



ESTUDO DE UM MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM APLICAÇÃO EM UM INVERSOR MULTISTRING CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Leonardo Longuinho Sivieri*, Rodrigo Rimoldi de Lima, Danillo Borges Rodrigues, Madeleine Rocio Medrano Castillo Albertini

UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Resumo - Esse artigo apresenta a implementação de um método de análise de faltas em painéis fotovoltaicos com aplicação em um inversor multistring fotovoltaico conectado à rede elétrica simulado através do programa PSIM, analisando graficamente o comportamento das ondas de corrente, tensão e potência, tanto na saída do painel quanto no ponto de acoplamento com a rede elétrica. O método se chama teoria da extensão e utiliza elementos importantes para identificar as faltas em painéis fotovoltaicos.

Palavras-Chave – Método de faltas; Painéis Fotovoltaicos; PSIM; Teoria da extensão.

STUDY OF A FAULT ANALYSIS METHOD IN PHOTOVOLTAIC PANELS WITH APPLICATION IN A MULTISTRING INVERTER CONNECTED TO THE ELECTRICAL NETWORK

Abstract - This paper presents the implementation of a fault analysis method in photovoltaic panels with application in a grid-tied multistring inverter simulated through the PSIM program, analyzing through graphs the behavior of current, voltage and power waves, both at the output of the panel and at the output connected to the mains. The method is called extension theory, in which it uses matter-elements to identify faults in photovoltaic panels.

Keywords – Fault methods; Photovoltaic panels; PSIM; Extension theory.

I. INTRODUÇÃO

No ramo da produção de energia elétrica, a busca por novas tecnologias limpas e renováveis tem sido uma tônica em sistemas de geração distribuída. Visando uma contínua elevação de produtividade em termos de eficiência energética,

as células fotovoltaicas têm sido objeto de vários estudos de otimização e análise de falhas, visando maximizar o aproveitamento de todo o potencial energético inesgotável proveniente do sol. De acordo com o atlas solarimétrico brasileiro [1], o Brasil tem um alto índice de incidência solar. Em outras palavras, tem uma capacidade grande de produção de energia.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) [2], o Brasil deverá fechar o ano de 2018 com cerca de 2,4GW de capacidade instalada no setor de energia solar. A fonte solar abastece 633 mil residências, com um pouco mais de 30 mil sistemas instalados de geração distribuída e investimentos de 20 bilhões esperados. Os principais fatores para esse aumento foram a redução de 75% do preço da energia solar e o crescimento no preço da energia elétrica, a qual desde 2012 subiu quase 500%, além do que a BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) ajuda no financiamento para pessoas físicas terem o sistema.

Assim como todos materiais, o painel fotovoltaico sofre desgastes com o decorrer dos anos, prejudicando seu desempenho. De acordo com [3], alguns fatores que fazem os sistemas fotovoltaicos perderem potência são: o ângulo incidente, o sombreamento, o envelhecimento, a sujeira, a temperatura, o erro de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), inversores, incompatibilidade espectral, entre outros. O efeito do sombreamento pode fazer com que uma célula queime [4], dano este irreversível para um ramo de células, haja vista a conexão em série empreendida entre elas. Acidentes elétricos e o envelhecimento das placas também podem causar o mal funcionamento. Incluindo também o impacto exercido pelas intempéries, o saldo final é que o painel passa a fornecer menos energia.

Atualmente é difícil identificar o tipo exato de falta, o que pode conduzir a diagnósticos errados e uma perda significativa de tempo em manutenções, especialmente quando há um alto número de painéis envolvidos. Em se tratando de grandes plantas, centenas de volts são produzidos, colocando em perigo a vida do profissional da manutenção, aumentando a importância de um diagnóstico rápido e eficiente.

*leonardolonguinhosivieri@gmail.com

Em face deste cenário, o presente trabalho está focalizado na aplicação de um método de análise de falhas chamado de teoria da extensão (*Extension Theory*) sobre um modelo de inversor CSI fotovoltaico multistring conectado à rede elétrica [7], visando a injeção de corrente com baixo conteúdo harmônico e fator de potência unitário. O referido método cria um conjunto de faltas nos elementos que mais importam nos módulos fotovoltaicos. A partir disso, uma função de correlação atua identificando o tipo de falta do arranjo por cálculos no grau de relação. Tal ação permite detectar o mal funcionamento com menos consumo de memória, possibilitando ainda identificar o tipo de falta sem uma interrupção do sistema. A estrutura multistring na qual foi empreendido o estudo é alimentada por duas strings com cinco painéis da Canadian Solar® em cada uma e os resultados computacionais apresentados neste artigo foram obtidos por meio de simulações no software PSIM [8].

II. ESTRUTURA DO MODELO DE PAINEL FOTOVOLTAICO UTILIZADO

O PSIM® [8] possui um modelo físico de módulo solar (Figura 1) que opera recebendo valores de temperatura (T) e irradiância solar (S) para produzir os valores de corrente, tensão e potência na saída condizentes com as curvas características P×V e I×V do fabricante. É possível ainda limitar a potência do painel de acordo com as condições de operação.

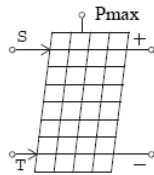


Fig. 1. Modelo físico do painel solar do programa PSIM® [8].

O modelo de painel solar do PSIM® considera um número de células solares (N_s) definido pelo usuário, conforme elucidada a Figura 2.

A Figura 2 apresenta ainda a corrente gerada pelo painel (i_{ph}) devido à temperatura e irradiância, uma pequena resistência em série (R_s) e uma resistência *shunt* (R_{sh}). Já v/N_s e i representam a saída de tensão e corrente da célula solar, respectivamente.

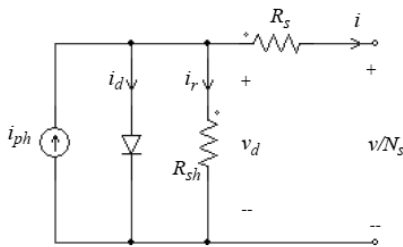


Fig. 2. Modelo equivalente de uma célula solar [8].

O equacionamento deste modelo de painel segue listado a seguir.

$$i = i_{ph} - i_d - i_r \quad (1)$$

$$i_{ph} = I_{sc0} \cdot \frac{S}{S_0} + C_t \cdot (T - T_{ref}) \quad (2)$$

$$i_d = I_0 \cdot (e^{\frac{qv_d}{AkT}} - 1) \quad (3)$$

$$I_0 = I_{s0} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \quad (4)$$

$$i_r = \frac{v_d}{R_{sh}} \quad (5)$$

$$v_d = \frac{v}{N_s} + i \cdot R_s \quad (6)$$

$$T = T_a + k_s \cdot S \quad (7)$$

Sendo:

- q – A carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C);
- k – A constante de Boltzman ($1,3806505 \times 10^{-23}$);
- S – A irradiância solar;
- T_a – A temperatura ambiente;
- V – A tensão do módulo;
- i – A corrente do módulo.

Cada uma das duas strings é formada por cinco painéis da Canadian Solar, modelo Quartech CS6P-250, conectados em série entre si, totalizando 300 células. A estrutura de teste mostrada na Figura 3 foi constituída para levantamento das curvas características dos módulos tanto em condições normais de operação como quando sujeitos a falhas. As curvas obtidas serão apresentadas no tópico resultados.

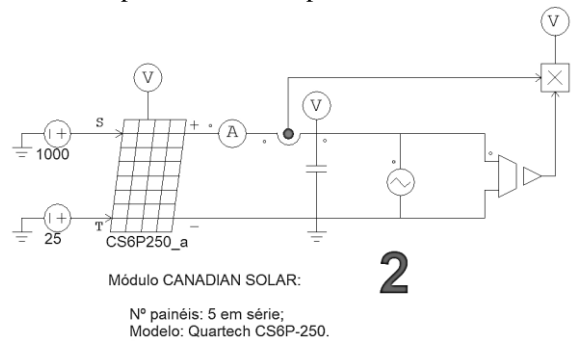


Fig. 3. Modelo implementado [7].

CS6P-220/225/230/235/240/245/250P							
Electrical Data							
	CS6P-220P	CS6P-225P	CS6P-230P	CS6P-235P	CS6P-240P	CS6P-245P	CS6P-250P
Nominal Maximum Power at STC (Pmax)	220W	225W	230W	235W	240W	245W	250W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	29.2V	29.4V	29.6V	29.8V	29.9V	30.0V	30.1V
Optimum Operating Current (Imp)	7.53A	7.65A	7.78A	7.90A	8.03A	8.17A	8.30A
Open Circuit Voltage (Voc)	36.6V	36.7V	36.8V	36.9V	37.0V	37.1V	37.2V
Short Circuit Current (Isc)	8.09A	8.19A	8.34A	8.46A	8.59A	8.74A	8.87A
Operating Temperature	-40°C~+85°C						
Maximum System Voltage	1000V (IEC) /600V (UL)						
Maximum Series Fuse Rating	15A						
Power Tolerance	+5W						
Temperature Coefficient	Pmax	-0.43%/°C					
	Voc	-0.34%/°C					
	Isc	0.065%/°C					
	NOCT	45°C					

Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C

Fig. 4. Especificações do módulo Canadian Solar, modelo Quartech CS6P.

III. MÉTODO IMPLEMENTADO

Como mencionado anteriormente, o método aqui implementado é chamado de teoria da extensão. Ele é baseado em uma comparação entre os valores reais e ideais mais importantes do painel (neste caso, a corrente, a tensão e a potência), mostrando o grau de impacto da quantidade de faltas em ramos das células. O artigo [4] explica mais detalhadamente essa teoria e a compara com outras duas teorias de conjunto, a *Fuzzy* e a *Cantor*, as quais tem 97,01 % e 75,18 % de precisão, respectivamente, sendo que, a teoria da extensão atinge o patamar de 99,11%. O número de iterações para o método implementado é zero, ao passo que das outras duas é de 1500 para a *Fuzzy* e 500 para a *Cantor*.

A Figura 5 mostra o grau de relação de uma variável genérica de acordo com a teoria da extensão. $K(x)$ é a função correlação e x uma variável qualquer (no caso, tensão, corrente ou potência); f e g são limites de um conjunto X ; e a e b são limites de um conjunto X_0 , sendo que X_0 está contido em X . Um valor de $K(x) \geq 0$ indica que x pertence a X_0 , ao passo que $K(x) < 0$ estabelece que x não pertence a X_0 . Já caso $-1 < K(x) < 0$, então x pode fazer parte de X_0 , se as condições mudarem [4].

Esse método é específico para cada tipo de painel e arranjo fotovoltaico, ou seja, o intervalo de valores de tensão, corrente e potência varia conforme o número de células, tipo de células, coeficiente de temperatura, tensão de circuito aberto, etc. Simulações são feitas para se determinar esse intervalo de valores, sendo que o módulo proposto pelo PSIM® apresenta valores ideais, ou seja, sem perdas ou faltas. Com isso, dependendo do estado do painel (com perdas), existe uma porcentagem na qual uma categoria de falta pertença a uma outra categoria, com menor grau.

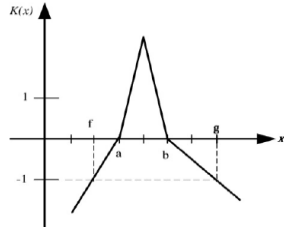


Fig. 5. Função correlação [4].

O teste de aplicação da teoria da extensão foi realizado em um Inversor CSI fotovoltaico com duas *strings* de entrada (*multistring*) especificamente desenvolvido por [7] para injetar corrente de alta qualidade na rede elétrica após um estágio de filtragem passiva, como mostra a Figura 6. Foram simuladas no programa, primeiramente, irradiâncias e temperaturas com valores dentro das médias brasileiras evidenciadas em [1]; a primeira grandeza com variações entre $900 W/m^2$ e $1000 W/m^2$; e a segunda com variações entre $30^\circ C$ e $40^\circ C$. Para estas faixas foram extraídos os valores de corrente, tensão e potência, apresentados no tópico resultados.

A fim de estabelecer as categorias de faltas dos painéis fotovoltaicos, chamadas de PF_1 , PF_2 , PF_3 , PF_4 , PF_5 e PF_6 , foram retiradas, igualmente, algumas células de ambos os módulos, de acordo com o número de ramos, sendo que o PF_1 contém todas as células. Neste caso, cada painel simulado

contém 6 ramos de 50 células cada. Logo, a cada categoria de falta foram retiradas 50 células (PF_1 tem 300 células, PF_2 tem 250 células, PF_3 tem 200 células, etc.). Com isso, pode-se determinar os limites de variação de cada falta permitida conforme a I.

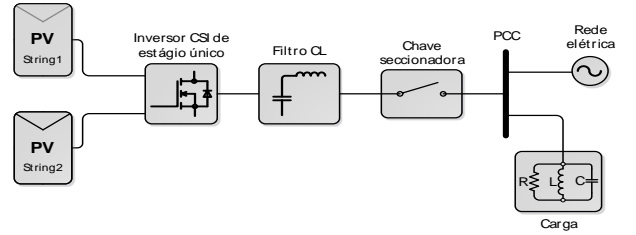


Fig. 6. Visão geral da estrutura na qual foi aplicada a teoria da extensão [7].

Tabela 1. Variação de tensão, corrente e potência para as faltas com irradiância de $900 W/m^2$ a $1000 W/m^2$ e temperatura de 30 a $40^\circ C$.

Categoria de falta	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]
PF_1	(140 ~ 170)	(6 ~ 9)	(840 ~ 1500)
PF_2	(120 ~ 140)	(6 ~ 9)	(720 ~ 1300)
PF_3	(80 ~ 120)	(6 ~ 9)	(480 ~ 1100)
PF_4	(60 ~ 80)	(6 ~ 9)	(360 ~ 720)
PF_5	(30 ~ 60)	(6 ~ 9)	(180 ~ 540)
PF_6	(15 ~ 30)	(3 ~ 8)	(45 ~ 240)

De acordo com [4], para estabelecer as correlações, as seguintes fórmulas foram utilizadas:

$$|V_{jk}| = \left| \frac{b_{jk} - a_{jk}}{2} \right| \quad (8)$$

$$\rho(v_{fk}, V_{jk}) = \left| v_{fk} - \frac{a_{jk} + b_{jk}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{jk} - a_{jk}) \quad (9)$$

$$\rho(v_{fk}, V'_{jk}) = \left| v_{fk} - \frac{f_{jk} + g_{jk}}{2} \right| - \frac{1}{2}(g_{jk} - f_{jk}) \quad (10)$$

$$K_{jk}(v_{fk}) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_{fk}, V_{jk})}{|V_{jk}|} & \text{se } v_{fk} \in V_{jk} \\ \frac{\rho(v_{fk}, V'_{jk}) - \rho(v_{fk}, V_{jk})}{\rho(v_{fk}, V'_{jk}) - \rho(v_{fk}, V_{jk})} & \text{se } v_{fk} \notin V_{jk} \end{cases} \quad (11)$$

$$\lambda_j = \sum_{k=1}^3 W_{jk} K_{jk} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, 6) \quad (12)$$

$$\lambda'_j = \begin{cases} \frac{\lambda_j}{|\lambda_{max}|} & \text{se } \lambda_j > 0 \\ \frac{\lambda_j}{|-\lambda_{max}|} & \text{se } \lambda_j < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Sendo:

- j – O número de faltas;
- k – A corrente, tensão ou potência;
- f – O tipo de falta (índice);
- W – O peso de cada elemento de k ;
- λ_j – Grau de relação para cada categoria de falta;
- λ'_j – Grau de relação normalizado entre -1 e 1.

Como corrente, tensão e potência tem a mesma significância, o valor dos pesos para cada W_{jk} será de $1/3$. Após o processo, o valor de λ'_j será 1. Sendo assim, a falta

selecionada será PF_j , determinando o tipo de falta que ocorreu. O método converge para uma determinada falta com precisão, mostrando também a probabilidade de outras categorias de falta.

Todo o algoritmo, incluindo as equações e processos utilizados para determinação da função correlação descritas anteriormente, foi implementado no “Simplified C Block” do PSIM®. Como já existia no modelo representado na Figura 8 esse bloco (o de número 4), houve apenas a inclusão da sub-rotina em C correspondente ao método de falha em questão.

Na programação foram consideradas quatro entradas (irradiância e temperatura dos dois painéis) e duas saídas para informar o tipo de falta que cada painel tem.

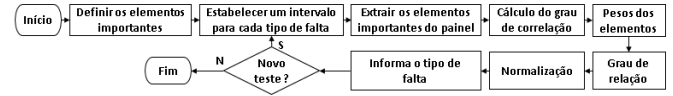


Fig. 7. Fluxograma do método implementado.

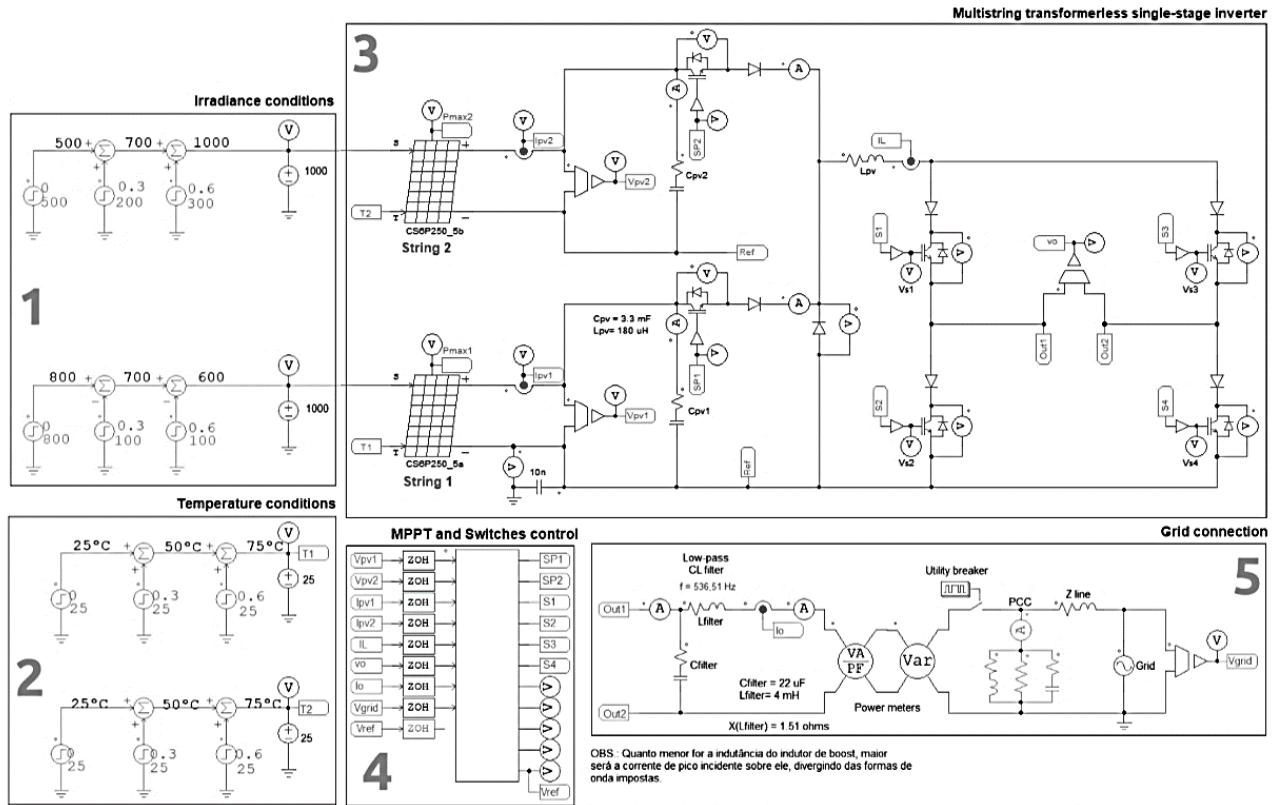


Fig. 8. Montagem da estrutura empregada nos testes do método de falta em questão [7].

IV. RESULTADOS

Em prol da implementação da teoria da extensão foram feitos vários testes aleatórios simulando a estrutura apresentada na Figura 8 com ou sem perdas de células, incluindo variações de irradiância ou temperatura. A Tabela 2 congrega os resultados mais pertinentes para as grandezas produzidas pelos painéis, ou seja, seus valores nominais de corrente, de tensão e de potência em suas saídas. Considerou-se ambas as placas no mesmo ambiente, ou seja, os valores de irradiância e temperatura serão comuns para os painéis (o que permitiria agrega-los em um só módulo solar). Houve variação apenas no número de células para o mesmo número de faltas, pois as duas strings estão em paralelo e são constituídas de painéis do mesmo fabricante. Considerando a atuação integrada das entradas, tem-se um total de 12 ramos com 50 células (6 ramos por string). É importante salientar que se as strings forem consideradas separadamente haverá uma

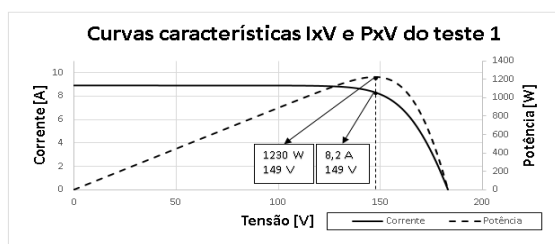
interferência mútua, chegando até a zerar o seu valor de corrente produzida.

Como esperado, o método mostrou bastante precisão, alertando para o número de faltas ocorridas em cada string na saída do bloco em C do programa. A parte a das figuras 9 a 12 mostram o comportamento das curvas características $I \times V$ e $P \times V$ para cada teste simulado, levando em conta as correntes, tensões e potências na saída da string. A parte b, por sua vez, demonstra o comportamento da corrente injetada na rede elétrica em relação à tensão da concessionária para cada tipo de falta.

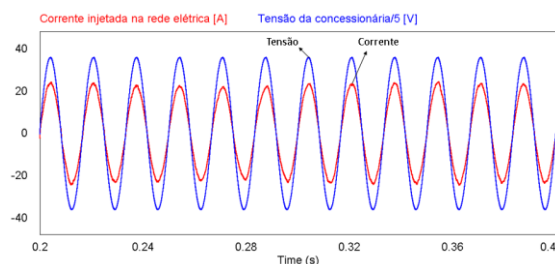
O teste 1 mostra os valores quando não há falta nos painéis das strings, o que obviamente representa a melhor condição operacional possível e pode ser considerado uma referência para os demais testes. No teste 2 foram retiradas 38 células do total, considerando também uma pequena variação nas condições climáticas (temperatura aumentou e irradiância diminuiu), culminando em uma queda de valores se comparado com o teste anterior. No teste 3 foram retiradas 132 células, o que acabou colocando os valores de irradiância e

temperatura mais próximos ao que foi obtido no teste 1, fato também verificado na corrente das *strings*. A tensão, por sua vez, sofreu uma queda significativa, causando uma maior perda de potência que no teste anterior. O teste 4 foi produzido com a retirada de 376 células, uma quantidade grande, também considerando uma elevação tanto de irradiância como de temperatura. Neste caso a corrente e a tensão de saída diminuíram, resultando numa grande perda de potência nas *strings*, além do que esses pequenos valores aumentaram a variação na saída dos painéis.

Em todos os casos, o sistema apontou o número de faltas como o método propôs. Nota-se a semelhança entre todas as curvas características e também a pequena variação nos valores da corrente drenada das *strings* em relação às tensões e potências. Logo, pode-se dizer que estas duas últimas grandezas foram as mais afetadas pelas perdas de células.

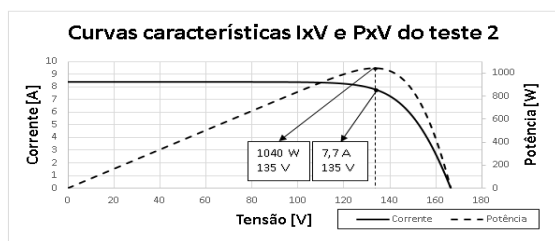


(a)

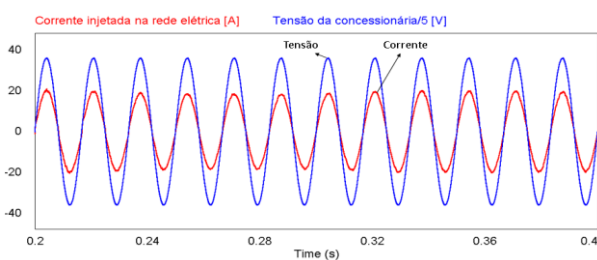


(b)

Fig. 9. Resultados computacionais obtidos para o teste 1. (a) Curvas características produzidas pela string; (b) Comportamento da corrente injetada na rede elétrica em relação à tensão da concessionária.

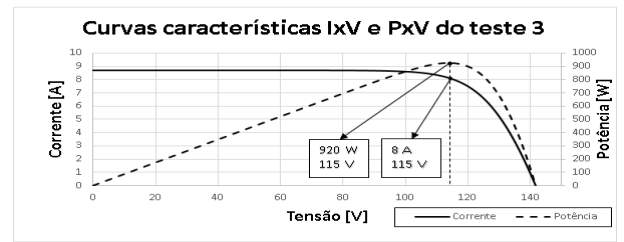


(a)

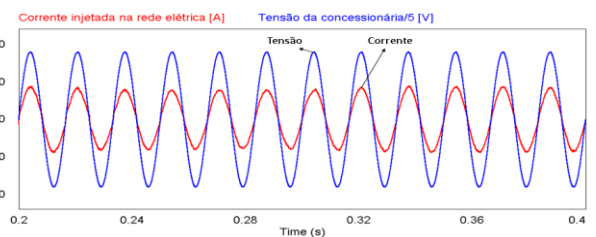


(b)

Fig. 10. Resultados computacionais obtidos para o teste 2. (a) Curvas características produzidas pela string; (b) Comportamento da corrente injetada na rede elétrica em relação à tensão da concessionária.

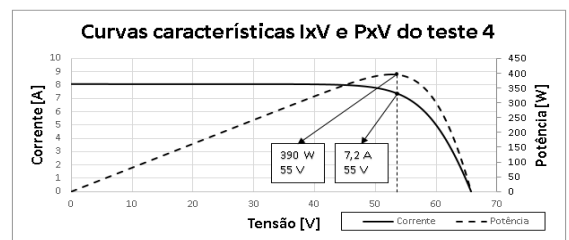


(a)

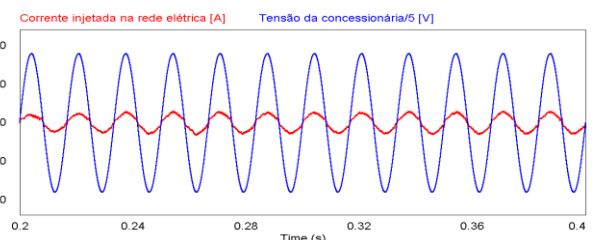


(b)

Fig. 11. Resultados computacionais obtidos para o teste 3. (a) Curvas características produzidas pela string; (b) Comportamento da corrente injetada na rede elétrica em relação à tensão da concessionária.



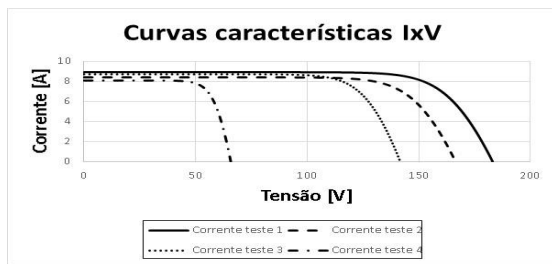
(a)



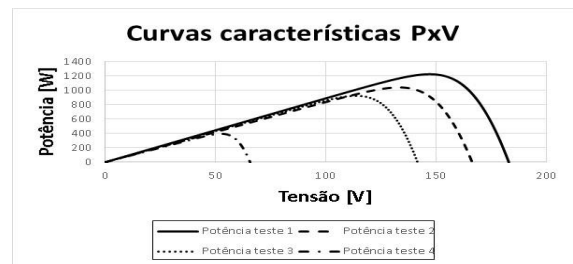
(b)

Fig. 12. Resultados computacionais obtidos para o teste 4. (a) Curvas características produzidas pela string; (b) Comportamento da corrente injetada na rede elétrica em relação à tensão da concessionária.

A Figura 13 mostra a variação comportamental das curvas características de todos os testes. O módulo solar utilizado no programa PSIM tem seus valores já aplicados para a máxima potência, ou seja, os dados obtidos na Tabela II podem ser encontrados nas figuras no ponto máximo da curva da potência.



(a)



(b)

Fig. 13. Reunião das curvas características das strings obtidas em todos os testes. (a) $I \times V$; (b) $P \times V$.

Tabela 2. Resultados de simulação dos testes 1 a 4 em cada string fotovoltaica da planta.

Teste	String	Irradiância [W/m ²]	Temperatura [°C]	Número de células	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Potência total [W]	Tipo de falta
1	1	1000	30	300	148,6	8,2	1224,7	2449,4	PF ₁
	2	1000	30	300	148,6	8,2	1224,7		
2	1	937	38	281	134,7	7,7	1040,9	2081,8	PF ₂
	2	937	38	281	134,7	7,7	1040,9		
3	1	975	32	234	115,4	8	923,4	1846,8	PF ₃
	2	975	32	234	115,4	8	923,4		
4	1	900	40	112	54,5	7,2	391,4	782,8	PF ₅
	2	900	40	112	54,5	7,2	391,4		

V. CONCLUSÃO

O método proposto e aplicado no inversor multistring fotovoltaico de estágio único sem transformador com MPPTs independentes conectado à rede elétrica mostrou grande precisão para os resultados, informando o tipo de falta que cada teste apresentou. As formas de onda da corrente, tensão e potência, tanto na saída dos módulos quanto no ponto de acoplamento com a rede elétrica permitem concluir que a aplicação do método de detecção de falhas não compromete a operação do inversor em termos do seu propósito de injeção de corrente harmônica com baixa distorção harmônica e fator de potência unitário. Apenas quando há grande diferença entre as faltas aplicadas sobre os painéis pode ser, então, verificada uma queda mais representativa de corrente, deixando o painel de maior falta sem gerar energia. Todavia, tal fato não é decorrente da aplicação da teoria da extensão.

Cabe salientar também que a teoria da extensão tem uma ampla variedade de aplicações, inclusive em situações envolvendo combinações de painéis de diferentes fabricantes ou tipos. Nesse caso, para cada um haverá um conjunto de valores determinantes à faixa de ajuste dos elementos importantes (tensão, corrente e potência). O estudo ora apresentado revelou a simplicidade de implementação do método, possibilitando a obtenção de resultados com agilidade e precisão.

REFERÊNCIAS

[1] CRESESB. Atlas solarimétrico do Brasil. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em 26 de jun. 2018.

- [2] ABSOLAR. Casas com energia solar aumentaram 10 vezes em um ano no Brasil. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/casas-com-energia-solar-aumentaram-10-vezes-em-um-ano-no-brasil.html>>. Acesso em 26 de Junho 2018.
- [3] A. Chouder; S. Silvestre. Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis. Elsevier. Energy Conversion and Management, v. 51, p. 1929-1937, 2010.
- [4] Chao K.H.; Ho S.H.; Wang M.H. Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system. Elsevier. Electric Power Systems Research, v. 78, p. 97-105, 2008.
- [5] Ducange P.; Fazzolari M.; Lazzarini B.; Marcelloni F. An intelligent system for detecting faults in photovoltaic fields. 2011 11th international conference on intelligent systems design and applications, p. 1340-1346, 2011.
- [6] Syafaruddin; Karatepe E.; Hiyama T. Controlling of artificial neural network for fault diagnosis of photovoltaic array. 2011 16th international conference on intelligent system application of power systems, p. 1-6, 2011.
- [7] R.L. Rodrigo. Inversor multistring fotovoltaico de estágio único sem transformador com mppts independentes conectado à rede elétrica. Pós-graduação em engenharia elétrica na Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- [8] Manual do usuário PSIM, Powersim Inc. 2001-2003.