

# MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS PARA ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

**Daniel Pereira de Carvalho** – daniel.carvalho@icte.uftm.edu.br

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica

**Luís Guilherme Monteiro Oliveira** – luis.monteiro@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Energia

**Lucas Bacha Pereira Horta** – lucas.horta@ceienergetica.com.br

Companhia Energética Integrada (CEI), Departamento de Engenharia

**Gustavo Malagoli Buiatti** – gustavo@alsolenergia.com.br

ALSOL Energias Renováveis S.A., Diretoria Técnica e Operacional

**Resumo.** *Os custos operacionais e a confiabilidade a longo prazo são fatores-chave para a redução do custo total de vida útil de um sistema fotovoltaico. Neste contexto, os métodos de caracterização e diagnóstico são cada vez mais importantes na identificação e compreensão das falhas e modos de degradação que afetam os módulos e arranjos fotovoltaicos assim como o desenvolvimento de novas ferramentas e testes para avaliar a confiabilidade e a vida útil dos módulos FVs. As curvas características I-Vs podem fornecer diversas informações sobre a condição e propriedades elétricas de geradores FVs, por exemplo, corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, “fill-factor”, resistência série e paralelo, fator de idealidade equivalente do diodo além de indicar a presença de sombreamentos e poeira/sujidades. Este trabalho propõe dois métodos de diagnóstico de falhas para sistemas fotovoltaicos, ambos são baseados na técnica de caracterização da curva característica I-V. O primeiro método baseia-se na técnica da derivada segunda / mínimos quadrados da curva I-V enquanto o segundo, utiliza a análise espectral da potência. Os resultados preliminares encontrados mostraram serem satisfatórios e promissores para a detecção de falhas em sistemas fotovoltaicos.*

**Palavras-chave:** *Métodos de Diagnóstico de Falhas, Curva Característica I-V, Arranjo Fotovoltaico*

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, ocorre um grande progresso na tecnologia de sistemas fotovoltaicos para garantir suas operações ótimas, porém, na prática, vários fatores podem afetar significativamente o desempenho de um sistema fotovoltaico, diminuindo, conseqüentemente, sua eficiência. De fato, os sistemas fotovoltaicos são frequentemente expostos a diferentes tipos de falhas e defeitos que afetam a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos (por exemplo, falhas por curto-circuito, circuito aberto e sombreamento). Essas falhas podem reduzir, consideravelmente, a produção de energia e também a vida útil de um sistema como destacam Hu et al. (2013) e Triki-Lahiani, Abdelghani e Belkhdja (2018). Tal fato, decorre, principalmente, devido a interferências externas resultantes da acumulação de poeira nos módulos fotovoltaicos (Marion et al. (2013)), envelhecimento dos módulos fotovoltaicos (Potnuru et al. (2015)), sombreamento (Ishaque e Salam (2013)), erro nos algoritmos do seguimento do ponto de máxima potência (Reisi, Moradi e Jamasb (2013)) e falhas nos inversores (Perpiñán, Marcos e Lorenzo (2013)). De uma maneira geral, as falhas no lado CC dos sistemas fotovoltaicos são muitas vezes difíceis de serem evitadas e podem resultar em perda de energia, interrupção na operação do sistema ou mesmo gerarem questões de segurança graves. Desta forma, é crucial detectar e identificar possíveis falhas ou defeitos em sistemas fotovoltaicos monitorados, o mais breve o possível, sendo necessário uma estratégia precisa e pronta de detecção e diagnóstico de falhas para melhorar a eficiência do sistema fotovoltaico, evitando assim, o alto custo de manutenção e redução dos riscos de incêndio que possam afetar pessoas e o equipamento instalado.

Manter um sistema fotovoltaico em plena operação de forma segura e gerar a energia desejada continua sendo um grande desafio conforme destacam Yahyaoui e Segatto (2017). Portanto, recentemente, o monitoramento em sistemas fotovoltaicos recebeu a atenção especial de pesquisadores e profissionais no campo da engenharia de segurança. De acordo com Harroua et al. (2018), o aumento da atenção à detecção de falhas e à segurança levou ao desenvolvimento de várias técnicas de detecção de falhas que podem ser agrupadas em dois grupos: técnicas de detecção de falhas baseadas em modelos e em dados. Os métodos baseados em dados utilizam modelos empíricos implícitos derivados da análise de dados disponíveis e dependem de inteligência computacional e de métodos de aprendizagem de máquinas. As abordagens nesta categoria são, principalmente, baseadas em rede neural artificial como apresentado por Mekki, Mellit e Salhi (2016), lógica difusa (Dhimish et al., 2018), e rede neural bayesiana (Borunda et al., 2016). Tais métodos requerem um conhecimento prévio mínimo sobre um sistema fotovoltaico, e também dependem da disponibilidade de dados de entrada de qualidade. Por outro lado, as abordagens baseadas em modelos comparam analiticamente as saídas calculadas com valores medidos e sinalizam um alarme quando são detectadas grandes diferenças (Chouder e Silvestre (2010)). Conforme

descrito por Harroua et al. (2018), os métodos de detecção de falhas baseados em modelos incluem abordagens embasadas no circuito elétrico de um diodo (Pillai e Rajasekar, 2018), filtro de Kalman e séries de Fourier (Madeti e Singh, 2017) sendo que a eficácia de cada uma destas metodologias depende da precisão dos modelos utilizados.

Este trabalho propõe dois métodos de diagnóstico de falhas, ambos são baseados na técnica de caracterização da curva característica I-V. O primeiro método baseia-se na derivada segunda / mínimos quadrados da curva I-V enquanto o segundo, utiliza a análise espectral da potência. Nas próximas seções serão apresentados: a metodologia utilizada, os dois métodos citados, os resultados alcançados e a conclusão.

## 2. METODOLOGIA

Para a realização do trabalho proposto, primeiramente, foi realizado uma revisão bibliográfica sobre possíveis métodos que possam realizar o diagnóstico de falhas em sistemas fotovoltaicos. Constatou-se que os métodos embasados na técnica de caracterização da curva I-V são adequados, portanto, foram utilizados, primeiramente, o método numérico, amplamente conhecido e utilizado, ou seja, o método da derivada segunda / mínimos quadrados (Björck, 1996; Kariya e Kurata, 2004; Buiatti, 2009) e, posteriormente, o método de análise espectral da potência (Walker, 1996; Arrillaga e Watson, 2004; Stoica, Li e Wang, 2005; Robert, Schilling e Harris, 2011; Monteiro et al. 2016).

Os dois métodos foram implementados no software MATLAB® R2014a e inseridos no microprocessador da caixa string inteligente (até 1000 V / 10 A), a qual utiliza o método da carga capacitiva (Carvalho et al., 2016) para extrair curvas I-Vs / P-Vs de arranjos fotovoltaicos, desenvolvida no âmbito do projeto de P&D / ANEEL - Chamada Estratégica nº 13, PE-0394-1113/2011. As curvas características I-Vs / P-Vs foram geradas para diferentes situações (sem sombreamento – condição normal de operação / com sombreamento parcial dos arranjos FVs) e os métodos citados foram testados através da caixa string inteligente acoplada a três micros sistemas fotovoltaicos, instalados em Uberlândia-MG, com capacidade instalada variando entre 2,12 kWp a 2,25 kWp cujos os arranjos fotovoltaicos são compostos por nove módulos de silício cristalino conectados em série, de diferentes potências e fabricantes. A Fig. 1. apresenta os três micros sistemas e a Fig. 2 mostra a caixa string (junção) inteligente desenvolvida acoplada aos três inversores (de diferentes fabricantes) das micro usinas fotovoltaicas (UFVs).

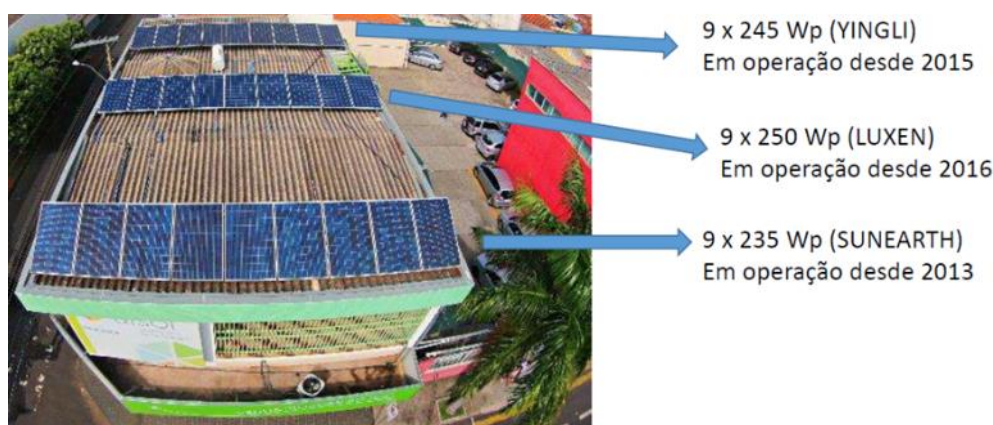


Figura 1- Micro geradores utilizados para a realização dos testes instalados em Uberlândia-MG.



Figura 2 – Inversores das 3 micro UFVs conectados a caixa de junção (string).

### 3. METÓDOS PARA A DETECÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

#### 3.1 Método da derivada segunda / mínimos quadrados

A metodologia de detecção utilizando a derivada segunda tem como base a aproximação da curva característica I-V por um conjunto de polinômios de segundo grau utilizando o método dos mínimos quadrados. O método dos mínimos quadrados (do inglês, *Ordinary Least Squares*) é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças (também denominadas de resíduos) entre o valor estimado e os dados observados (Björck, 1996).

De acordo com Kariya e Kurata (2004), o ajuste de curvas é um método que consiste em encontrar uma curva que se ajuste a uma série de pontos e que possivelmente cumpra uma série de parâmetros adicionais. O ajuste de curvas pode envolver tanto a interpolação, onde é necessário um ajuste exato aos dados, quanto suavização, na qual é construída uma função "suave" que se aproximadamente se ajusta aos dados. A título de exemplo, a Fig. 3 mostra um ajuste de curva utilizando polinômio de segundo grau pelo método dos mínimos quadrados, onde cada ponto é calculado com base em uma janela de 101 pontos.

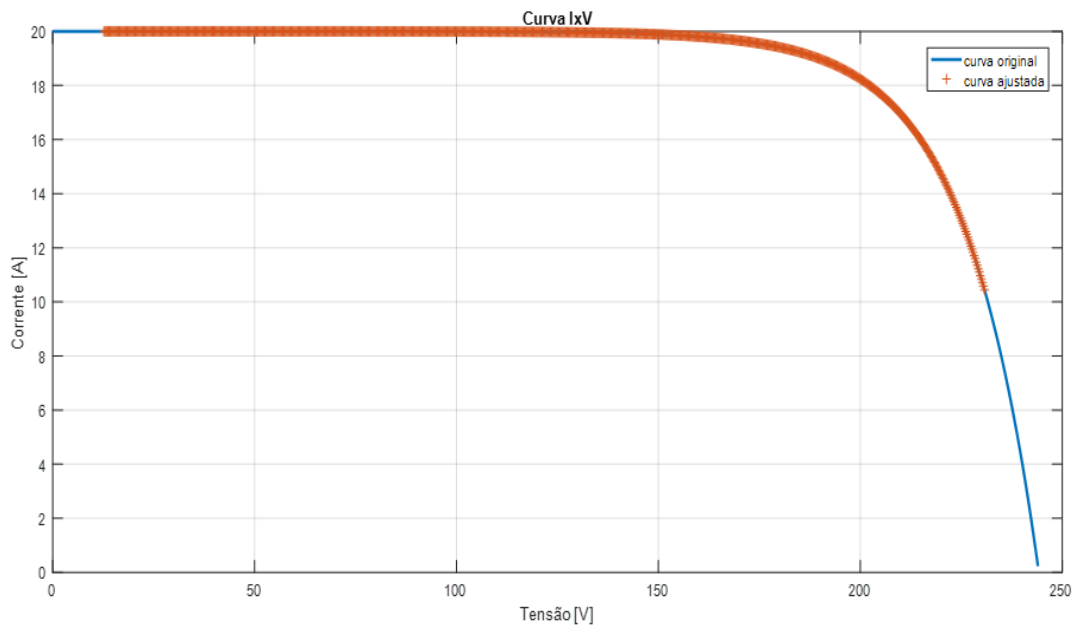


Figura 3 - Aproximação da curva I-V utilizando métodos dos mínimos quadrados com janela de 101 pontos.

Cabe salientar que devido a erros de medição, alteração de condições de variáveis dependentes durante o experimento, entre outras, nem sempre uma função polinomial interpoladora dos pontos fornecidos é a melhor solução. Muitas vezes, uma curva que melhor se ajusta a estes pontos levando em consideração a existência de erros que, em geral, não são previsíveis pode levar a melhores resultados (Kariya e Kurata, 2004).

Segundo Björck (1996), uma das vantagens de se obter uma curva que se ajusta adequadamente a estes pontos, é a possibilidade de prever os valores da função (variável dependente) para valores da variável explicativa que estão fora do intervalo fornecido. Ou seja, é possível fazer uma extrapolação com uma precisão razoável.

Neste trabalho, optou-se por utilizar a aproximação polinomial de 2ª ordem devido a facilidade de se obter as derivadas de primeira e segunda ordem. Sendo assim, o polinômio interpolador é apresentado pela Eq. (1).

$$P(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (1)$$

sua derivada de primeira ordem é dada pela Eq. (2).

$$\partial P / \partial x = a_1 + a_2 x \quad (2)$$

e a derivada de segunda ordem é dada pela Eq. (3).

$$(\partial^2 P) / (\partial^2 x) = a_2 \quad (3)$$

### 3.2 Método da análise espectral da potência

A técnica de análise espectral da potência (do inglês, *Fast Fourier Transform - FFT*) é frequentemente utilizada para avaliar a condição de operação em sistemas eletrônicos de potência (Kim, 2016). Como exemplos de aplicação deste método pode-se destacar: a detecção de barras quebradas em motores de indução trifásicos em sistemas industriais e de tração, falhas em IGBT's em inversores de frequência, entre outros. Para a aplicação do método é necessário o entendimento do teorema da amostragem e da transformada de Fourier descritos de forma sucinta e objetiva a seguir.

#### 3.2.1. A transformada de Fourier e o teorema da amostragem

A partir de um sinal representado no domínio do tempo, a transformada de Fourier permite calcular o espectro do sinal que é a representação desse sinal no domínio da frequência. Alternativamente, partindo de uma representação no domínio da frequência, é possível obter a representação do sinal no domínio do tempo utilizando a transformada inversa de Fourier. A transformada de Fourier em tempo discreto de uma sequência  $X(n)$  pode ser definida pela Eq. (4).

$$(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(n) e^{-j\omega n} \quad (4)$$

Cabe salientar que  $X(e^{j\omega})$ , caso seja convergente, resulta em uma função de  $\omega$  que é contínua ou geralmente contínua, e que também é periódica em  $\omega$  com um período de  $2\pi$ . A periodicidade da função pode ser observada pelo fato de que  $e^{j(\omega+2\pi)} = e^{j\omega}$ . A transformada de Fourier em tempo discreto possui uma operação inversa, que transforma  $X(e^{j\omega})$  de volta para  $X(n)$ , como mostra a Eq. (5).

$$X(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (5)$$

A conclusão sobre a periodicidade da transformada de Fourier de uma sequência em tempo discreto é muito importante, pois demonstra que a transformada de Fourier, caso possa ser calculada, será periódica com período igual a  $2\pi$  em  $\omega$ . Isso indica uma primeira fonte de modificação da informação associada a um sinal, ao efetuar a transformação do domínio de tempo contínuo para o domínio de tempo discreto por meio de uma operação de amostragem. Toda sequência obtida pela amostragem de um sinal em tempo contínuo exibirá um espectro periódico (transformada de Fourier) com um período de  $2\pi$  em  $\omega$ , independentemente de qual seja o espectro do sinal em tempo contínuo. Isso leva, portanto, à conclusão de que a transformação do domínio de tempo contínuo para o domínio de tempo discreto operada por uma operação de amostragem sempre modifica a informação associada ao sinal amostrado.

O teorema da amostragem de Nyquist-Shannon, também conhecido simplesmente como teorema de Nyquist, é o processo no qual se converte um sinal (por exemplo, uma função contínua no tempo ou espaço) em uma sequência numérica (uma função discreta no tempo ou espaço). O teorema mostra que um sinal analógico, limitado em banda, que foi amostrado, pode ser perfeitamente recuperado a partir de uma sequência infinita de amostras, se a taxa de amostragem for maior que duas vezes  $F_m$  amostras por segundo, onde  $F_m$  é a maior frequência do sinal original. Porém, se um sinal contiver uma componente exatamente na maior frequência, e amostras espaçadas de exatamente  $1 / (2 \times F_m)$  segundos, não se consegue recuperar totalmente o sinal.

O teorema, portanto, assume uma idealização de qualquer situação do mundo real, uma vez que o mesmo só se aplica a sinais que são amostrados para tempo infinito; um sinal  $X(t)$  limitado em tempo não pode ser perfeitamente limitado em banda. A recuperação perfeita do modelo idealizado é matematicamente possível, mas é somente uma aproximação de sinais do mundo real, embora na prática seja uma aproximação muito boa.

#### 3.2.2. Curva de Potência versus Tensão e a Transformada de Fourier

Embora as curvas características I-V dos arranjos FV não sejam periódicas e nem uma função direta do tempo, é possível, considerando os efeitos discutidos anteriormente, tratá-las como uma onda periódica.

Para que se possa aplicar a análise espectral, utilizando os algoritmos tradicionais de transformada de Fourier (FFT), a curva característica I-V passou por uma etapa de pré-processamento. Devido a ruídos e erros presentes no processo de amostragem das curvas não é possível garantir que para cada valor de tensão exista um único valor de corrente correspondente, assim, é necessário remover do conjunto de dados de entrada valores duplicados de tensão.

Além disso, para que o algoritmo da transformada de Fourier funcione adequadamente, é necessário um conjunto de pontos onde  $(V_0, I_0)$ ,  $(V_1, I_1)$ , ...,  $(V_{i-1}, I_{i-1})$ ,  $(V_i, I_i)$ , onde  $i$  é o número de amostras, sejam igualmente espaçados. De forma a se obter um conjunto de pontos igualmente espaçados optou-se por utilizar o algoritmo de interpolação denominado de *Spline cúbica*.

Para realizar a análise espectral optou-se por utilizar a curva de potência versus tensão ( $P \times V$ ) pelo fato de não apresentar descontinuidades minimizando assim, os efeitos do espalhamento espectral. Antes de se processar o cálculo da transformada de Fourier (FFT), para todos os testes realizados, foi utilizada uma janela de tratamento do tipo retangular. Além disso, a curva P-V foi modificada adicionando ao final da mesma uma cópia invertida da forma de onda original.

Este procedimento faz com que a forma de onda analisada possua simetria de quarto de onda com valor médio zero. A Fig. 4 mostra a curva P-V original e a curva utilizada no cálculo da transformada.

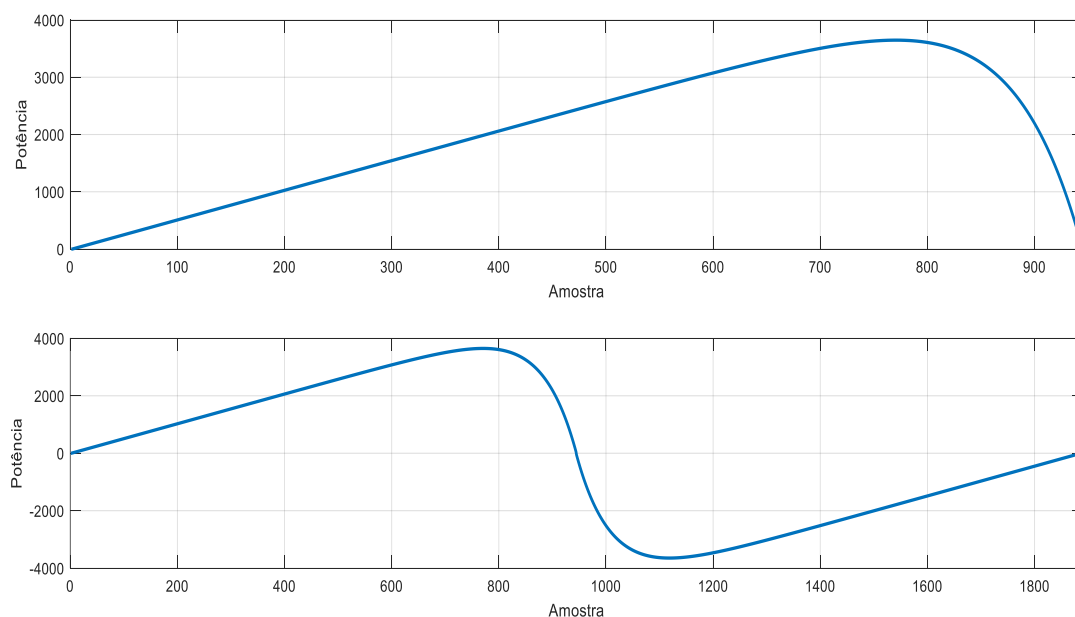


Figura 4 – Curva P-V original e curva utilizada para cálculo da transformada de Fourier.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Método da derivada segunda / mínimos quadrados

A Fig. 5 (a) e a Fig. 5 (b) mostram, respectivamente, o ajuste e a curva resultantes da aplicação do método da segunda derivada / mínimos quadrados de uma curva P-V para um arranjo em condições normais de operação (ex: sem sombreamento, poeira etc).

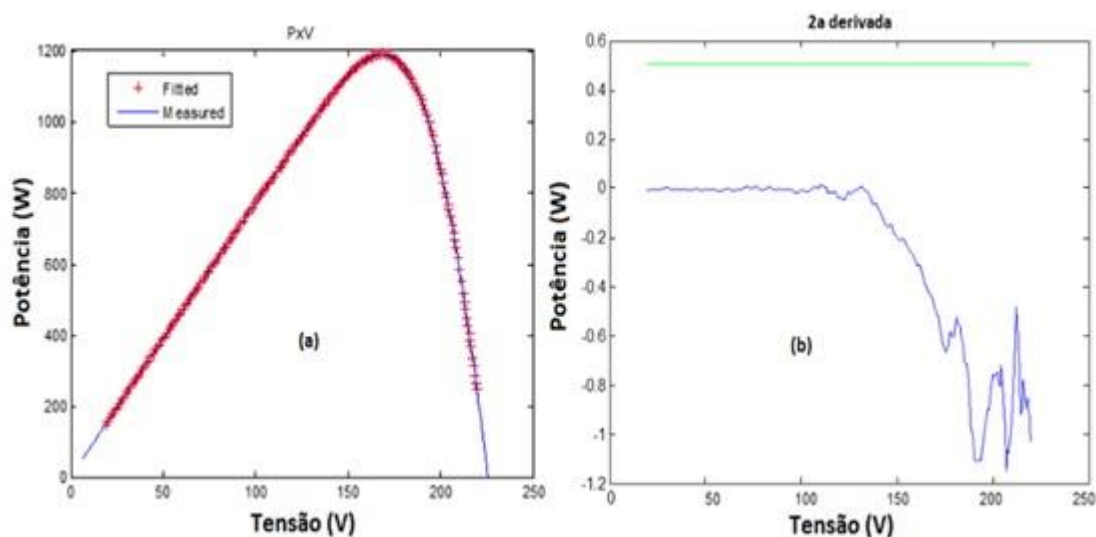


Figura 5 – (a) Ajuste de uma curva P-V em condições normais de operação; (b) segunda derivada da curva P-V em condições normais de operação.

A Fig. 6 (a) e a Fig. 6 (b) mostram, respectivamente, o ajuste e a curva da derivada segunda de uma curva P-V para um arranjo operando em condição de sombreamento parcial.

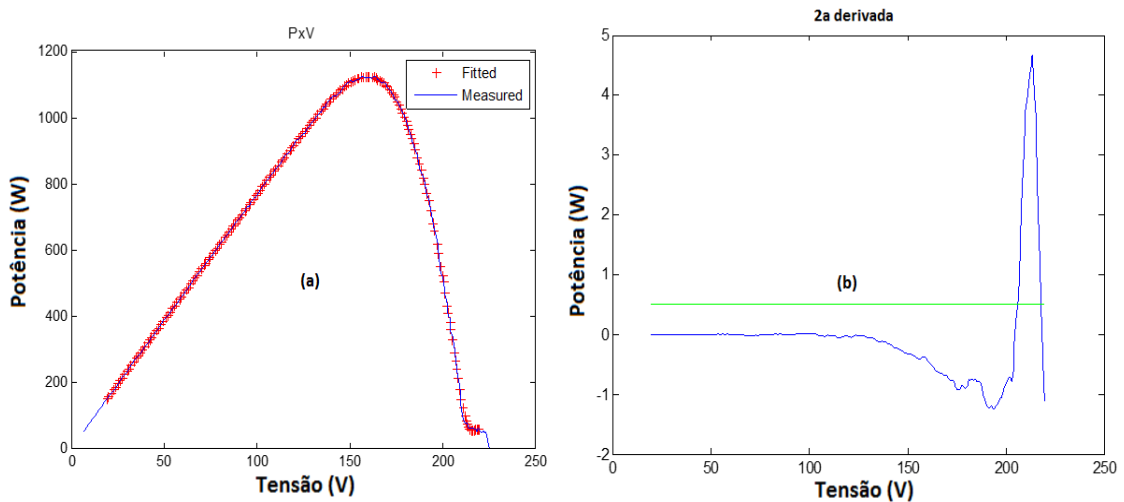


Figura 6 – (a) Ajuste de uma curva P-V operando com sombreamento parcial; (b) segunda derivada da curva P-V em condições com sombreamento parcial.

Como é possível observar na Fig. 5 (b) e Fig 6 (b), observa-se que o valor da derivada segunda sempre é inferior ao limiar estabelecido na primeira e apresenta pontos com valor superior ao limiar na segunda. Para que o algoritmo possa ser melhor utilizado, ainda é necessário investigar alguns pontos entre eles destaca-se a sensibilidade ao ruído, a melhor frequência de corte para o filtro e pôr fim a relação entre o limiar e a potência do arranjo FV.

#### 4.2 Método da análise espectral da potência

Para avaliar o método proposto e, conseqüentemente, as componentes do espectro da potência em função dos defeitos / falhas em módulos e arranjos FVs foram realizadas 19 medições reais (utilizando os SFVs apresentados na seção 2 e taxa de amostragem de 10[kHz]). Na Fig. 7 (a) / (b), Fig. 8 (a) / (b), Fig. 9 e Fig. 10 são apresentados os resultados, curvas I-Vs / P-Vs e espectro de potência, para duas amostras de medições, escolhidas aleatoriamente, com o arranjo FV operando em condições normais de operação (sem sombreamento / poeira e etc). Já na Fig. 11 (a) / (b), Fig. 12 (a) / (b), Fig. 13 e Fig. 14 são mostrados os resultados para duas amostras de medições, selecionadas arbitrariamente, com o arranjo FV operando em diferentes condições de sombreamento parcial.

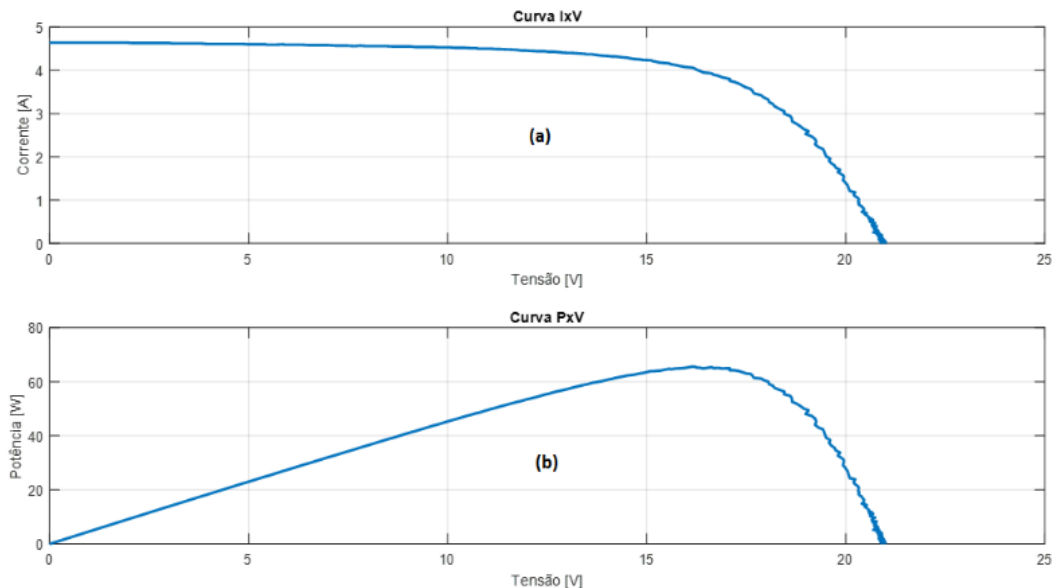


Figura 7 – Medição 1: (a) curva I x V (b) curva P x V: ambas em condições normais de operação.

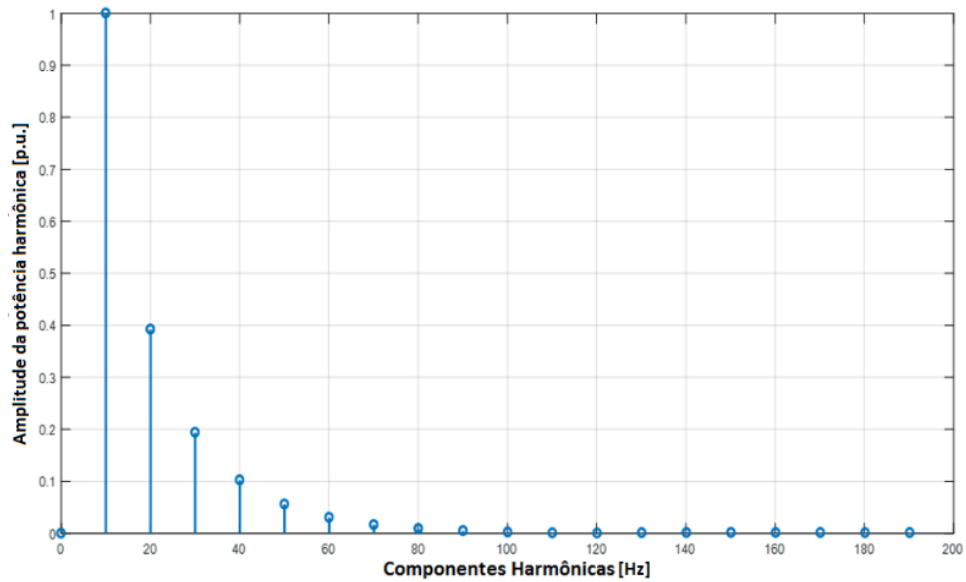


Figura 8 – Espectro harmônico da potência (diagnóstico de falhas) para medição 1 em operação normal.

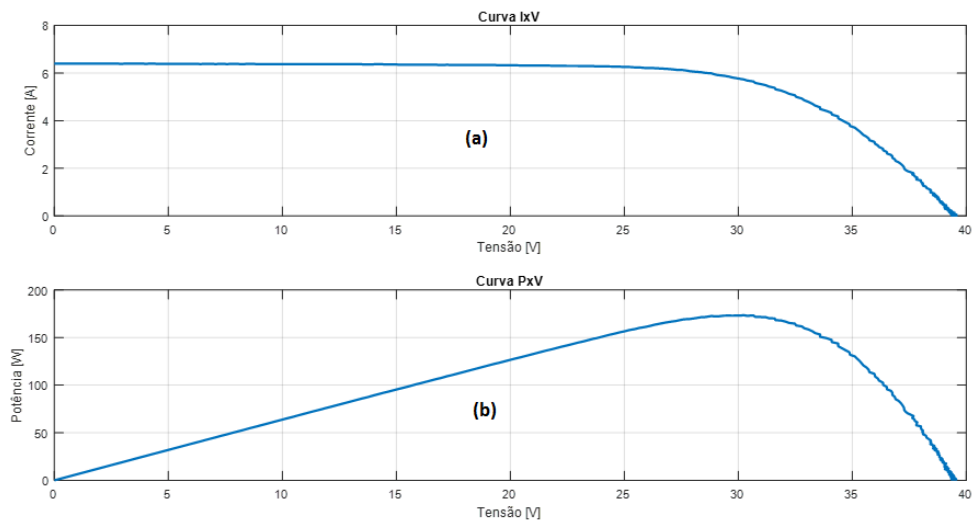


Figura 9 – Medição 19: (a) curva I x V (b) curva P x V: ambas em condições normais de operação.

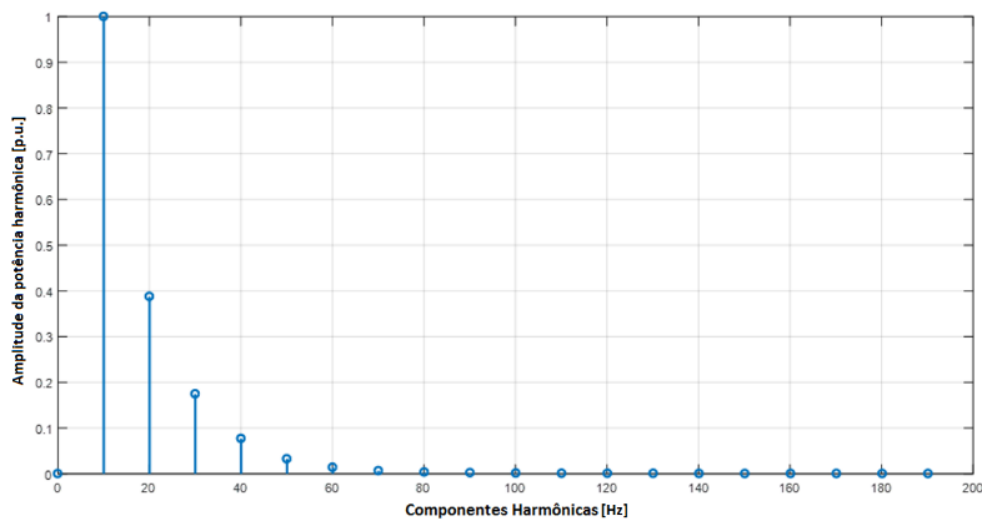


Figura 10 – Espectro harmônico da potência (diagnóstico de falhas) para medição 19 em operação normal.

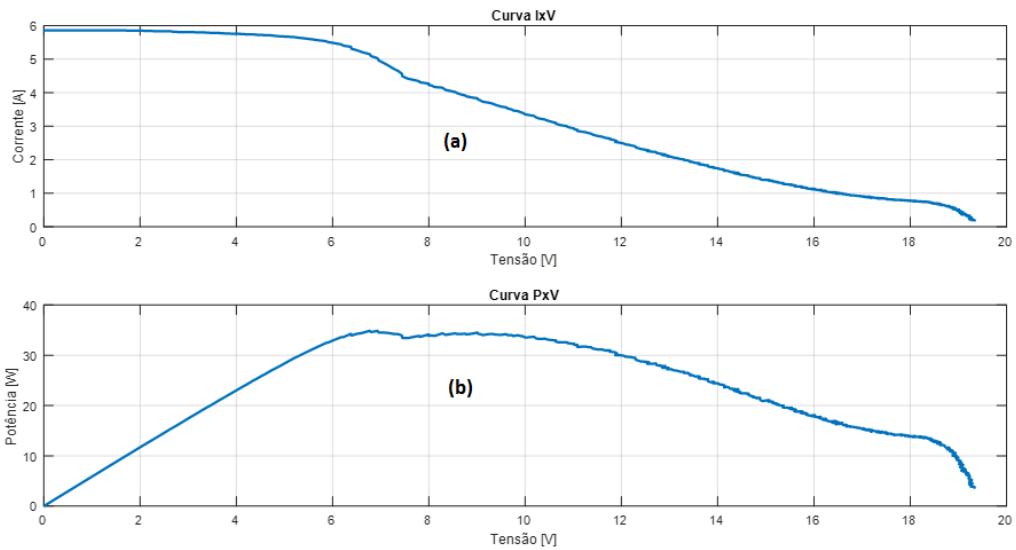


Figura 11 – Medição 15: (a) curva I x V (b) curva P x V: ambas em condições de sombreamento parcial de operação.

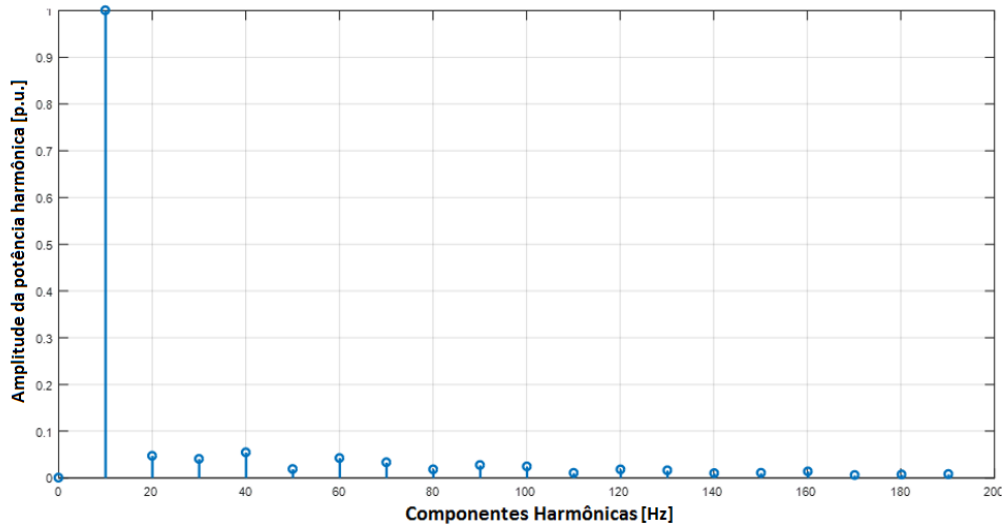


Figura 12 – Espectro harmônico da potência (diagnóstico de falhas), medição 15, condições de sombreamento parcial.

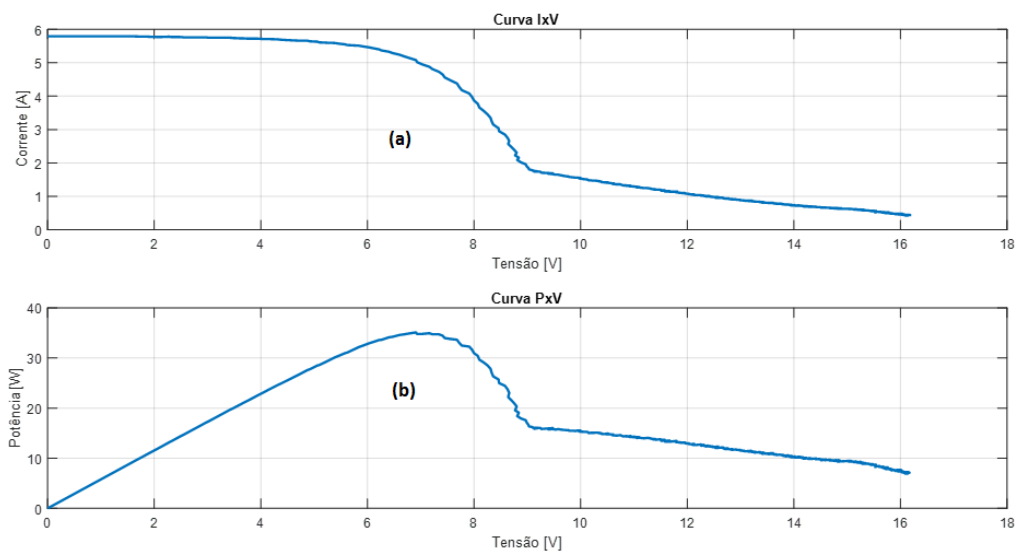


Figura 13 – Medição 13: (a) curva I x V (b) curva P x V: ambas em condições de sombreamento parcial de operação.



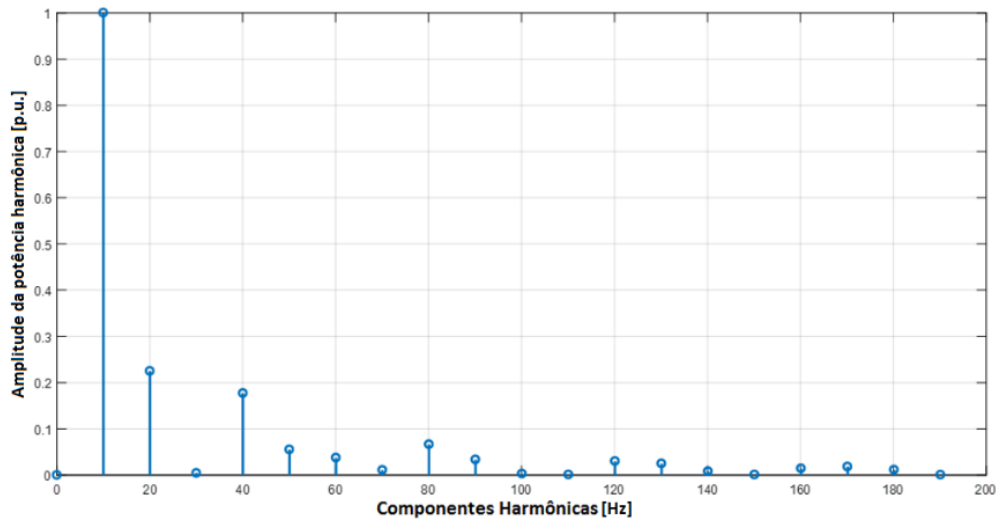


Figura 14 – Espectro harmônico da potência (diagnóstico de falhas), medição 13, condições de sombreamento parcial.

Como todo sinal limitado no tempo, o conteúdo espectral das formas de onda das curvas P-Vs apresentadas na Fig. 7, Fig. 9, Fig. 11 e Fig. 13 possuem infinitos harmônicos. Para facilitar a análise, optou-se por normalizar a amplitude das harmônicas em função da amplitude da onda fundamental e restringir a análise às componentes com pelo menos 0,1% da amplitude da fundamental.

Como é possível observar na Fig. 8 e Fig. 9 a análise das componentes espectrais para o arranjo FV, em condições normais de operação, mostra um comportamento decrescente das amplitudes, ou seja, a amplitude de harmônicos superiores sempre é menor que a amplitude dos harmônicos de ordem inferior. Por outro lado, a análise do espectro de potência para o arranjo FV em condições de sombreamento parcial, Fig. 12 e Fig. 14, mostra oscilações nas amplitudes dos harmônicos pares e ímpares o que indica a presença de falhas no sistema.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs a utilização de dois métodos para o diagnóstico de falhas em sistemas fotovoltaicos, ou seja, o método da derivada segunda / mínimos quadrados e o método da análise espectral da potência (do inglês, *Fast Fourier Transform* – FFT). Cabe salientar que ambas metodologias são baseadas na técnica de caracterização da curva característica I-V que foram extraídas de uma caixa string inteligente acoplada as micros UFVs em Uberlândia-MG.

Os resultados preliminares mostram que a técnica através da análise espectral é um método promissor para o diagnóstico de falhas de arranjos fotovoltaicos. Toda uma família completa de curvas P-V, considerando diferentes situações de operação (sem sombreamento / com sombreamento parcial) foram analisadas e validadas. Em condições normais de operação (sem sombreamento), foi observado que as amplitudes estão sempre decrescendo pelo menos até que a amplitude normalizada de  $10^{-3}$  seja alcançada (mesmo em condições com bastante ruído).

Na presença de falha / defeito (sombreamento parcial), oscilações vão aparecer antes da amplitude considerada, levando à conclusão que existe um problema. Como o presente método lida com frequências muito mais baixas que a frequência de amostragem, foi verificado que o efeito do ruído é minimizado e não irá perturbar as conclusões.

Em relação a técnica da derivada segunda / mínimos quadrados, para que o algoritmo possa ser melhor utilizado, ainda é necessário investigar alguns pontos entre eles destaca-se a sensibilidade ao ruído, a melhor frequência de corte para o filtro e pôr fim, a relação entre o limiar e a potência do arranjo FV. Portanto, e apesar dos testes preliminares terem sido satisfatórios, ainda é necessário a realização de mais testes para adequar o método a detecção, de forma mais precisa, de falhas em SFVs.

Finalmente, ambos os métodos demonstraram serem eficazes na detecção de falhas em sistemas fotovoltaicos, porém, são necessários a realização de mais testes de forma a aprofundar os estudos / análises e assim, corrigir erros, otimizar os algoritmos e a precisão de cada um dos métodos para melhor diagnosticar possíveis falhas em sistemas fotovoltaicos.

### Agradecimentos

As empresas, Enercan Campos Novos Energia S.A, Companhia Energética Integrada , ALSOL Energias Renováveis S.A. pelo apoio técnico e financeiro. Trabalho desenvolvido no âmbito da Chamada Estratégica nº013/2011 (Aneel PE-0394-1113/2011) do Programa de P&D Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

### REFERÊNCIAS

Alam, M., Khan, F., Johnson, J., Flicker, J., 2015. A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: types,

- detection, and mitigation techniques, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 5 (3), pp. 982-997.
- Arrillaga, J., Watson, N., 2004. Power System Harmonics. John Wiley & Sons, Ltd.
- Björck, Å., 1996. Numerical Methods for Least Squares Problems. SIAM.
- Borunda, M., Jaramillo, O., Reyes, A., Ibarguengoytia, P., 2016. Bayesian networks in renewable energy systems: A bibliographical survey, Renewable Sustainable Energy Reviews, Vol. 62, pp. 32-45.
- Buiatti, G. M., Method and apparatus for obtaining information enabling the determination of the maximum power point of a power source. EPO 09 165145.5 (Depositada em 10 de Julho de 2009).
- Carvalho, D. P., Monteiro, L., Galdino, M. A., Buiatti, G. M., 2016. Estado da Arte dos Métodos para a Caracterização de Módulos e Arranjos Fotovoltaicos. VI CBENS - VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte-MG.
- Chouder, A., Silvestre, S., 2010. Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis Energy Conversion Management, Vol. 51 (10), pp. 1929-1937.
- Dhimish, M., Holmes, V., Mehrdadi, B., Dales, M., 2018. Comparing Mamdani Sugeno fuzzy logic and RBF ANN network for PV fault detection. Renewable Energy, Vol. 117, pp. 257-274.
- Harroua, F., Sun, Y., Taghezouit, B., Saidi, A., Mohamed-Elkarim, H., 2018. Reliable fault detection and diagnosis of photovoltaic systems based on statistical monitoring approaches. Renewable Energy, Vol. 116, pp. 22-37.
- Hu, Y., Gao, B., Song, X., Tian, G., Li, K., He, X., 2013. Photovoltaic fault detection using a parameter based model, Solar Energy, Vol. 96, pp. 96-102.
- Ishaque, K., Salam, Z., 2013. A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition, Renewable Sustainable Energy Reviews, Vol. 19, pp. 475-488.
- Kariya, T., Kurata, H., 2004. Generalized Least Squares. Hoboken: Wiley.
- Kim, I., 2016. On-line fault detection algorithm of a photovoltaic system using wavelet transform, Solar Energy, Vol. 96, pp. 96-102.
- Marion, B., Schaefer, R., Caine, H., Sanchez, G., 2013. Measured and modeled photovoltaic system energy losses from snow for Colorado and Wisconsin locations, Solar Energy, Vol. 97, pp. 112-121.
- Monteiro, L., Macêdo, W., Torres, P., Piterman, A., Amaral, G., Mello, J., Mendes, V., Lopes, B., Corrade, T., Boaventura, W., 2016. Assessment of Harmonic Distortion in Small Grid-Connected Photovoltaic Systems. In: 17th International Conference on Harmonics in Power Systems (ICHPS) - IEEE PES, Belo Horizonte-MG.
- Madeti, S., Singh, S., 2017. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system, Solar Energy, Vol. 158, pp. 161-185.
- Mekki, H., Mellit, A., Salhi, H., 2016. Artificial neural network-based modelling and fault detection of partial shaded photovoltaic modules. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 2016, pp. 1-13.
- Perpiñán, O., Marcos, J., Lorenzo, E., 2013. Electrical power fluctuations in a network of DC/AC inverters in a large PV plant: relationship between correlation, distance and time scale, Solar Energy, Vol. 88, pp. 227-241.
- Pillai, D., Rajasekar, N., 2018. Metaheuristic algorithms for PV parameter identification: A comprehensive review with an application to threshold setting for fault detection in PV systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 3503-3525.
- Potnuru, S., Pattabiraman, D., Ganesan, S., Chilakapati, N., 2015. Positioning of PV panels for reduction in line losses and mismatch losses in PV array, Renewable Energy, Vol. 78, pp. 264-275.
- Reisi, A., Moradi, M., Jamasb, S., 2013. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: a review, Renewable Sustainable Energy Reviews, Vol. 19, pp. 433-443.
- Robert, J., Schilling, S., Harris, L., 2011. Fundamentals of Digital Signal Processing Using Matlab. CL Engineering.
- Stoica, P., Li, J., Wang, Y., 2005. Spectral analysis of signals: The missing data case. Morgan & Claypool.
- Triki-Lahiani, A., Abdelghani, A., Belkhdja, I., 2018. Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 2680-2692.
- Yahyaoui, I., Segatto, M., 2017. A practical technique for on-line monitoring of a photovoltaic plant connected to a single-phase grid Energy Convers. Manag., 132 (2017), pp. 198-206.
- Walker, J. S., 1996. Fast Fourier Transforms. CRC Press, NY.

## FAULT DIAGNOSTIC METHODS FOR PHOTOVOLTAIC ARRAYS

**Abstract.** *Operational costs and long-term reliability are key factors in reducing the total cost of living of a photovoltaic system. In this context, the characterization and diagnosis methods are increasingly important in the identification and understanding of the faults and modes of degradation that affect the modules and photovoltaic arrays as well as the development of new tools and tests to evaluate the reliability and the useful life of the modules FVs. I-Vs characteristic curves can provide various information about the condition and electrical properties of PV generators, for example, short-circuit current, open-circuit voltage, fill-factor, series and parallel resistance, equivalent diode ideality factor. In addition to indicating the presence of shading and dust / dirt. This work proposes two fault diagnosis methods for photovoltaic systems, both of which are based on the I-V characteristic curve characterization technique. The first method is based on the technique of the second derivative / least squares of the I-V curve while the second method uses spectral power analysis. The preliminary results found were satisfactory and promising for the detection of faults in photovoltaic systems.*

**Key words:** *Fault Diagnostic Methods, I-V Curve, Photovoltaic Array*