

MODELO MATEMÁTICO DE DEGRADAÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS MONOCRISTALINOS¹

MATHEMATICAL MODEL OF GENERATION DEGRADATION IN MONOCRYSTALLINE PHOTOVOLTAIC MODULES

Douglas de Souza Lasch², Maurício de Campos³, João Manoel Lenz Vianna da Silva³

¹ Trabalho da disciplina de Modelagem Matemática do curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, desenvolvido na Unijuí;

² Bolsista CAPES, estudante do curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

RESUMO

O sistema elétrico de potência tem apresentado crescimento do uso de matriz energética proveniente de fonte solar fotovoltaica. Os fabricantes de módulos fotovoltaicos têm comercializados os produtos com uma garantia de eficiência acima de oitenta por cento ao final de vinte e cinco anos de operação. Uma ferramenta importante para analisar o comportamento da degradação da geração dos módulos fotovoltaicos é a modelagem matemática. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é extrair o modelo matemático dos dados de degradação de potência apresentado pelos fabricantes de oito módulos diferentes, e analisar através do desvio padrão a homogeneidade dos resultados ao longo do tempo estimado de operação dos equipamentos.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico. Degradação. Desvio Padrão.

ABSTRACT

The electric power system has shown growth in the use of energy matrix from photovoltaic solar source. Manufacturers of photovoltaic modules have marketed products with an efficiency guarantee of over eighty percent after twenty-five years of operation. An important tool to analyze the degradation behavior of the generation of photovoltaic modules is mathematical modeling. In this sense, the objective of this work is to extract the mathematical model of the power degradation data presented by the manufacturers of eight different modules, and to analyze through the standard deviation the homogeneity of the results over the estimated time of operation of the equipment.

Keywords: Photovoltaic module. Degradation. Standard deviation.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico impulsionou a elevação do consumo de eletricidade e a expansão do sistema elétrico de potência (SEP). Por décadas a principal mudança no SEP foi caracterizada apenas pela elevação do consumo e incremento de capacidade do sistema através de fontes de geração convencionais, construção de novas linhas de transmissão, subestações e



redes de distribuição. Por mais de um século, os sistemas elétricos utilizaram máquinas síncronas para a geração de eletricidade. No entanto, no século 21, a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, como a eólica e a solar fotovoltaica, começou a se expandir em um ritmo acelerado (TLEIS, 2019).

No Brasil, um dos marcos para o crescimento de investimentos no setor de geração de energia fotovoltaica foi a publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL. Esta resolução definiu as regras e o sistema de compensação de energia elétrica para unidades de micro e minigerações distribuídas. Diante disto, a geração de energia elétrica através da energia solar fotovoltaica tem crescido exponencialmente nos últimos anos.

Os módulos fotovoltaicos são comercializados com a garantia de apresentar uma eficiência acima de 80% após 25 anos em operação. Inúmeros estudos têm avaliado a degradação da eficiência de módulos fotovoltaicos, (HAN et al., 2018; JORDAN et al., 2018; MONTEIRO et al., 2020; ZANESCO et al., 2014), sendo a operação em locais com temperaturas mais altas e baixa umidade, como um dos principais fatores que influenciam na taxa de degradação. (HONNURVALI; GUPTA, 2017). Além destes, a qualidade dos materiais, índices de exposição a raios ultravioleta e a frequência de manutenção também possuem influência na perda da eficiência (NDIAYE et al., 2013). Neste contexto, o objetivo deste artigo é obter a equação matemática que descreve o comportamento da curva de degradação da eficiência de módulos fotovoltaicos monocristalinos comercialmente difundidos no Brasil e analisá-los.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo foram selecionados oito módulos fotovoltaicos de fabricantes diferentes e com características construtivas semelhantes, como por exemplo, constituídos por células do tipo monocristalinas. Cada fabricante fornece no catálogo de especificações técnicas um gráfico que demonstra a expectativa de degradação de rendimento do painel fotovoltaico. A figura 1 apresenta a curva de degradação do módulo fotovoltaico modelo MGK-36 MONOFACIAL 425W - 455W, fabricado pela empresa BYD.

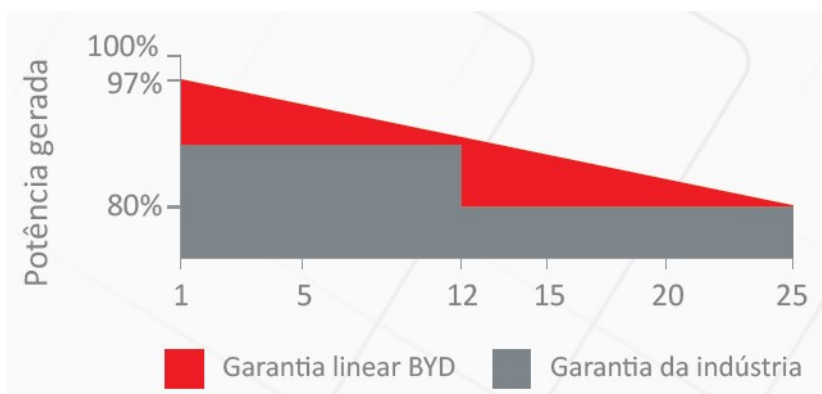


Figura 1 – Curva de degradação módulo fotovoltaico BYD-MGK-36 Monofacial 425-455W

De forma padronizada, a indústria de equipamentos fotovoltaicos definiu inicialmente que o desempenho dos módulos seria de pelo menos 90% para os primeiros doze anos de operação, e de rendimento mínimo de 80% ao final dos vinte e cinco anos de utilização. Porém, os fabricantes tem apresentado garantias lineares de desempenho, o que possibilita a obtenção da equação característica que representa o comportamento da degradação da potência gerada em função dos anos de operação.

MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático da reta é representado pela seguinte equação:

$$Y(X) = aX + b$$

onde o coeficiente angular da reta representa o percentual de degradação linear dos módulos fotovoltaicos. Foram obtidos os seguintes modelos matemáticos para a cada um dos oito modelos de módulos fotovoltaicos avaliados, conforme apresentado na Tabela 1.

FABRICANTE/MODELO	EQUAÇÃO DEGRADAÇÃO
BYD / MGK-36 MONOFACIAL 425W - 455W	$-0,7080X + 97,70$
DAH / DHT-M60X10 430 - 460W	$-0,5500X + 98,55$
INTELBRAS / EMSE-535M HC	$-0,5500X + 98,55$
JA SOLAR / JAM6(K)-72/340-360/PR/1500V	$-0,6563X + 97,65$
JINKO / JKM465M-7RL3	$-0,6000X + 98,10$
LONGI / LR5-72HPH 525 - 550M	$-0,5500X + 98,55$
RISEN / RSM110-8-530M - 555M	$-0,5500X + 98,55$
TRINA / TSM-DE18M(II) 485 - 510W	$-0,5500X + 98,55$

Tabela 1 – Equações de Degradação Obtidas



A partir das equações que representam a curva de degradação dos módulos fotovoltaicos analisados, é possível extrair o valor correspondente da expectativa de potência gerada em função do tempo de operação dos módulos fotovoltaicos. A Figura 2 apresenta o gráfico das equações obtidas.

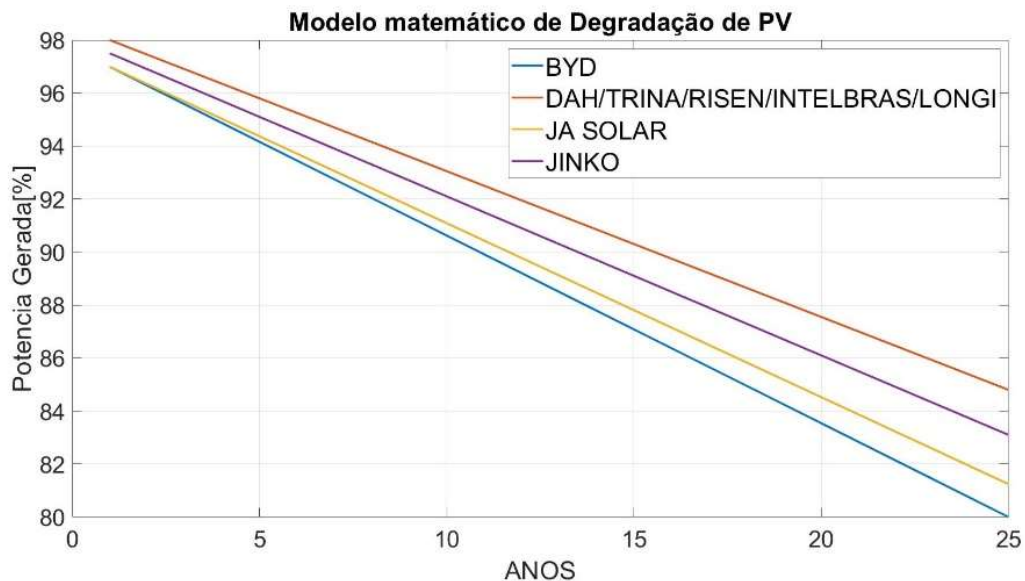


Figura 2 – Gráfico das equações de degradação

Como forma de avaliar os resultados obtidos, foi calculado o desvio padrão dos dados para cada um dos anos avaliados. O desvio padrão tem como objetivo avaliar a uniformidade dos dados, ou seja, quanto maior for o valor do desvio padrão maior é a dispersividade dos valores. O desvio padrão é calculado através da seguinte equação:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

onde: S^2 representa o valor do desvio padrão, X_i é o valor do dado calculado, \bar{X} é a média aritmética dos valores dos dados calculados e n representa o número de dados. A Figura 3 apresenta os valores de desvio padrão obtidos para cada um dos vinte e cinco anos analisados.

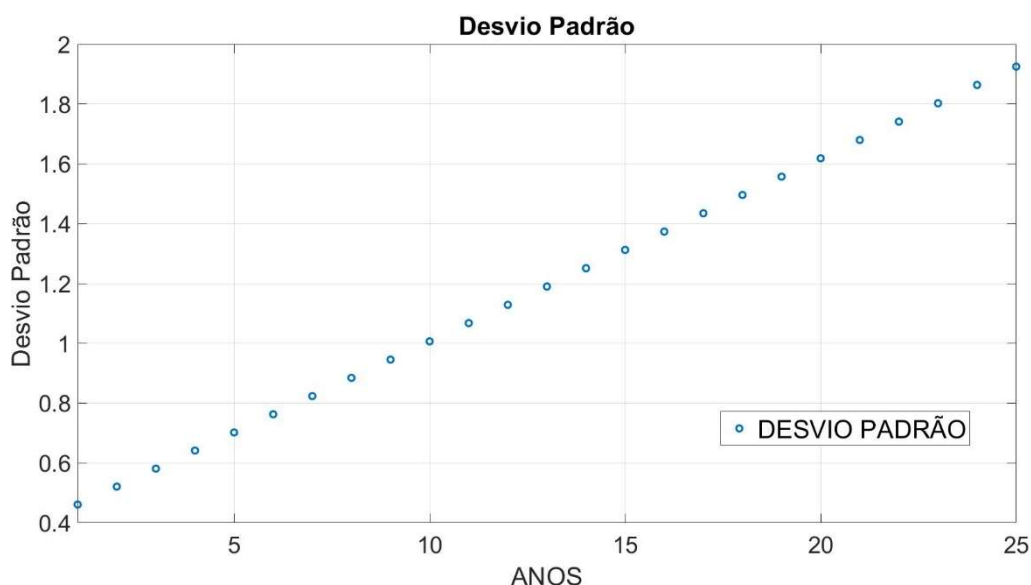


Figura 3 – Desvio padrão das curvas de degradação analisadas

O valor do desvio padrão observado para o primeiro ano foi o menor valor calculado sendo 0,4611, já o maior valor de desvio padrão observado correspondeu ao vigésimo quinto ano com valor de 1,925. O comportamento crescente dos valores de desvio padrão ao longo dos anos indica uma maior variação de nos valores de rendimento de geração fotovoltaica nos módulos analisados.

Como os módulos fotovoltaicos podem ser expostos a fatores ambientais distintos, como por exemplo, temperaturas de operação diferentes considerando um módulo instalado na região norte do Brasil e outro na região sul, onde há temperaturas menores no inverno, a degradação sofrida pelos equipamentos pode apresentar variações. Diante destes fatores, os fabricantes estimam suas taxas de degradação através de ensaios e definem o comportamento apresentado por cada modelo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a expansão da matriz energética de fonte solar fotovoltaica, avaliar o comportamento de durabilidade dos módulos fotovoltaicos é de fundamental importância para obter não só uma estimativa de vida útil de um sistema, mas também, planejar e projetar como o sistema elétrico irá operar diante da expansão das fontes de energia renováveis.



A partir dos dados obtidos através da modelagem matemática das curvas de degradação dos oito modelos de módulos fotovoltaicos selecionados, e da análise de desvio padrão dos dados calculados para o período de vinte e cinco anos de operação, foi possível observar que há uma maior variação de rendimento ao final da vida útil estimada pelos fabricantes. Como sequência trabalho, será desenvolvido um protótipo para obtenção das curvas de cargas de painéis fotovoltaicos e através da modelagem matemática serão estimadas as perdas de rendimento e a comparação com a curva de degradação fornecida pelo fabricante, com o objetivo de analisar se a degradação de módulos fotovoltaicos que estão em operação apresenta desempenho dentro dos limites esperados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HAN, H. et al. Analysis of the Degradation of Monocrystalline Silicon Photovoltaic Modules after Long-Term Exposure for 18 Years in a Hot-Humid Climate in China. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 8, n. 3, p. 806–812, 1 maio 2018.

HONNURVALI, M. S.; GUPTA, N. **PV ELECTRICAL PARAMETERS DEGRADATION ANALYSIS-OMAN PERSPECTIVE**. The 8th International Renewable Energy Congress. **Anais...**2017.

JORDAN, D. C. et al. Robust PV Degradation Methodology and Application. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 8, n. 2, p. 525–531, 1 mar. 2018.

MONTEIRO, L. G. et al. Field I-V Curve Measurements Methodology at String Level to Monitor Failures and the Degradation Process: A Case Study of a 1.42 MWp PV Power Plant. **IEEE Access**, 2020.

NDIAYE, A. et al. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. **Solar Energy**, v. 96, p. 140–151, 2013.

TLEIS, N. **Power Systems Modelling and Fault Analysis - Theory and Practic**. Second Edi ed. [s.l: s.n.].

ZANESCO, I. et al. **ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS FABRICADOS COM DIFERENTES CÉLULAS SOLARES**Revista Brasileira de Energia Solar. [s.l: s.n.].