

## Análise da degradação induzida pelo potencial em módulos fotovoltaicos de CdTe instalados em Curitiba

Renan de Oliveira Alves Takeuchi  
Nicole Polityto Cremasco  
Jair Urbanetz Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

### RESUMO

O fenômeno da Degradação Induzida pelo Potencial (do inglês PID – *Potential Induced Degradation*) tornou-se notável na última década em razão da sua influência negativa no desempenho do módulo fotovoltaico (FV) e principalmente pela dificuldade de percepção do fenômeno, visto que pode ser confundido com o desgaste natural do gerador FV. Outro fator que indica que este problema pode se agravar é o aumento da tensão de operação, já que o setor FV vem se expandindo e o nível de tensão está diretamente relacionado com o PID. Embora estudos extensos já tenham sido realizados, o entendimento do fenômeno PID em módulos de filme fino ainda está incompleto e continua sendo um problema no setor FV. Portanto, este trabalho descreve o estudo voltado para compreensão e análise da ocorrência do PID em geradores FV de Telureto de Cádmio (CdTe) instalados na cidade de Curitiba. Durante a análise foram adotadas técnicas de detecção do PID *in loco*, como a inspeção visual e a aquisição das curvas da corrente elétrica em função da tensão ( $I \times V$ ) avaliando então a perda de desempenho provocada pelo PID através dos valores do Ponto de Máxima Potência ( $P_{mpp}$ ). Os resultados desse estudo apresentam os efeitos do fenômeno e fornecem comparações entre módulos de CdTe instalados na mesma região e submetidos as mesmas condições climáticas, onde um conjunto sofreu uma degradação relevante enquanto o outro não. A topologia adotada no sistema FV é possivelmente a razão da degradação, devido ao isolamento galvânico. Uma vez que estudos indicam que o isolamento galvânico da instalação, pode ser uma solução para evitar o aparecimento do PID, são explicadas neste artigo as características construtivas das plantas analisadas, para a realização da análise da influência do PID em cada uma.

**Palavras-chave:** Degradação Induzida pelo Potencial, Telureto de Cádmiio, Curitiba.

## ABSTRACT

The phenomenon of Potential Induced Degradation (PID) has become notable in the last decade because of negative influence in photovoltaic (PV) performance and especially due to the difficulty in perceiving the phenomenon, because according to the level of degradation it can be confused with the natural degradation of the PV generator. Another factor indicates that this problem may worsen is the increased operational voltage, because the PV sector has been expanding and the level of voltage is directly related to the PID. Although extensive studies have already been carried out in this area, the understanding of the PID phenomenon in thin film modules is still incomplete and continues being a problem in the PV sector. So, this paper describes the study aimed at understanding and analyzing the occurrence of PID in Cadmium Telluride (CdTe) PV generators installed in the city Curitiba. During analysis, PID detection techniques were adopted on-site, as the visual inspection and the acquisition of the curves of the electrical current as a function of voltage ( $I \times V$ ) then evaluating the loss of performance caused by the PID through the values of the Point of Maximum Power ( $P_{mpp}$ ). The results of this study present the effects of the phenomenon and provide comparisons between CdTe modules installed in the same region and submitted to the same climatic conditions, where one group suffers a relevant degradation while the other do not. The topology adopted in the PV system is possibly the reason for degradation, due to galvanic isolation. Since studies indicate that galvanic isolation of the installation, can be a solution to avoid the appearance of the PID, are explained in this paper the constructive characteristics of the analyzed plants, to perform the analysis of the influence of PID on each one.

**Keywords:** Potential Induced Degradation, Cadmium Tellurite, Curitiba.

## 1. INTRODUÇÃO

A Degradação Induzida pelo Potencial (*Potential Induced Degradation – PID*) vem atraindo a atenção devido a uma diminuição drástica da potência gerada em plantas FV em um período relativamente curto. Apesar de ter seu primeiro relato em

1985 (Mon e Ross) pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), o fenômeno foi amplamente investigado a partir do ano 2000, tendo maior notoriedade desde 2010 quando foi concebido o termo “PID” por Pingel *et al.* (2010). Existem muitos estudos sobre o PID em células FV de silício cristalino (c-Si), todavia, por outro lado o número de estudos sobre a ocorrência do PID em módulos FV de filme fino é menor. Masuda *et al.* (2019) defende o estudo vigoroso do PID em os módulos de CdTe, pois uma grande quantidade de módulos de CdTe estão sendo instalados em centenas plantas FV de escala de mega-watt em todo o mundo. Diferentes tecnologias são suscetíveis ao PID, no entanto, o comportamento de degradação depende fortemente do tipo de célula FV. Porém os resultados do PID conhecidos para as diversas tecnologias têm uma característica compartilhada: a degradação depende da polaridade e da diferença do potencial entre a célula e a terra (Pingel *et al.*, 2010); (Figueiredo, 2017).

A polarização das células pode dar origem as correntes de fuga indesejadas entre as células e outras partes do módulo e estas dependem diretamente do potencial do gerador FV contra o terra. Considerando que a moldura ou grampo metálico de fixação dos módulos é sempre aterrado por questões de segurança e que a polarização negativa das células pode ser imposta pelo aterramento do pólo positivo ou quando o sistema está operando em flutuação, os sistemas são regularmente sujeitos a ocorrência do PID.

Entre as tecnologias de filme fino existem grandes diferenças nas estruturas dos módulos, sendo do tipo substrato ou superstrato como é típico para o CIGS e o CdTe respectivamente. Este trabalho se limitará ao tipo superstrato, o qual se aplica ao módulo de CdTe analisado. A construção do módulo é iniciada pela deposição da camada de Óxido Condutivo Transparente (TCO) no vidro frontal, que é fonte de sódio (*Na*), uma possível origem de PID ao entrar em contato com a célula FV. A figura 1 ilustra a seção transversal de módulo FV de filme fino de superstrato, no qual pode ser verificado os possíveis deslocamentos da corrente de fuga, partindo da parte ativa da célula para a moldura aterrada através do vidro e/ou do encapsulante até o terra.

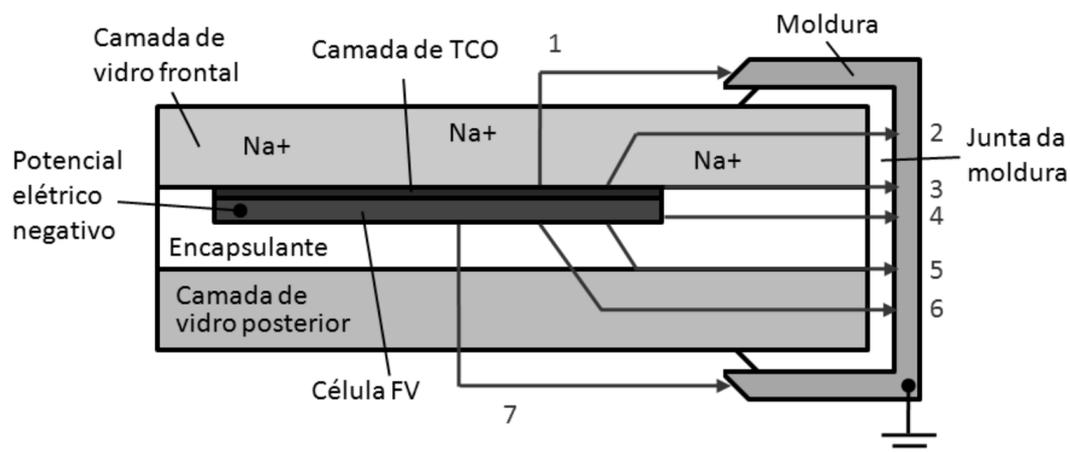


Figura 1 - Modelagem da corrente de fuga em uma seção transversal de um módulo FV superstrato (adaptado de Del Cueto *et al.*, 2002)

A corrosão da camada TCO é outro tipo de degradação que está relacionado com a ocorrência do PID. No qual um íon de sódio, presente no vidro frontal, carregado positivamente ( $Na^+$ ) é reduzido ao sódio elementar ( $Na$ ), combinado com a umidade resultará em uma corrosão eletroquímica não reversível da camada do TCO à base de óxido de estanho ( $SnO_2$ ). As regiões danificadas pela corrosão mostram que o  $SnO_2$  têm sua aderência reduzida ao vidro, dando origem a delaminação (Osterwald *et al.*, 2003).

Masuda *et al.* (2019) apresentou por meio de testes de PID acelerados em laboratório, os padrões de medidas elétricas conforme pode ser observado na figura 2. A potência máxima ( $P_{max}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) e fator de forma (FF) para geradores FV de CdTe em função do tempo de aplicação de tensões com valores de -500, -1000 e -2000 Vcc durante os testes. Constatou-se que, quando aplicado a tensão de -500 V, a degradação prossegue lentamente. As maiores reduções ocorrem, independente da tensão, na  $I_{sc}$  quando comparada ao FF e  $V_{oc}$ . A redução é mais expressiva no momento em que é aplicado a tensão de -2000 V. Portanto foi concluído que a ocorrência do PID em módulos de CdTe teve relação direta com as tensões aplicadas nos testes, ou seja, o potencial do gerador FV.

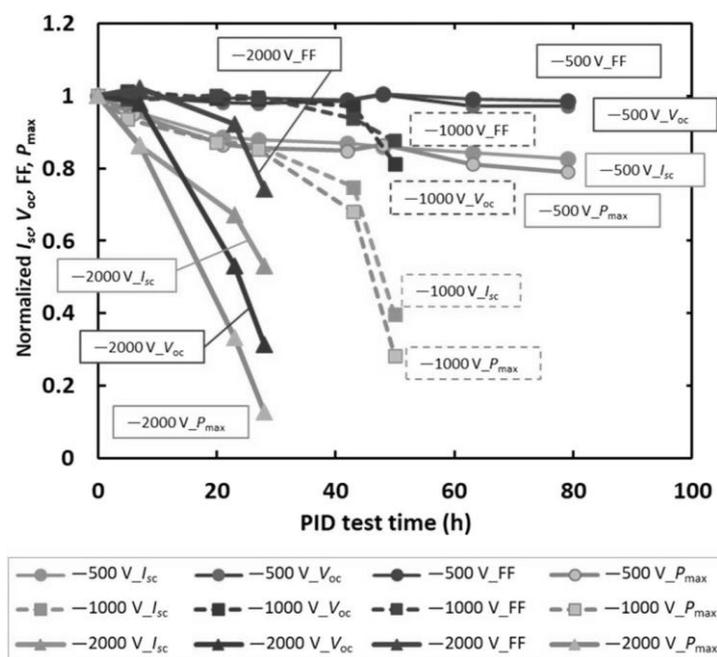


Figura 2 - Comportamento dos parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico de CdTe em função do tempo de teste de PID (Masuda *et al.*, 2019).

Fabricantes de módulos FV de filme fino e inversores 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 a terra for menor que 600 Vcc (Calyxo, 2017). Porém, quando a tensão de operação ultrapassa os 600 Vcc indicam a utilização do isolamento galvânico associado com o aterramento funcional (figura 3) para garantir o correto funcionamento do sistema, como indicado por Calyxo (2017), Solibro (2017) e SMA (2012).

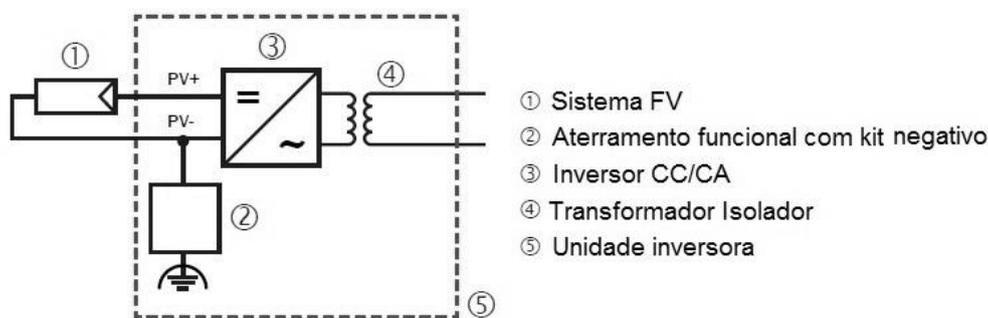


Figura 3 - Aterramento funcional do polo negativo (Solibro, 2017).

## 2. METODOLOGIA

Usinas FV em operação precisam ser regularmente avaliadas, testadas e inspecionadas para garantir que o sistema está operando de maneira segura e confiável. O monitoramento instalado nos sistemas FV ou a equipe de operação e manutenção são capazes de gerar informações de desempenho e indicar o surgimento de fatores de perda. Em alguns casos, faz-se necessária uma análise aprofundada para buscar a origem das falhas. Portanto, pesquisadores frequentemente trabalham em campo com o propósito de buscar o melhor entendimento de ocorrências que assolam usinas em operação, e através da ciência indicam procedimentos e soluções para identificar e resolver estas ocorrências. O foco da análise do PID sobre módulos de filme fino neste estudo está na inspeção e teste *in loco* no nível de módulo.

### 2.1 Investigações

Para o desenvolvimento do estudo do PID nos módulos FV de CdTe instalados na cidade de Curitiba, algumas premissas foram estabelecidas. Primeiramente, foi determinado o modelo do módulo FV como objeto de estudo. Após isto, foram buscados sistemas FV na cidade de Curitiba, que dispusessem desse modelo, com o intuito de conservar as mesmas condições climáticas e buscar o isolamento do PID de outros fatores de perda que pudessem interferir no estudo. Identificados os sistemas que atenderam as condições supracitadas, houve uma escolha criteriosa que buscou a distinção de topologias. Foram realizadas visitas técnicas aos sistemas visando à coleta de informações de projeto, instalação e a aferição das medidas elétricas dos módulos FV bem como algumas variáveis ambientais locais. Portanto, os dados coletados foram confrontados e foram analisados os possíveis efeitos provocados pela ocorrência do PID.

#### 2.1.1 - Plantas Selecionadas

O modelo CX3 85 da Calyx foi o módulo definido como objeto de estudo por ser predominante nas plantas identificadas, trata-se de um módulo de filme fino com estrutura superstrato. Foram escolhidas duas plantas FV compostas por este modelo, denominadas neste estudo como Planta I e Planta II, sendo instalações montadas em

um *carpot* solar e no solo respectivamente. Uma lista de propriedades pode ser encontrada na tabela 1.

Tabela 1 - Visão geral dos Sistemas Fotovoltaicos investigados

	Planta I	Planta II
Modelo de Módulo	CX3 85	CX3 85
Quantidade de Módulos	40	18
Idade da planta em meses	18	14
Potência nominal em kWp	3,4	1,53
Tensão de operação em V	359,2	269,4
Modelo de Inversor	ABB - PVI 5000	NHS – 1K5-GSM1
Nível de Isolamento	Sem transformador	Com transformador Externo
Aterramento Funcional	Não	Não

Cabe destacar que as plantas contêm inversores sem transformador, porém a planta II possui isolamento galvânico através de um transformador externo conectado na saída C.A. do inversor. Para a coleta de dados foram selecionados aleatoriamente dois módulos em cada planta, conforme pode ser observado na figura 4.

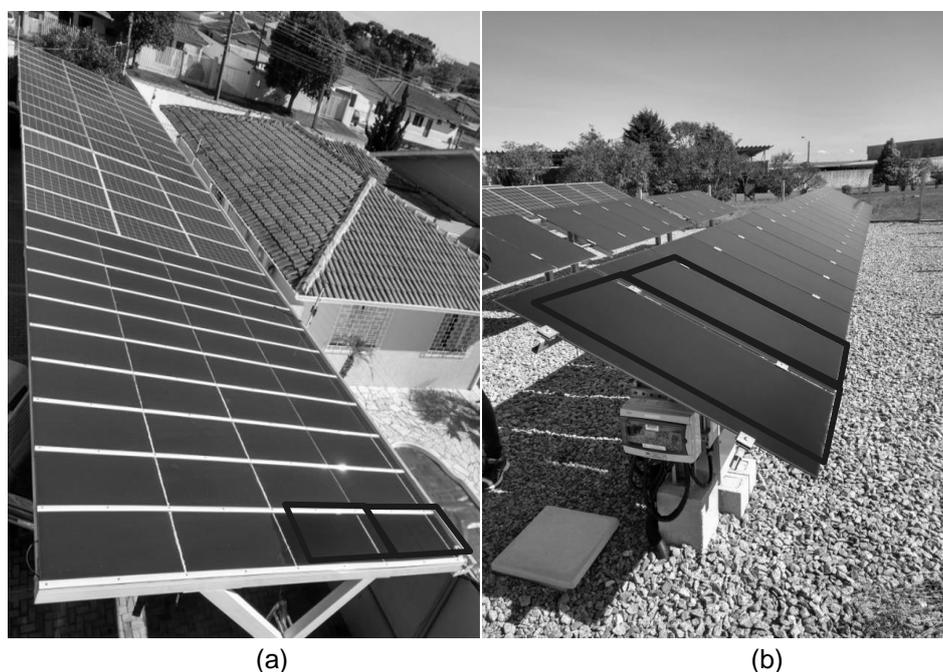


Figura 4 - Imagem das Plantas Selecionadas sendo: (a) Planta I (b) Planta II.

### 2.1.2 - Aquisição de curvas IxV

Inicialmente foi realizada uma inspeção visual a fim de verificar a existência de fissuras ou delaminações provocadas pelo estresse mecânico oriundo da oxidação da Camada TCO, para isso foi efetuada a limpeza da superfície do módulo. A limpeza também elimina o fator de perda causado pela sujeira.

A fim de avaliar a redução de desempenho nos módulos gerada pela ocorrência do PID, neste estudo foi empregado o método de obtenção dos  $P_{mpp}$ , obtidos por meio da aquisição de curvas IxV dos módulos avaliados (Pingel *et al.* 2010; Hacke *et al.*, 2015; Figueiredo, 2017). O traçador de curva HT I-V500W realiza a aquisição da curva IxV nas condições reais de funcionamento (*Operating Condition – OPC*) e automaticamente, através do método 2 da normativa de referência IEC/EN 60891, realiza a extrapolação para as condições *Standard (Standard Test Condition – STC)*. As aquisições foram realizadas respeitando os procedimentos descritos no manual do equipamento, como valores mínimos de irradiância, calibração e posicionamento dos sensores, sendo estes procedimentos referenciados pela norma internacional IEC/EN 60891 (2009).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a análise visual dos módulos inspecionados foi observado que a vedação dos módulos permaneceu íntegra, presumindo-se que não houve a presença de umidade no interior do módulo. Isto justifica o fato de não ter sido observado alteração visual nas células, que não apresentaram então sinais de descoloração, delaminação e fissuras.

A metodologia de avaliação foi executada no dia 19 de junho de 2020, em períodos do dia que apresentavam alta irradiância, ou seja, próximo ao meio dia, com céu completamente ensolarado e, principalmente, sem a presença de nuvens, para que assim se excluíssem os riscos das medições sofrerem interferência do fenômeno de borda de nuvem. Foram levantadas as curvas características dos módulos FV individualmente, identificados como amostras, os resultados das medidas elétricas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados das curvas IxV dos módulos investigados

Amostra		Cond.	Pmax [W] [+10% / -5%]	Voc [V]	Vmppt [V]	Imppt [A]	Isc [A]	Irrad. [W/m <sup>2</sup> ]	Temp. módulo [°C]	FF [%]
Planta I	226	OPC	48,57	55,42	43,52	1,12	1,35	719	53	64
		STC	72,47	59,99	46,95	1,54	1,86	1000	25	66
	230	OPC	48,38	55,15	42,59	1,14	1,37	713	55	65
		STC	73,27	60,02	46,28	1,58	1,90	1000	25	65
Planta II	233	OPC	71,12	56,10	44,7	1,59	1,83	919	52,3	69
		STC	83,14	60,02	48,4	1,72	1,97	1000	25	70
	235	OPC	70,99	55,57	44,29	1,60	1,84	924	56,6	70
		STC	83,62	59,96	48,57	1,72	1,97	1000	25	71
Datasheet CX3 85		STC	85	60	45,2	1,89	2,17	1000	25	66

Observa-se que uma parcela dos resultados converge com o estudo apresentado por Masuda *et al.* (2019), onde os valores de corrente diminuem mais rapidamente que os valores de tensão e o FF após a ocorrência do PID.

A análise do percentual de degradação se parte do valor garantido pelo fabricante, que é representado pela perda de potência de 1% ao ano durante os primeiros 10 anos e 0,67% ao ano até 25 anos (Calyxo, 2017). O percentual de degradação dos módulos medidos é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Análise da degradação dos módulos avaliados

Amostra		Cond.	Pmax [W] [+10% e -5%]	Degrad. [%]	Degrad. garantida pelo fabricante [%]
Planta I	226	STC	72,47	14,74	1,5
	230		73,27	13,8	1,5
Planta II	233		83,14	2,19	1,17
	235		83,62	1,62	1,17
Datasheet CX3 85				85	-

Todos os módulos apresentaram uma degradação acima do garantido pelo fabricante, sendo que nos módulos da planta I a degradação pode ser considerada alta para o curto tempo de operação. As amostras das Plantas I e II, resultaram em valores maiores de 9,82 vezes e 1,87 vezes respectivamente, considerando o pior cenário dos níveis de degradação.

A principal diferença apresentada entre as plantas é a topologia adotada nos projetos. As plantas têm tensões de operação menor que 600 Vcc, mesmo assim o projeto da planta II adotou a implantação da isolação galvânica enquanto a planta I seguiu o sugerido pelo fabricante do módulo (Calyxo, 2017).

#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo realizou o levantamento das razões da ocorrência do PID em módulos FV de filme fino de CdTe e as suas possíveis consequências, e também foram apresentados os conceitos relativos a medidas de proteção dos sistemas, sendo eles a isolação galvânica e o aterramento. Além disso, foi realizada a análise de módulos de duas plantas em busca do melhor entendimento do cenário em torno do PID em usinas em operação.

As topologias adotadas nos projetos das plantas analisadas foram diferentes e ao que tudo indica este foi o fator responsável pela divergência dos resultados. Ao adotar o isolamento galvânico a planta II apresentou pequenos valores de degradação ainda acima dos limites garantidos pelo fabricante. Vale destacar que o fabricante recomenda que sistemas que operam com tensão acima de 600Vcc façam uso do aterramento funcional associado com a isolação galvânica para evitar a ocorrência do PID e outros fatores de perda correlacionados. A degradação constatada na planta I requer atenção devido ao seu alto valor percentual que ultrapassa em nove vezes o garantido pelo fabricante. Os resultados deste estudo indicam que a associação da isolação galvânica com o aterramento funcional em sistemas com tensão de operação acima de 250 Vcc podem evitar a ocorrência do PID.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UTFPR e Sra. Liciany Ribeiro 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 BIBLIOGRÁFICAS

CALYXO, “Operating Manual – CX Series”, REV 2.0 May 2017, 29 p. 2017.

DEL CUETO, J. A., and MCMAHON, T. J., “Analysis of leakage currents in photovoltaic modules under high-voltage bias in the field”. Progress in Photovoltaics: Research and applications, 10(1), 15-28. 2002.

FIGUEIREDO, G. P. F., “Degradação Induzida pelo Potencial em Módulos e Instalações Fotovoltaicas de c-Si”. Tese de Doutorado, USP, 2017.

HACKE, P., TERWILLIGER, K., GLICK, S. H., PERRIN, G., WOHLGEMUTH, J. H., KURTZ, S. R., ... and SMITH, R. M. “Survey of potential-induced degradation in thin-film modules”. Journal of Photonics for Energy, 5(1), 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 60891, “Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics”. 2nd ed, 2009.

MASUDA, A., HARA, Y., SHIINA, Y., OKAMOTO, S., & OKAMOTO, T. “Similarity of potential-induced degradation in superstrate-type thin-film CdTe and Si photovoltaic modules”. Japanese Journal of Applied Physics, 58(SB), SBBF07. 2019.

MON, G., and ROSS, R. “Electrochemical Degradation of Amorphous-Silicon Photovoltaic Modules”. 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, NV, USA. pp. 1142–1149. 1985.

OSTERWALD, C. R., MCMAHON, T. J., and DEL CUETO, J. A., “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. 2003.

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.

SMA, “Tecnologia de Módulos – Informação Técnica”, 9 p. 2012.

SOLIBRO, “Installation and Operation Manual SL2 Modules”, Rev 3, 22 p. 2017.