

# EFEITO DA SALINIDADE NA PERFORMANCE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO DEGRADADOS ATRAVÉS DE ENSAIOS COMBINADOS PID E LETID

**Harison Franca dos Santos** - harison.franca@unesp.br

**Eduardo Mendes**

*Department of Research and Development, BYD Energy do Brasil, Campinas, SP, Brasil*

**Rodrigo Garcia**

*Department of Research and Development, BYD do Brasil, Campinas, SP, Brasil*

**Mendelsson R. M. Neves**

*Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - Campinas, SP, Brasil*

**Renivaldo J. Santos**

*Faculdade de Engenharia e Ciências – FEC, Universidade Estadual Paulista “UNESP”, Rosana, SP, Brasil*

**Resumo.** Este trabalho avaliou o efeito do condicionamento salino de módulos fotovoltaicos construídos com tecnologia de células monoPERC p-type frente a redução de performance após ensaios combinados e estendidos de degradação induzida por potencial (PID) e degradação induzida por luz e temperatura elevada (LETID). O ensaio em ambiente salino foi realizado durante um período total de 168 horas com concentração de 50 g/L de cloreto de sódio PA (NaCl), de acordo com a Norma IEC 61701:2020. Os ensaios PID foram realizados durante um período total de 288 h, dividido em dois períodos, de acordo com a Norma IEC 61215:2021, enquanto os ensaios LeTID tiveram um período total de 810 h, dividido em 5 intervalos, realizados a 75 °C com corrente de circulação de 0,8 A. Os resultados mostraram não haver influência do condicionamento salino no período observado, tanto para degradação induzida por potencial, após 268 h, quanto para a degradação induzida por luz e temperatura elevada, após 810 h, que reduziram a eficiência média dos dispositivos em (condicionado e não condicionado em ambiente salino) 2,13% e 2,00% e 1,21% e 1,04% respectivamente.

**Palavras-chave:** Energia Solar, degradação acelerada, confiabilidade de módulos fotovoltaicos

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a energia solar fotovoltaica vem se despoando com uma das principais fontes de energia elétrica do mundo. Isso tem acontecido em virtude dos movimentos visando pegada ambiental de baixo carbono, que evidenciam a matriz solar fotovoltaica por sua natureza renovável, disponibilidade do recurso solar em praticamente todo o globo, redução do preço dos equipamentos, bem como o aumento da confiabilidade destes dispositivos – que assim como o item anterior, contribui com a redução do custo nivelado da energia elétrica oriunda desta matriz – LCOE (Cherp *et al.*, 2021), como um dos principais agentes de redução das mudanças climáticas da atual década.

De maneira geral, pequenos sistemas de energia solar consistem em elementos de geração, os módulos fotovoltaicos; elementos de fixação, as estruturas fixas ou móveis; os itens de conversão, os inversores ou micro inversores de corrente contínua para alternada; demais elementos que incluem o cabeamento e as proteções (Zhang *et al.*, 2020).

Os módulos fotovoltaicos, componentes essenciais dos sistemas de energia solar disponíveis no mercado atual, são geralmente cobertos por uma garantia de 10 a 15 anos contra defeitos de fabricação. Além disso, uma garantia de desempenho linear é comum, abrangendo um período mais longo, normalmente entre 25 e 30 anos (Prieto-Castrillo e Núñez, 2020). Esse extenso período traz consigo diversos desafios, isso porque os painéis, ao longo de todo o período de vida útil, estão sujeitos as condições ambientais que envolvem temperatura, vento, luz ultravioleta, umidade, granizo, ambientes corrosivos, entre outros fatores. Sendo assim, a robustez que estes dispositivos devem possuir obriga que seus fabricantes investiguem a qualidade e confiabilidade frente a falhas infantis, de meia e por desgaste (Aghaei *et al.*, 2022).

Contudo, no âmbito da confiabilidade, apesar dos diversos estudos a fim de se compreender a influência de fatores ambientais diversos, pouco se sabe acerca do impacto da salinidade na vida útil dos módulos fotovoltaicos. Cabe lembrar que atualmente, a maior parte dos fabricantes dos painéis solares utilizam BOM (*Bill of materials*) padrão para os dispositivos que podem ser utilizados em qualquer parte do planeta, mesmo que em condições ambientais completamente opostas, tais como temperatura (alta ou baixa), umidade (baixa ou alta), radiação ultravioleta (alta ou baixa), presença de sal e corrosividade da atmosfera, entre outros fatores (Aghaei *et al.*, 2022).

Nesse contexto, este trabalho buscou investigar a influência da salinidade na performance de módulos fotovoltaicos construídos com 72 células de tecnologia monoPERC M3 (158,75 x 158,75 mm), topologia *full cell* e

arquitetura vidro/backsheet montados com encapsulantes de EVA (*ethylene vinyl acetate*) degradados através de ensaios PID (*Potential Induced Degradation*) e LeTID (*Light elevated Temperature Induced Degradation*).

## 2. METODOLOGIA

Os ensaios para investigação dos dispositivos foram realizados utilizando módulos fotovoltaicos construídos com 72 células de silício cristalino de tecnologia monoPERC, M3, com topologia *full cell* e arquitetura vidro/backsheet, ambos encapsulados com EVA (*ethylene vinyl acetate*) de mesma gramatura, 430 g/m<sup>2</sup>. Ao todo, foram testadas duas amostras, sendo uma denominada “condicionada” e outra “não condicionada”. A amostra condicionada foi inicialmente submetida ao ensaio de névoa salina durante o período de 168 h de acordo com a norma IEC 61701:2020 em atmosfera salina de cloreto de sódio PA (NaCl) produzida com concentração de 50 g/L. Em seguida, as amostras foram caracterizadas a fim de se observar a performance em condições padrão de teste (*Standard Test Conditions – STC* de 1.000 W/m<sup>2</sup> 25 °C e espectro AM 1.5) de acordo com a norma IEC 60904:2016, bem como através de ensaio de eletroluminescência. A partir deste momento, seguiu-se para os ensaios de degradação induzida, que para o efeito PID foi realizada de acordo com o Item MQT 21 da Norma IEC 61215:2021 para o período total de 288 h com polarização *negativa* de 1500 Vdc, dividido em duas etapas, enquanto para o efeito LeTID foi realizado durante o período total de 810 h, divididos em 5 etapas, a 75 °C ( $\pm 2$ ) utilizando corrente de 0,8 A. Cabe lembrar que após os ensaios de degradação PID, as amostras foram “recuperadas” em condições ambientais de 25 °C ( $\pm 5$ ) e umidade relativa de 50% ( $\pm 20$ ) durante o período de 180 dias com os terminais em circuito aberto, abrigados longe de luz solar, antes de seguirem para o ensaio LeTID. Durante cada intervalo entre ensaio de degradação, foram realizadas caracterizações da performance em STC, bem como imagens de eletroluminescência.

Para realização dos ensaios de caracterização da máxima potência foi utilizado um simulador solar de pulso luminoso classe AAA+ fornecido pela empresa Meyer Burger modelo Highlight SMT. Para condicionamento salino foi utilizado uma câmara de névoa salina (*Salt Spray*) fornecida pela empresa Equilam, modelo SS3300. Para os ensaios PID e LeTID foi utilizada uma câmara de umidade e temperatura fornecida pela empresa Hototech modelo HTPV-16. Por fim, as imagens de eletroluminescência foram realizadas utilizando um testador fornecido pela empresa ASICPY, modelo MPS-EL-AS.

Nota: as amostras utilizadas neste trabalho, módulos fotovoltaicos, foram confeccionadas em laboratório somente para execução da metodologia deste trabalho e não contempla um produto comercializado.

## 3. RESULTADOS

A Fig. 1 apresenta a evolução das imagens de eletroluminescência das amostras durante o circuito de ensaios proposto neste trabalho. Nesse contexto, é possível observar que logo após 96 h há uma grande incidência de regiões escuras nas proximidades das bordas de ambas as amostras, sendo este um grande indício da ocorrência da degradação induzida por potencial. Outro aspecto importante envolve a evidência da entrada de umidade nos dispositivos, representado por círculos concêntricos escuros orientados ao centro das células fotovoltaicas, que reduzem o diâmetro com o aumento do tempo do ensaio PID. Após o período de repouso, cerca de 180 dias, observa-se uma redução da degradação das células. Este fenômeno, assim como esperado, demonstra a capacidade de recuperação do módulo frente ao mecanismo de degradação PID (Yamaguchi *et al.*, 2021).

Em seguida, observando as imagens dos dispositivos após o ensaio de LeTID, percebe-se que não há alterações visuais significativas na coloração das células fotovoltaicas sem sintomas de degradação pelo efeito anterior, e, ao contrário do que se esperava, o efeito “tabuleiro” de xadrez é reduzido com o passar do tempo do ensaio (Ning *et al.*, 2022).

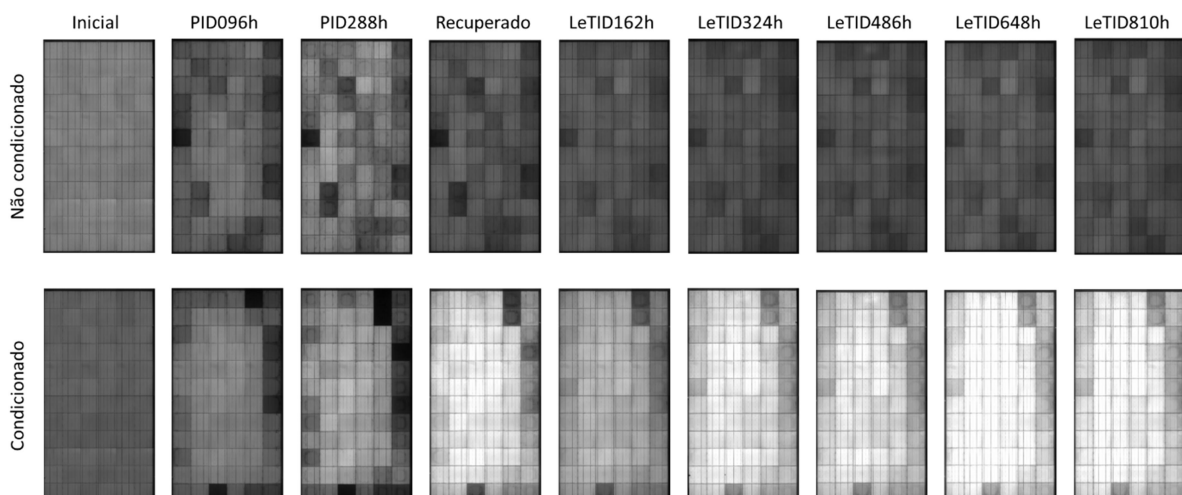


Figura 1 - Evolução das imagens de eletroluminescência das amostras.

Nota: o aumento do brilho da imagem das amostras condicionada e não condicionada a partir de PID288h está associado ao aumento da corrente durante a execução da imagem de eletroluminescência, visto que o equipamento MPS-EL-AS não foi capaz de realizar a correta determinação das imagens em virtude do aparecimento de células muito escuras.

Complementando as observações apresentadas anteriormente, a Fig. 2 apresenta a evolução da eficiência dos dispositivos no decorrer do circuito de ensaio. Nesse contexto, percebe-se que logo após 96 h de degradação PID, há uma drástica redução da performance de ambos os dispositivos, observado também pela alteração visual da coloração das células apresentadas da Fig. 1. O fenômeno é acentuado após 288 h, sendo este o período de menor índice de eficiência das amostras durante ciclo global de testes. O comportamento abrupto de redução da eficiência é observado para ambas as amostras – explicado pelo aumento significativo da entrada de umidade. Em seguida, após o período de recuperação, nota-se uma melhora significativa na eficiência dos dispositivos devido a natureza reversível do efeito PID (Yamaguchi *et al.*, 2021). Com relação ao comportamento durante a execução dos ensaios LeTID, após 162 h, é possível notar ainda a recuperação das amostras, evidenciando que a polarização direta (positiva), juntamente com a circulação de corrente, tenha contribuído com a regeneração das células. Todavia, após o período é possível observar uma ligeira estabilização da performance dos dispositivos, não havendo grandes variações na eficiência de ambas as amostras.

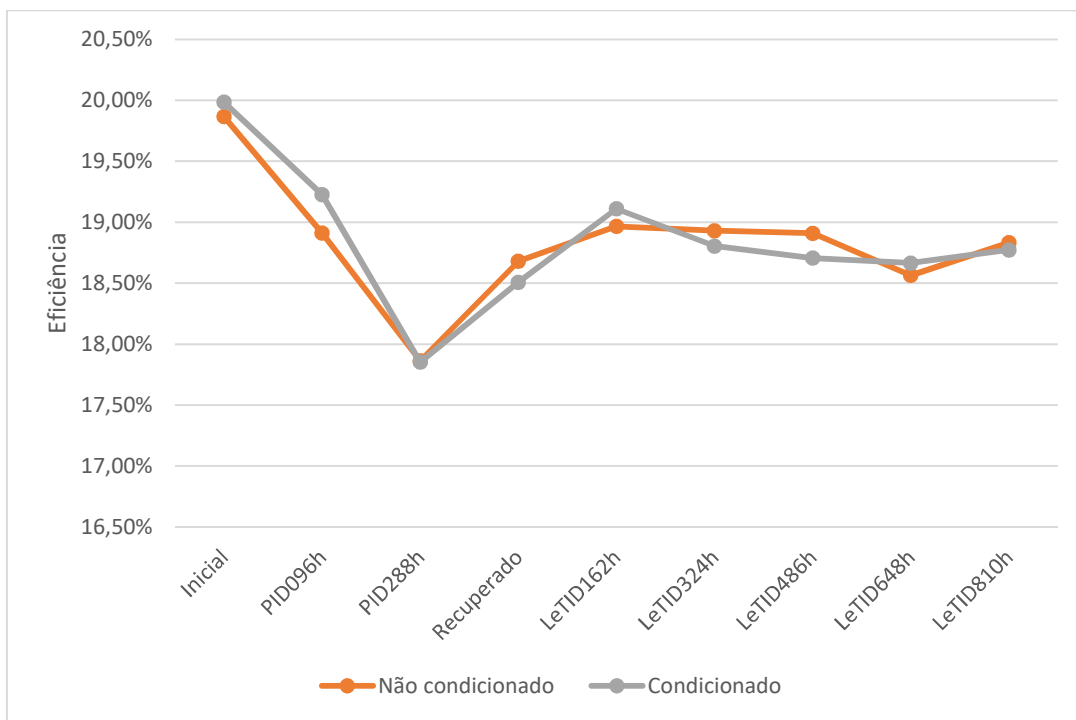


Figura 2 - Evolução da potência máxima dos dispositivos no decorrer dos ensaios.

A Tab. 1 apresenta a o comportamento dos parâmetros elétricos das amostras no início e fim de cada mecanismo de degradação. Nesse contexto, observa-se que após 288 h de ensaio PID, as amostras apresentaram redução da resistência *shunt*. Contudo, conforme as observações da Fig. 1, é possível relacionar que a entrada de umidade tenha alterado a condutividade do encapsulante e a tensão disponível para o PID, aumentando os níveis de queda de performance, e que esta tenha impactado diretamente também com a redução da resistência *shunt* de ambas as amostras. Após o ensaio PID, os níveis de redução dos valores de corrente de curto-circuito (*Isc*) e tensão de circuito aberto (*Voc*) são semelhantes para ambas as amostras, não sofrendo grandes variações após o ensaio LeTID.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos dos dispositivos durante algumas etapas dos ensaios.

Período e amostra	Inicial			PID288h			Recuperado			LeTID810h		
	Voc (V)	Isc (A)	Rshunt ( $\Omega$ )	Voc (V)	Isc (A)	Rshunt ( $\Omega$ )	Voc (V)	Isc (A)	Rshunt ( $\Omega$ )	Voc (V)	Isc (A)	Rshunt ( $\Omega$ )
Não condicionado	49,76	10,15	206,03	49,33	10,03	151,94	49,47	10,05	166,03	49,44	10,03	232,27
Condicionado	50,00	10,13	280,92	49,32	10,12	138,85	49,38	10,06	138,85	49,63	10,11	165,55

#### 4. CONCLUSÃO

Vislumbrando os resultados oriundos dos ensaios realizados de acordo com a metodologia anteriormente apresentada, não há indícios que comprovem que o condicionamento salino das amostras testadas de módulos fotovoltaicos construídos com células de tecnologia de silício cristalino mono PERC, arquitetura *full cell* e topologia vidro/backsheet sofram impactos significativos no índice de degradação associados aos fenômenos PID e LeTID para o período testado. Nesse contexto, apesar impacto da redução de performance logo após o ciclo de degradação PID, causada principalmente pela entrada de umidade no interior dos módulos – evidenciado pelas imagens de eletroluminescência, o fenômeno afetou de maneira semelhantes as amostras condicionada e não condicionada em ambiente salino. O mesmo efeito foi encontrado com relação a performance logo após o ciclo de degradação LeTID. Sendo assim, para os dispositivos testados, não houve influência na aceleração ou desaceleração do índice de performance da amostra condicionada em ambiente salino.

#### *Agradecimentos*

De maneira sincera, ressalta-se os agradecimentos à BYD Energy do Brasil e ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação que garantiu a execução das atividades associadas a este trabalho por meio do “Programa de Apoio ao Desenvolvimento a Indústria de Semicondutores - PADIS”.

#### REFERÊNCIAS

- Cherp, A., Vinichenko, V., Tosun, J., Gordon, J. A., & Jewell, J., 2021. National growth dynamics of wind and solar power compared to the growth required for global climate targets, *Nature Energy*, vol. 6, n. 7, pp. 742-754.
- Zhang, Y., Chen, H., & Du, Y., 2020. Considerations of photovoltaic system structure design for effective lightning protection, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, n. 4, pp. 1333-1341.
- Prieto-Castrillo, F., Núñez, N., & Vázquez, M., 2020. Warranty assessment of photovoltaic modules based on a degradation probabilistic model, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 28, n. 12, pp. 1308-1321.
- Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., Ahmad, S., Kazim, S., Lobato, K., ... & Kettle, J., 2022. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159, pp.112160.
- Yamaguchi, S., Van Aken, B. B., Masuda, A., & Ohdaira, K., 2021. Potential-induced degradation in high-efficiency n-type crystalline-silicon photovoltaic modules: a literature review, *Solar RRL*, vol. 5, n. 12, pp. 2100708.
- Ning, L., Song, L., & Zhang, J., 2022. Research progress of light and elevated temperature-induced degradation in silicon solar cells: A review, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 912, pp. 165120.

### **EFFECT OF SALINITY ON THE PERFORMANCE OF CRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAIC MODULES DEGRADED THROUGH COMBINED PID AND LETID TESTS**

**Abstract:** *This work evaluated the effect of salt conditioning of photovoltaic modules built with monoPERC p-type cell technology against performance reduction after combined and extended potential-induced degradation (PID) and light- and high-temperature-induced degradation (LETID) tests. The test in a saline environment was carried out for a total period of 168 hours with a concentration of 50 g/L of sodium chloride PA (NaCl), in accordance with the IEC 61701:2020 Standard. The PID tests were carried out for a total period of 288 h, divided into two stages, in accordance with the IEC 61215:2021 Standard, while the LeTID tests had a total period of 810 h, divided into 5 intervals, carried out at 75 °C with a circulation current of 0.8 A. The results showed that there was no influence of saline conditioning in the observed period, both for potential-induced degradation, after 268 h, and for degradation induced by light and high temperature, after 810 h, which reduced the average efficiency of the devices by (conditioned and unconditioned in a saline environment) 2.13% and 2.00% and 1.21% and 1.04% respectively.*

**Palavras-chave:** *Solar Energy, accelerated degradation, reliability of photovoltaic modules*