Dhimish, M., Holmes, V., Dales, M. and Mehrdadi, B., 2017. Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real-time long-term data measurements. Micro Nano Lett., n. 12, pp. 803-807.
- Oliveira, M. H. V. de., 2021. Impacto de Microfissuras em Módulos Solares de Silício em Sistemas Fotovoltaicos, Tese de Conclusão de Curso, UCS, Caxias do Sul.
- VDMA. (2023). Photovoltaic Equipment International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2022 Results, 14 Edition, pp 34-45
- Weber, T., Xuereb, S., Lorico, T. E., 2023. Glass Breakage – a growing phenomenon in large-scale PV, Webinar, PV Magazine

CASE STUDY ON THE INCIDENCE AND PATTERNS OF GLASS CRACKS IN LARGE-AREA BIFACIAL SILICON GLASS-GLASS PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *This case study details a phenomenon of spontaneous cracks, the origin of which remains unknown, manifesting in bifacial monocrystalline silicon modules during a Research and Development project at the Photovoltaic Laboratory–UFSC, located in Florianópolis/SC – Brazil. The modules in question, with a power output of 645 Wp and dimensions of 2400 x 1300 x 33 mm, weight of 38 kg, and an area of 3 m², feature both sides coated with 2 mm semi-tempered glass. The project was conceived as a 100 kWp photovoltaic plant composed of 158 modules, aiming to analyze the performance of next-generation bifacial and thin-film modules under various albedo conditions and extreme temperature, irradiance, and soiling conditions. The objective was to evaluate the performance of these systems and seek to maximize photovoltaic generation. However, during the project, it became necessary to establish a specific research focus to analyze the cracks that emerged in the modules, seeking to comprehend the phenomenon, its relevance to the broader technology context, and its impacts on the safety and performance of photovoltaic systems. The subsequent study covered the crack occurrence rate, patterns of formats, number of branches, incidence on constructional aspects, and other relevant criteria. Although inconclusive, the results propose considerations regarding the tests currently employed for certifications, as well as reflections on the quality tests of inputs used in module manufacturing and the rapid implementation of innovative technologies, emphasizing the necessary caution in the face of technological innovations.*

Keywords: *Quality of PV Modules, Glass Cracks, Failure Modes*