

## Aterramento Funcional em Sistemas Fotovoltaicos de Filme Fino

Renan de Oliveira Alves Takeuchi\*. Nicole Polityto Cremasco.\*\*  
Jair Urbanetz Junior.\*\*\*

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Curitiba, PR 80230-901, Brasil.*

\* e-mail: *renan.takeuchi@gmail.com*

\*\* e-mail: *nicolepolityto@gmail.com*

\*\*\* e-mail: *urbanetz@utfpr.edu.br*

---

**Abstract:** Associated with the expansion of the photovoltaic sector, studies of the loss factors presented in operating plants have gained notoriety in the literature for the search for understanding the cause and solutions of the damage. In the universe of thin film photovoltaic modules with superstructure structure, factors such as Potential-Induced Degradation (PID), electrochemical corrosion of the Conductive Transparent Oxide (TCO) layer and the delamination of the layers are more recurrent in the literature and are usually correlated through the potential of the photovoltaic generator and the leakage current. Some procedures are adopted to prevent the occurrence of these loss factors, ensuring the correct functioning of the system. Galvanic isolation is commonly suggested by module manufacturers, but this measure alone is not sufficient to fully address these loss factors. The functional grounding of thin film photovoltaic systems is indicated by module manufacturers as a resource to prevent the emergence of PID, through the uniform polarization of the cells when grounding the negative pole of the photovoltaic generator. Thus, this study presents a literature review regarding the loss factors that thin film modules are subject to, in addition to the procedures adopted to prevent the appearance of these loss factors. With this, it contributes as a quick guide for researchers and students in the photovoltaic field.

**Resumo:** Associado a expansão do setor fotovoltaico, estudos dos fatores de perdas apresentados em plantas em operação ganharam notoriedade na literatura pela busca do entendimento da causa e soluções dos danos. No universo de módulos fotovoltaicos de filme fino com estrutura de superstrato, fatores como a Degradação Induzida pelo Potencial (PID), corrosão eletroquímica da camada de Óxido Transparente Condutivo (TCO) e a delaminação das camadas são mais recorrentes na literatura e normalmente estão correlacionados através do potencial do gerador fotovoltaico e da corrente de fuga. Alguns procedimentos são adotados para evitar a ocorrência destes fatores de perda, garantindo o correto funcionamento do sistema. A isolação galvânica comumente é sugerida por fabricantes de módulos, porém essa medida isolada não é suficiente para solucionar integralmente esses fatores de perda. O aterramento funcional de sistemas fotovoltaicos de filme fino é indicado por fabricantes de módulos como recurso para impedir o surgimento do PID, através da polarização uniforme das células ao aterrar o pólo negativo do gerador fotovoltaico. Sendo assim, este estudo apresenta uma revisão da literatura referente aos fatores de perda que os módulos de filmes finos estão sujeitos, além dos procedimentos adotados para impedir o surgimento destes fatores de perda. Com isso, contribui como um guia rápido para os pesquisadores e estudantes no campo fotovoltaico.

**Keywords:** Grounding; Photovoltaic; Thin-film modules; Leakage currents; Potential Induced Degradation; Electrochemical corrosion.

**Palavras-chaves:** Aterramento; Fotovoltaico; Módulos de Filme fino; Corrente de fuga; Degradação Induzida pelo Potencial; Corrosão eletroquímica.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Um parâmetro para a avaliação do grau de desenvolvimento socioeconômico e tecnológico de um país está atrelado à capacidade produtiva e diversificação da sua matriz energética. Suprir a crescente demanda de consumo com a produção de energia através de fontes renováveis associado com exploração da geração distribuída têm sido um desafio enfrentado por diversos países pelo mundo. Nesse contexto, o uso de fontes alternativas de energia tem se fortalecido,

principalmente a eólica e a solar fotovoltaica, o que pode ser atestado pela potência adicionada na capacidade mundial em 2019 de 60 GW-eólica- e 115 GW-fotovoltaica- (REN 21, 2020). A tecnologia fotovoltaica (FV) teve um desenvolvimento considerável durante o final do último século e início do atual, com módulos FV sendo projetados de diferentes tamanhos e formas para atender diferentes aplicações. Aproximadamente 133 GWp de módulos FV foram produzidos em 2019 e dentre os filmes finos, a produção foi liderada pelo Telureto de Cádmio (CdTe), o qual teve sua

produção dobrada quando comparado com o ano anterior (Fraunhofer, 2020).

Pesquisadores buscam identificar os fatores de perda relacionados a degradação que surgem em plantas FV em todo mundo. Estes fatores são responsáveis pela redução significativa de potência ao longo do tempo, e consequentemente da vida útil do módulo. Este artigo se limitará a análise dos fatores de perda mais recorrentes na literatura entre os módulos de filme fino.

A Degradação Induzida pelo Potencial (*Potential Induced Degradation* – PID) é o fenômeno que afeta algumas tecnologias que possuem a tensão de operação acima de 600Vcc. Suas consequências afetam de forma mais incisiva a corrente, e está diretamente relacionada com a potência. Este fenômeno teve seu primeiro relato na literatura em 1985 pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) (Mon e Ross, 1985a; Mon et al., 1985), mas os registros de ocorrências em grandes sistemas FV começaram somente a partir do novo século. Momento que foram iniciados estudos em busca do entendimento e solução para o fenômeno (Del Cueto e McMahon, 2002; Carlson et al., 2003; Swanson, 2005; Rutschmann, 2008a; 2008b). A partir de 2010 o PID teve maior notoriedade, marcado pela publicação do estudo de Pingel et al. (2010) ao criar o termo “PID” que até então era tratado como Risco do Estresse de Alta Tensão (*High Voltage Stress* – HVS), direcionando um número significativo de estudos. Como resultado de estudos do fenômeno teve-se a sua caracterização, a exploração de técnicas de detecção, procedimentos de projeto para evitar o surgimento do PID e até mesmo métodos para a mitigação dos efeitos causados em plantas em operação (Takeuchi et al., 2019).

Apesar de se ter conquistado um progresso significativo no entendimento do PID no nível de célula e módulo, ainda perduram lacunas de explicações principalmente no universo dos filmes finos que apresentam um número menor de estudos na literatura. Se faz necessário uma evolução no conhecimento da ocorrência do PID em módulos de CdTe, pois há um crescimento de plantas FV compostas por módulos de CdTe, em escala de mega-watt em todo o mundo (Masuda, 2019).

A camada de Óxido Transparente Condutivo (*Conductive Transparent Oxide* - TCO) forma o contato superior da célula, normalmente é uma camada de óxido de estanho ( $SnO_2$ ) ou óxido de zinco ( $ZnO$ ). A corrosão do TCO é outro fenômeno de degradação recorrente em filmes fino e está associado a ocorrência do PID, especialmente para aqueles que apresentam a estrutura superstrato como método construtivo do módulo. Este fenômeno foi mencionado na literatura pela primeira vez 1987 também pela JPL (Mon e Ross, 1987). No ano seguinte Mon et al. (1988) relataram a corrosão em formato “gráfico de barras” observada em módulos de campo, onde a corrosão começou nas extremidades das células individuais e progrediu para dentro, porém não ocorreu na totalidade das células.

Geralmente, a corrosão se inicia na borda inferior do módulo FV e ela está associada a uma incursão de umidade no módulo (Carlson et al., 2003). O acúmulo de água na borda inferior tem como causa a necessidade do módulo FV possuir um ângulo de inclinação correspondente ao ângulo de latitude. Tendo essa inclinação, o módulo consegue atingir uma melhor

performance, mas também pode acumular água em sua borda, o que pode prejudicar o seu desempenho ao longo do tempo. As regiões danificadas mostram que o  $SnO_2$  tem sua aderência reduzida ao vidro, dando origem a delaminação (Osterwald et al., 2003).

Para a preservação dos módulos FV, estes devem ser herméticos, impedindo a entrada de umidade no módulo, mesmo em condições de ambientes úmidos. No entanto, havendo uma falha na vedação, a presença da umidade resultará na corrosão eletroquímica da camada TCO (Osterwald et al., 2003; Jansen e Delahoy, 2003). Vale ressaltar que esta corrosão é irreversível por se tratar de um dano interno do módulo, não sendo possível sua reparação.

Osterwald et al. (2003) realizaram diversos testes de corrosão eletroquímica em módulos FV de CdTe e Silício Amorfo (a-Si), simulando diferentes cenários. Os resultados apresentados mostraram que os módulos com moldura são afetados, tendo o crescimento da corrente de fuga e dos danos causados pela corrosão, diferente dos módulos sem moldura que não apresentaram danos visíveis. Porém foi comprovado que mesmo em módulos com estrutura composta por vidro sobre vidro, há correntes de fuga na região dos grampos de fixação (Hacke et al., 2016).

Deste modo, o presente trabalho visa contribuir como um guia rápido para os pesquisadores e estudantes no campo. São descritos os fatores de perda e os procedimentos adotados para garantir o correto funcionamento do sistema FV de filme fino.

## 2. FATORES DE PERDA

### 2.1 Corrosão da TCO

Quando se tratam de filmes finos com estrutura superstrato, como o a-Si e o CdTe, a camada de TCO é depositada sobre o vidro frontal como ilustrado na Fig. 1. Esta camada está sujeita à corrosão eletroquímica quando se têm a polarização negativa do gerador FV provocada pela topologia de projeto que impõe esta polarização. Esta situação ocorre no caso do aterramento do polo positivo ou quando o sistema está operado em flutuação. Fatores como a umidade e temperatura no interior do módulo atuam como catalisadores da corrosão.



Fig. 1. Estrutura superstrato de módulos fotovoltaico de filme fino. (SMA, 2012)

Dois cenários diferentes podem ocorrer dependendo da presença ou não da umidade no interior do módulo. Na ausência de umidade, o íon de sódio carregado positivamente ( $Na^+$ ) presente no vidro frontal é reduzido ao  $Na$  elementar. Jansen e Delahoy (2003) atestaram essa redução como responsável pelo escurecimento em filmes de  $SnO_2$  e em  $ZnO$ . O acúmulo de  $Na$  também afeta de forma significativa o desempenho elétrico, apesar de ser reversível (Fjällström et al.,

2013; Yamaguchi et al., 2015). Em contrapartida, quando existe a presença de umidade no interior do módulo, uma combinação de redução de  $Na^+$  com a umidade resultará em uma corrosão eletroquímica não reversível da camada do camada TCO à base de  $SnO_2$  (Carlson et al., 2003; Osterwald et al., 2003; Jansen e Delahoy, 2003). A reação química ocorre por três etapas separadas, conforme indicado em (1), (2) e (3):

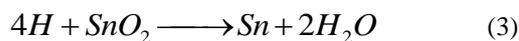
Reação de redução de  $Na$ :



Formação do hidrogênio elementar:



Reação de oxidação-redução:



O acúmulo de  $Na$  e a corrosão aumentam o estresse mecânico, formando fissuras, e pode vir a delaminar as camadas, como mostra a Fig. 2, logo sua capacidade condutora é reduzida, assim como o desempenho do módulo.

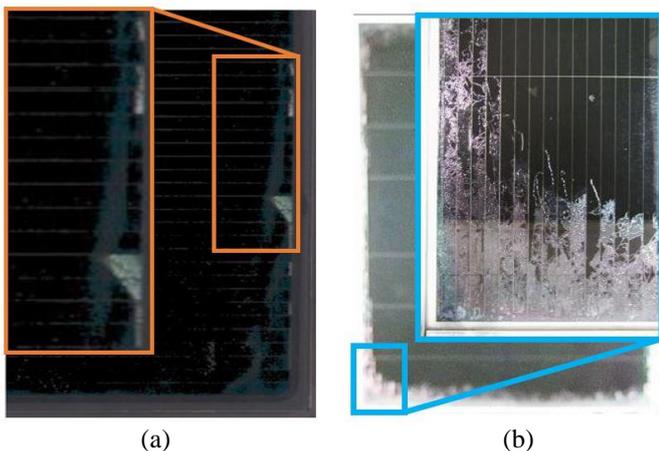


Fig. 2. Corrosão na camada de TCO e delaminação em módulos de filme fino superstat sendo (a) CdTe (Hacke et al., 2015) e (b)  $\mu$ c-Si (Weber et al., 2017).

Aterrando o polo negativo do gerador FV, conforme ilustrado na Fig. 3, é a ação sugerida por fabricantes de módulos e inversores (Calyxo, 2017; Solibro, 2017; SMA, 2012). O fundamento para esta recomendação é a polarização positiva uniforme das células, a qual provoca um campo elétrico no qual os íons de sódio carregados positivamente são repelidos, afastando-se da camada TCO. Associado a isolamento galvânica, realizar o aterramento do polo negativo evita seguramente a corrosão.

## 2.2 Degradação induzida pelo Potencial

O PID (*Potential Induced Degradation*) é um efeito indesejado de degradação do módulo FV que pode causar perdas significativas de potência ao longo do tempo.

A tensão elevada característica em sistemas compostos por módulos FV de filme fino pode dar origem a correntes de fuga indesejadas entre as células e outras partes dos módulos. A moldura ou grampo metálico de fixação dos módulos é sempre

aterrada por questões de segurança como já abordado. Portanto em topologias de inversores que não permitem o aterramento do pólo positivo ou negativo do arranjo FV existe uma diferença de potencial entre as células e a moldura ou entre as células e o vidro. Os efeitos do PID conhecidos em diferentes tecnologias têm uma característica comum: a degradação depende da polaridade e da diferença do potencial entre a célula e a terra (Pingel et al., 2010).

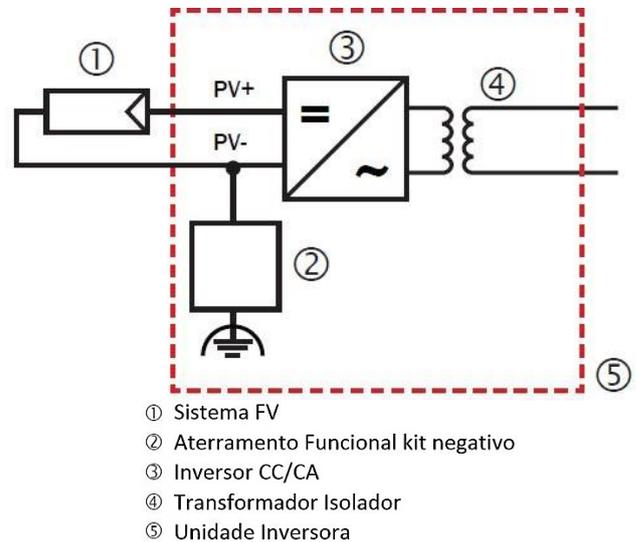


Fig. 3. Aterramento funcional do polo (Solibro, 2017).

Através de testes de PID acelerados em laboratório, Masuda et al. (2019) apresenta a Fig. 4, na qual são ilustrados os padrões de corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), fator de forma (FF) e potência máxima ( $P_{max}$ ) para módulos FV de CdTe em função da duração do teste de PID com valores de tensão de -500, -1000 e -2000Vcc.

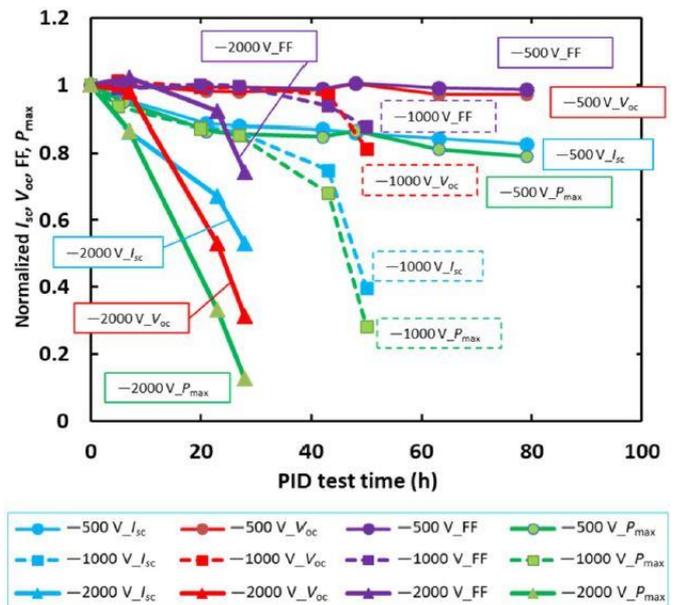


Fig. 4. Comportamento dos parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico de CdTe em função do tempo de teste de PID (Masuda, 2019).

Observa-se que  $I_{sc}$  possui a maior redução em relação ao FF e  $V_{oc}$ , independente da tensão. Quando aplicado a tensão de

-2000V tem-se uma redução significativa. Com a aplicação de tensão de -500V, a degradação progride lentamente, situação em que o Voc e FF possuem baixos valores de diminuição. Portanto, a ocorrência do PID em módulos de CdTe têm relação direta com a tensão aplicada no teste, ou seja, a potencial do gerador FV.

Os módulos afetados pela ocorrência do PID em campo apresentam uma redução significativa do desempenho em um tempo de operação relativamente curto. Olsson et al. (2014) analisou a manifestação do PID em um sistema FV de aproximadamente 3 MW. Este era composto por módulos de CdTe, com *strings* de 1000Vcc e conectados a inversores sem transformador e sem aterramento funcional. Foi constatado nos resultados que a maioria dos módulos tiveram uma degradação na faixa de 5% a 20%, após aproximadamente um ano após o comissionamento da instalação.

### 3. PROCEDIMENTOS ADOTADOS

Com base nos fundamentos encontrados na literatura, conclui-se que há necessidade de adotar parâmetros no projeto do sistema FV. O cunho disto é garantir correto funcionamento do sistema, eliminando a possibilidade da ocorrência dos fatores de perda apresentados. Estes parâmetros serão detalhados nas subseções a seguir.

#### 3.1 Isolação Galvânica

Os inversores utilizados em sistemas FV apresentam diferentes tipos de construção (topologia), variando os circuitos de conversão de energia e opções de transformadores, a exemplo de inversores com transformador de alta ou baixa frequência ou sem transformador. Cada topologia possui características próprias, implicando em vantagens e desvantagens umas em relação às outras (Urbanetz Jr, 2010; Oliveira, 2012).

O potencial do gerador é definido durante o modo de alimentação dos pólos positivo e negativo do módulo FV. Conforme a topologia adotada, a tensão em corrente contínua na entrada do inversor em relação a um referencial terra (0 V) é dividida simetricamente ou não. A Fig. 5 ilustra como a tensão do gerador FV é vista pelo inversor de acordo com a topologia adotada e a polarização do gerador FV. As linhas em vermelho representam a tensão entre o polo positivo e o terra, e as linhas em azul representam a tensão entre o polo negativo e o terra.

As duas leituras da direita na Fig. 5 representam inversores com a topologia que contempla o uso do transformador para obter a isolação galvânica entre os circuitos de potência em corrente contínua do arranjo FV, e o circuito de potência em de corrente alternada de saída do inversor. O isolamento galvânico também pode ser fornecido externamente, como, por exemplo, por um transformador externo. Neste caso é recomendado que não haja qualquer outro equipamento conectado ao circuito formado entre o inversor e o transformador. Os requisitos para inversores são estabelecidos na IEC 62109-2.

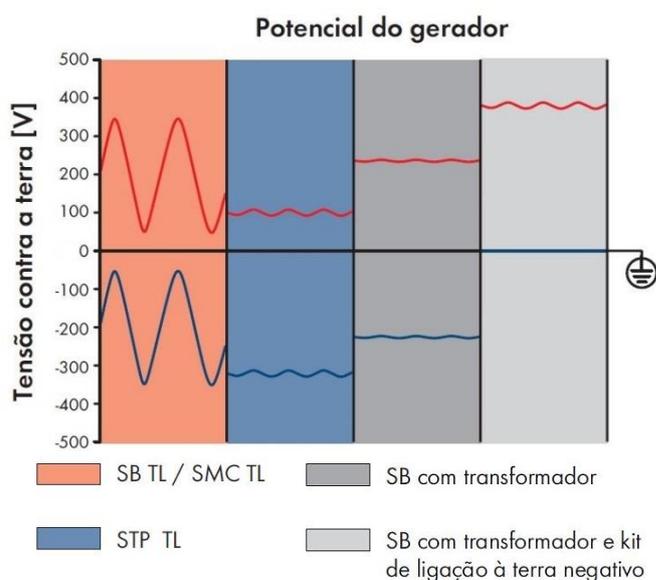


Fig. 5. Leitura das tensões em relação ao terra dos pólos de um gerador fotovoltaico em diferentes topologias e potencial do gerador. Sendo: SB-Sunny Boy; TL-Transformerless; SMC-Sunny Mini Central; STP-Sunny Tripower (SMA,2012).

Fabricantes de módulos FV de filme fino indicam que, dependendo da regulamentação do local de instalação, o projeto do sistema FV pode adotar uso do inversor com topologia sem transformador se o potencial do circuito de potência de corrente contínua em relação ao terra for menor que 600 Vcc (Calyxo, 2017).

#### 3.2 Aterramento de Sistemas Fotovoltaicos

Dado às recorrentes falhas em sistemas elétricos, e às consequências negativas que elas causam a eles, há necessidade de utilização de aterramento para a proteção dos sistemas. As normas que se relacionam com o aterramento em sistemas FV são: a norma ABNT NBR 5410:2004, que regulamenta o aterramento de instalações elétricas de baixa tensão, e a recente norma ABNT NBR 16690:2019, baseada na IEC/TS 62548:2013, que trata dos requisitos de projeto de instalações elétricas de arranjos FV.

O aterramento visa garantir sobretudo um caminho prioritário às correntes elétricas indesejáveis de surto, falta ou fuga, visando evitar riscos para as pessoas e os equipamentos, assim como garantir o correto funcionamento das instalações.

Existem dois principais tipos de aterramento em Sistemas Elétricos, sendo eles: Aterramento para Proteção e Aterramento Funcional. A proteção trata-se da ligação à terra de um ponto do equipamento ou sistema por razões relacionadas a segurança. Já no funcional tem-se um condutor intencionalmente conectado à terra com o objetivo de garantir o correto funcionamento do sistema, ou seja, por propósitos não relacionados à segurança, por meios que não estejam em conformidade com os requisitos para equipotencialização de proteção (ABNT, 2019).

Em arranjos FV os dois tipos de aterramento são normatizados, sendo o aterramento para proteção um ponto pacífico. Portanto, este artigo explorará o aterramento funcional.

A determinação do tipo de esquema de aterramento mais apropriado no circuito de corrente contínua está relacionada a tecnologia de módulo e do inversor utilizado. Por isso devem ser consideradas as especificações dos fabricantes de módulos FV e de inversores previamente (Pinho e Galdino, 2014). Dentre as tecnologias consolidadas no mercado, as de silício cristalino geralmente são instaladas em flutuação, enquanto as de filme fino devem ter um dos seus pólos aterrados. Para que isso seja possível, os sistemas necessitam da isolação galvânica entre os lados corrente contínua e em corrente alternada, podendo ser interna ao inversor ou em sua saída. Sendo esta a topologia ideal para a implementação do aterramento funcional (Figueiredo, 2017).

Para a correta execução do aterramento funcional a norma ABNT NBR 16690:2019 relaciona algumas condições que devem ser seguidas:

- Existência de no mínimo isolação galvânica entre os circuitos em corrente contínua e em corrente alternada (ABNT, 2019);
- Aterrar um dos pólos do gerador FV em um único ponto do arranjo FV, entre o dispositivo interruptor-seccionador do arranjo FV e a entrada do inversor, de preferência o mais próximo ao dispositivo interruptor-seccionador (ABNT, 2019);
- Quando aterrado diretamente por razões funcionais é requerida a proteção por desconexão automática do aterramento ou quando aterrado via resistência por razões funcionais é requerida proteção por um dispositivo supervisor de isolamento (ABNT, 2019).

A razão funcional analisada durante a determinação do polo a ser conectado a terra está relacionada com o potencial elétrico durante o funcionamento do módulo FV. Os apontamentos de fabricantes indicam a distinção de dois casos (Carlson et al., 2003, Wohlgemuth et al., 2000 e SMA, 2012):

- Módulos com células tipo n polarizam com o potencial positivo, situação em que a solução recomendada é a ligação a terra do polo positivo do gerador;
- Módulos com células tipo p são incitados pelo potencial negativo, situação que pode ser evitada pela ligação à terra do polo negativo do gerador.

A ligação à terra de um dos polos do gerador FV de filme fino é uma medida tomada para a polarização uniforme das células.

#### 4. CONCLUSÕES

Este artigo realizou revisão bibliográfica a respeito dos fatores de redução do rendimento de sistemas FV em função da degradação, por meio de PID e corrosão do TCO. Além disto, foram apresentados também conceitos relativos a medidas de proteção dos sistemas, sendo elas a isolação galvânica e o aterramento.

A polarização das células pode levar o surgimento de correntes de fuga e estas dependem diretamente do potencial do gerador FV contra o terra. Tratando de módulos FV de filmes finos com estrutura de superstrato a polarização negativa

potencializa os níveis da corrente de fuga, que está associada a ocorrência do PID. Quando o módulo não possui moldura têm-se um fator positivo, pois há redução da corrente de fuga e consequentemente os danos também são menores, mas estes ainda estão presentes devido a corrente de fuga em direção aos grampos de fixação.

O acúmulo de  $Na$  na camada TCO depende da direção dos campos elétricos internos, apesar de reversível através da polarização, apresenta-se como causador do escurecimento em filmes de  $SnO_2$  e em  $ZnO$ , além disto está associado com a corrosão eletroquímica. Estes módulos podem exibir degradação de desempenho em campo quando submetidos a altas tensões, temperatura elevadas em clima úmido. A corrosão eletroquímica da camada TCO ocorre devido a combinação do acúmulo de  $Na$ , e da presença de umidade no interior do módulo, gerando rachaduras iniciadas das extremidades que se expandem para o interior do módulo, porém nem sempre todas as células são afetadas, por isso visualmente se assemelham a um “gráfico de barras”. Cabe reforçar que os danos causados pela ocorrência do PID em filme fino, como a corrosão e a delaminação, são irreversíveis. Diferentemente dos módulos de silício convencionais, que possuem a reversibilidade do fenômeno PID. Tornar a camada TCO em um material com uma alta tolerância a presença de umidade é um desafio, sendo um fator chave na obtenção de um módulo filme fino do tipo superstrato altamente confiável contra o PID.

Pode não ser necessário o uso da isolação galvânica em sistemas FV quando a tensão de operação não ultrapassar os 600 Vcc. Porém, com o crescimento dos sistemas a indústria FV atualmente já comercializa equipamentos que trabalham com tensões máximas de 1000V e 1500V. Nestes casos, é necessária a implementação da isolação galvânica, mas ela por si só não basta para solucionar o problema.

O aterramento funcional feito corretamente se apresenta como solução de projeto para evitar a ocorrência do PID, pois este propicia a polarização uniforme das células. A polarização positiva imposta pelo aterramento do polo negativo do gerador gera um campo elétrico no qual os íons de sódio carregados positivamente são repelidos, afastando-se da camada TCO, findando o acúmulo de  $Na$ . Salvaguardando então a integridade da camada TCO. A garantia que o módulo FV seja hermeticamente fechado é um desafio para os fabricantes, que podem portanto retirar a corrosão na sua base de desenvolvimento.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UTFPR pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa e a COPEL-Distribuição pelo apoio e financiamento dos recursos para realização deste projeto de P&D da ANEEL "ANEEL PD 2866-0464/2017 - Metodologia Para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da GD por Fontes Incentivadas".

#### REFERÊNCIAS

- ABNT. (2019). Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 16690:2019. Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto.

- Calyxo. (2017). Operating Manual – CX Series, REV 2.0 May 2017 – EN/EU-USA-Canada, 29 p.
- Carlson, D. E., Romero, R., Willing, F., Meakin, D., Gonzalez, L., Murphy, R., ... and Al-Jassim, M. (2003). Corrosion effects in thin-film photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 11(6), 377-386.
- Del Cueto, J. A., and McMahon, T. J. (2002). Analysis of leakage currents in photovoltaic modules under high-voltage bias in the field. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 10(1), 15-28.
- Figueiredo, G. P. F. (2017). Degradação Induzida pelo Potencial em Módulos e Instalações Fotovoltaicas de c-Si. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Fjällström, V., Salomé, P. M. P., Hultqvist, A., Edoff, M., Jarmar, T., Aitken, B. G., ... and Williams, C. K. (2013). Potential-Induced Degradation of  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  Thin Film Solar Cells. *IEEE journal of photovoltaics*, 3(3), 1090-1094.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE. (2020). Photovoltaics Report. 48 p. Freiburg, Germany.
- Hacke, P., Spataru, S., Johnston, S., Terwilliger, K., VanSant, K., Kempe, M., ... and Propst, M. (2016). Elucidating PID degradation mechanisms and in situ dark I–V monitoring for modeling degradation rate in CdTe thin-film modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(6), 1635-1640.
- Hacke, P., Terwilliger, K., Glick, S. H., Perrin, G., Wohlgemuth, J. H., Kurtz, S. R., ... and Smith, R. M. (2015). Survey of potential-induced degradation in thin-film modules. *Journal of Photonics for Energy*, 5(1), 053083.
- Jansen, K. W., and Delahoy, A. E. (2003). A laboratory technique for the evaluation of electrochemical transparent conductive oxide delamination from glass substrates. *Thin Solid Films*, 423(2), 153-160.
- Masuda, A., Hara, Y., Shiina, Y., Okamoto, S., & Okamoto, T. (2019). Similarity of potential-induced degradation in superstrate-type thin-film CdTe and Si photovoltaic modules. *Japanese Journal of Applied Physics*, 58(SB), SBBF07.
- Mon, G., and Ross, R. (1985) Electrochemical Degradation of Amorphous-Silicon Photovoltaic Modules. 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, NV, USA. pp. 1142–1149.
- Mon, G., Wen L., Ross, R., D. Adent. (1985) Effects of temperature and Moisture on Module Leakage Currents. 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, NV, USA. pp. 1179–1185.
- Mon, G., Wen, L., Meyer, J., Ross, R., Nelson, A. (1988) Electrochemical and galvanic corrosion effects in thin-film photovoltaic modules. In: Proc. 20th IEEE Photovoltaic Specialist Conf. p. 108-113
- Oliveira, K. C. D. (2012). Conversores de Potência para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica sem Transformador. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Olsson, N. A., Richardson, M. C., & Hevelone, J. (2014). Thin film PID field failures and root cause determination. In 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) Volume (2), pp. 1-4.
- Osterwald, C. R., McMahon, T. J., and Del Cueto, J. A. (2003). Electrochemical corrosion of SnO<sub>2</sub>: F transparent conducting layers in thin-film photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 79(1), 21-33.
- Pingel, S., Frank, O., Winkler, M., Daryan, S., Geipel, T., Hoehne, H., & Berghold, J. (2010). Potential induced degradation of solar cells and panels. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 002817-002822).
- Pinho, J. T., Galdino, M. A. (2014) Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPTEL-CRESESB. Rio de Janeiro.
- REN21. (2020). Renewables 2020 Global Status Report. Paris.
- Rutschmann, I. (2008a). Noch nicht auselern. *Photon*, 1, pp. 122-123.
- Rutschmann, I. (2008b). Polarisation überwunden. *Photon*, 8, pp. 124-125.
- SMA. (2012). Tecnologia de Módulos – Informação Técnica, 9 p.
- Solibro. (2017). Installation and Operation Manual SL2 Modules, REV 3 January 2017, 22 p.
- Swanson, R., Cudzinovic, M., DeCeuster, D., Desai, V., Jürgens, J., Kaminar, N., ... & Terao, A. (2005). The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells. In 15th PVSEC. Shanghai, China. pp. 410–411.
- Takeuchi, R. O. A., Urbanetz Jr, J. (2019) Degradação Induzida pelo Potencial em Módulos Fotovoltaicos de Filme Fino. Smart Energy CI&Expo 2019, Curitiba, Brasil.
- Urbanetz Junior, J. (2010). Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Weber, T., Hinz, C., Leers, M., Grunow, P., and Podlowski, L. (2017). A review of potential induced degradation in thin-film plants. In *Proc. 33rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf.* (pp. 1671-1676).
- Wohlgemuth, J. H., Conway, M., and Meakin, D. H. (2000). Reliability and performance testing of photovoltaic modules. In *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000 (Cat. No. 00CH37036)* (pp. 1483-1486).
- Yamaguchi, S., Jonai, S., Hara, K., Komaki, H., Shimizu-Kamikawa, Y., Shibata, H., ... and Masuda, A. (2015). Potential-induced degradation of Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> photovoltaic modules. *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(8S1), 08KC13.