



INVESTIGAÇÃO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO INDUZIDA POR POTENCIAL EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

JÚNIOR, D.F.S.¹; MENDES, W.F.¹; FREITAS, I.S.O.²; VASCONCELOS, L.A.²

¹Discente do curso superior em Engenharia Elétrica do IFNMG – *Campus Montes Claros*; ²Docente do IFNMG – *Campus Montes Claros*.

Introdução

Embora os módulos fotovoltaicos (FV) apresentem elevada confiabilidade para a geração de energia elétrica, são componentes suscetíveis a diversos mecanismos de falha e degradação que podem impactar diretamente na energia gerada. Os mecanismos de falha e degradação relatados na literatura, com maior frequência, são: descoloração do encapsulante, delaminação, bolha na parte traseira, ponto quente (*hot spot*), fissura e rachadura nas células, trilha de caracol (*snail trail*) e degradação induzida por potencial (*Potential Induced Degradation* - PID) (AKHTARUZZAMAN; SELVANATHAN, 2021). Dentre todos os citados, segundo Dhimish e Tyrrell (2022), o PID é uma das degradações que mais impactam o desempenho e a estabilidade das usinas, tendo um destaque significativo nos últimos anos em razão do desenvolvimento de módulos que podem suportar tensões de até 1500V.

O PID é um fenômeno que teve seus primeiros registros em 1985, mas os estudos com maior notoriedade foram publicados a partir de 2010, ano em que foi criado o termo PID por Piengel et al. (2010). A ocorrência da degradação induzida por potencial está vinculada com o surgimento de uma corrente de fuga entre as células fotovoltaicas, o vidro e a estrutura metálica do módulo. Em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR), a corrente de fuga é originada em virtude da diferença de potencial entre as células FV e a estrutura metálica que está aterrada para garantir a segurança da instalação. Além disso, a diferença de potencial provoca a migração de íons de Na⁺ do vidro para a camada antirreflexiva da célula. Quanto maior a deposição desses íons na camada, maior será o dano causado ao módulo fazendo-o perder suas propriedades em realizar o efeito FV, o que impacta diretamente na capacidade de geração de energia.

O principal método utilizado para detectar a presença de PID nos módulos é a análise por eletroluminescência, a qual é realizada em laboratório a partir de equipamentos específicos, o que exige o deslocamento dos painéis das usinas até os centros de pesquisa. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo investigar a existência de métodos alternativos de modo que a avaliação possa ser feita em campo, minimizando, assim, os impactos relacionados com o custo e as perdas de geração de energia.

Material e Métodos

A pesquisa bibliográfica abrangeu a busca por artigos, dissertações e teses relacionadas ao tema proposto, utilizando mecanismos de busca do Google Acadêmico e da revista científica Elsevier. As palavras-chave utilizadas incluíram: degradação induzida pelo potencial, curva I-V, módulos fotovoltaicos, regeneração de módulos fotovoltaicos, *Potential Induced Degradation* e degradação de módulos. A palavra-chave "PID" foi empregada com cautela para evitar resultados relacionados a controladores PID, devido a possíveis abreviações coincidentes. As análises identificaram uma gama de recursos relevantes, incluindo artigos acadêmicos e estudos de caso, que exploram a degradação dos módulos devido à presença do PID. Materiais provenientes das pesquisas foram filtrados para



excluir análises de PID envolvendo eletroluminescência, dadas as circunstâncias desse procedimento e o objetivo deste trabalho.

Além disso, a lista de artigos, dissertações e teses foi ampliada por meio da inclusão de referências de trabalhos científicos originais. Em situações em que trabalhos se sobrepuseram em múltiplas publicações, como pré-impresões em conferências e artigos completos em periódicos, apenas a publicação considerada mais relevante e significativa foi selecionada e incluída no levantamento. Essa abordagem assegurou a abrangência e a importância dos materiais selecionados para a revisão bibliográfica.

Resultados e Discussão

No contexto das investigações voltadas para a obtenção de métodos alternativos para avaliar a presença de degradação induzida pelo potencial (PID) em módulos fotovoltaicos, foram identificadas três abordagens viáveis para aplicação em campo. De acordo com a pesquisa desenvolvida por Leite (2012), uma das estratégias propostas é a análise da potência de saída dos módulos, a qual é um parâmetro crucial para a detecção do PID, pois a degradação compromete significativamente o desempenho dos painéis. Para esse tipo de análise, é indicado que as medições sejam conduzidas em períodos longos com intervalos superiores a um mês, utilizando um traçador de curva I-V para obter dados precisos. Além do critério temporal, é essencial que a radiação solar esteja alinhada com as condições padrão de teste (STC – Standard Test Conditions) e que a condição climática seja de baixa nebulosidade. Após a conclusão dos testes, Leite (2012) destaca que a análise do rendimento e das diferenças entre a potência nominal do módulo e a medida permitem verificar o comportamento ao longo do tempo. Caso ocorra uma queda anormal nos níveis de potência, isso pode indicar a presença do PID. Ademais, a mesma pesquisa ressalta que módulos com potenciais mais negativos exibem maior perda de potência, evidenciando uma relação direta com esse tipo de degradação.

MA *et al.* (2021) realizaram estudos a fim de se identificar a presença de PID por meio da avaliação da tensão de circuito aberto. A degradação induzida por potencial está relacionada com a presença de íons de sódio na camada de junção dos módulos fotovoltaicos, os quais interferem nas características elétricas de saída dos painéis, principalmente, em condições de baixa irradiância. Desta forma, a metodologia desenvolvida pelos autores envolveu a observação da tensão de circuito aberto em módulos normais e módulos previamente diagnosticados com PID, em diferentes níveis de irradiância, com o objetivo de estabelecer relações significativas. Os resultados indicaram que a tensão de circuito aberto dos módulos degradados, diminui sob as mesmas condições, e essa tendência se torna mais evidente com a redução da irradiância. Como validação, a metodologia foi aplicada em uma usina de 100kWp de potência instalada, alcançando uma taxa de assertividade superior a 90% na avaliação, evidenciando, assim, a eficácia do método proposto.

O terceiro método identificado aborda a termografia aérea, como indicado por Kaden *et al.* (2015). A utilização de imagens termográficas apresenta um procedimento visual capaz de fornecer informações relacionadas ao PID. Nesse método, uma câmera termográfica é acoplada a um drone, permitindo a observação vertical de módulos fotovoltaicos de silício em um sistema específico. Essas inspeções revelam gradientes de temperatura distintos entre diferentes módulos, permitindo a visualização de padrões típicos, os quais são consistentes com análises mais aprofundadas, como aquelas que envolvem a utilização da eletroluminescência para avaliar células afetadas pelo PID. A pesquisa



confirma que a termografia é uma técnica confiável e ágil para identificar e localizar módulos afetados pela degradação em sistemas fotovoltaicos em funcionamento. A utilização de drones com câmeras termográficas também amplia a capacidade de investigação, permitindo avaliar cerca de 500 kWp em apenas uma hora.

Considerações finais

A pesquisa identificou três métodos distintos para a detecção da degradação induzida pelo potencial em módulos fotovoltaicos. Essas abordagens compreendem a análise da potência de saída, a avaliação da tensão de circuito aberto (V_{oc}) e a termografia aérea. Cada um desses métodos oferece uma maneira eficaz de identificar e localizar o PID em sistemas fotovoltaicos em funcionamento, sem a necessidade de recorrer à eletroluminescência. Além disso, essas abordagens contribuem para otimizar o desempenho e a manutenção desses sistemas, proporcionando uma vantagem adicional por não exigirem a remoção dos módulos da estrutura de instalação, o que reduz custos com mão de obra e logística.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos ao IFNMG Campus Montes Claros pelo suporte técnico prestado durante a realização da pesquisa.

Referências

- AKHTARUZZAMAN, Md; SELVANATHAN, V. (Ed.). **Comprehensive Guide on Organic and Inorganic Solar Cells: Fundamental Concepts to Fabrication Methods**. Academic Press, 2021.
- DHIMISH, M.; TYRRELL, A. M. **Power loss and hotspot analysis for photovoltaic modules affected by potential induced degradation**. npj Materials Degradation, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2022.
- KADEN, T.; LAMMERS, K.; MÖLLER, H.J. **Power loss prognosis from thermographic images of PID affected silicon solar modules**. Solar Energy Materials & Solar Cells, Alemanha., p. 1-5, Maio, 2015.
- LEITE, D.S; **Degradação Induzida pelo Potencial (PID) em Módulos Fotovoltaicos**. Orientador: Antônio Machado e Moura. 2012. 143 p. Dissertação (Mestrado)-Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.
- MA, M. *et al.* **Fault diagnosis of PID in crystalline silicon photovoltaic modules through IV curve**. Microelectronincs Reliability, v. 126, p. 114236, 2021.
- PINGEL, S.; FRANK, O.; Winkler, M.; Daryan, S.; Geipel, T.; Hoehne, H.; Berghold, J. **Potential induced degradation of solar cells and panels**. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 002817-002822), 2010.