

Desempenho de Painel Fotovoltaico Perante Afundamentos de Tensão e Variações de Irradiância e Temperatura

Andrew Vinícius Silva Moreira, Luciano Sales Barros

Departamento de Engenharia Elétrica – DEE
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Natal, Brasil
andrew.vinicius@outlook.com, lsalesbarros@dee.ufrn.br

Resumo – O aumento da utilização de energia solar Fotovoltaica (PV) faz com que a questão do desempenho dos painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica tenha uma grande importância, e dentre os principais estudos, destacam-se o *Low-Voltage Ride-Through* (LVRT) e o *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). O LVRT refere-se a um curto período de tempo em que o sistema pode operar durante uma falta e o MPPT refere-se a busca pelo ponto de máxima potência de acordo com as variáveis de entrada. Nesse trabalho, foi modelada e simulada uma geração distribuída com um sistema fotovoltaico, contendo planta de geração solar fotovoltaica, conversor trifásico e rede de distribuição de energia elétrica. Para analisar a performance dos painéis fotovoltaicos foram simulados afundamentos de tensão no Ponto de Conexão Comum (PCC) e variações de irradiância e temperatura, verificando o quanto essas variações afetam o desempenho.

Palavras-chave – Desempenho de Painel Solar Fotovoltaico, Geração Distribuída, Geração Solar Fotovoltaica, Operação Durante Afundamento de Tensão, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.

I. INTRODUÇÃO

A Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 – Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, que permitiu que a energia ativa injetada por uma Unidade Consumidora (UC) seja cedida à distribuidora local e, posteriormente, compensada com o consumo de energia ativa dessa mesma UC ou doutra de mesma titularidade. Caso a energia gerada seja maior que o consumo, o saldo positivo poderá ser utilizado para abater o consumo na fatura do mês subsequente ou em outro posto tarifário, [1].

Desde a publicação dessa Resolução até outubro de 2015, foram instaladas 1.285 centrais geradoras, sendo 96% proveniente de sistemas fotovoltaicos, [2].

Anteriormente, as fontes de geração eram instaladas longe dos centros consumidores e eram interligadas por meio de redes

de transmissão e subtransmissão de energia elétrica. E, atualmente, a geração distribuída permite a instalação de plantas de geração conectadas diretamente à rede de distribuição, diminuindo as perdas por transmissão, melhorando a qualidade da energia fornecida e aumentando a confiabilidade do suprimento, [3].

O sistema de geração convencional possui fluxo de potência unidirecional, saindo das centrais geradoras para os centros consumidores. Entretanto, o sistema de geração distribuída possui fluxo de potência bidirecional, assim, levando a um menor carregamento da rede, conforme observado na Fig. 1.

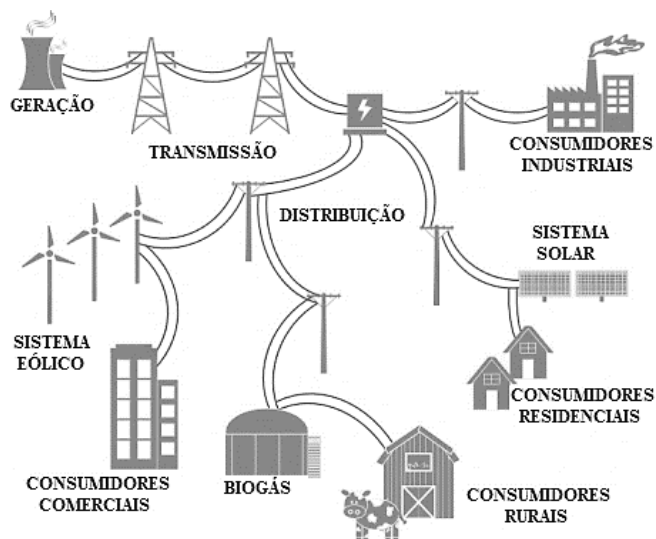


Figura 1. Sistema Elétrico de Potência com Geração Distribuída.

O LVRT é a capacidade de operação durante um curto período de tempo perante a afundamentos de tensão no PCC que são provenientes de faltas na rede ou curtos-circuitos e são regulados por norma. E o MPPT permite o rastreamento do ponto de máxima de potência da Planta PV quando ocorrem variações de irradiância solar e temperatura ambiente.

O presente trabalho tem como objetivo a análise de desempenho da Planta PV perante afundamento de tensão no PCC e de variações de irradiância e temperatura.

Para isso, será modelada e simulada uma rede elétrica composta por sete barras, contendo uma barra infinita e uma barra com uma Planta PV, que possui 5000 painéis. Sendo que, a Planta é conectada à rede através de um conversor de potência trifásico *Voltage Source Rectifier* (VSR).

II. MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem foi desenvolvida segundo as fundamentações teóricas para cada componente do sistema.

A. Modelagem da Rede de Distribuição de Energia Elétrica

Para a modelagem da rede de distribuição foi utilizado o modelo aproximado de segmento de linha, conforme Fig. 2.

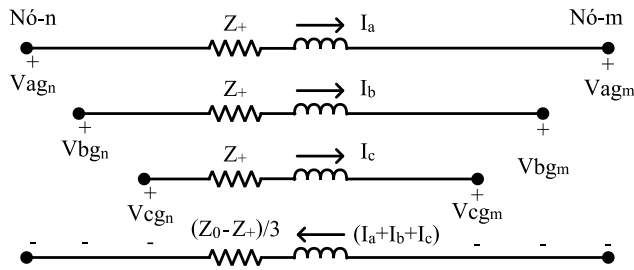


Figura 2. Modelo aproximado de segmento de linha.

Nesse modelo, as impedâncias de sequência positiva e zero são os únicos parâmetros conhecidos. E, para o modelo ser exato, deve ser assumida a transposição da linha, ou seja, a soma das contribuições de indução magnética iguais a zero. Assim, o valor da impedância de sequência positiva será igual à de sequência zero, portanto, a impedância do quarto condutor será nula, [4].

O quarto condutor representa um caminho de retorno para um desequilíbrio de corrente, permitindo assim, a simulação de cargas desbalanceadas e de faltas desequilibradas, aumentando a fidelidade do sistema.

B. Modelagem do Conversor Trifásico

O VSR de onda completa em ponte é necessário para interligar a Planta PV com a rede de distribuição da concessionária, visto que a geração é dada em corrente contínua e a rede encontra-se em corrente alternada, conforme Fig. 3.

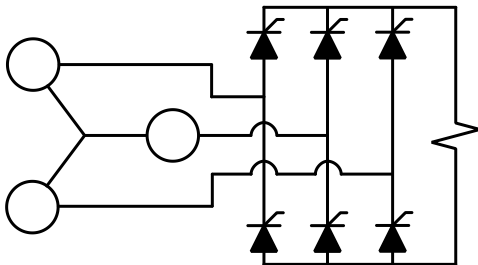


Figura 3. Conversor trifásico de onda completa em ponte.

Nesse VSR faz-se o uso de tiristores como chaves. O tiristor é uma chave semicondutora controlada, semelhante a um diodo, porém, quando polarizado diretamente permite a condução

após um pulso positivo em seu terminal *gate*, obtendo um valor médio de tensão em função desse pulso ou ângulo de disparo, denominado de ângulo α , [5], conforme (1).

$$V_{out} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos(\alpha) \quad (1)$$

Sendo, V_m o valor de pico de tensão de fase da rede.

Assim, é possível controlar o VSR para ajustar o nível de tensão de saída de acordo com o nível de tensão de pico de fase da rede e do ângulo α .

Observando que, para ângulo α igual a zero, o VSR a tiristor comporta-se igualmente a um VSR a diodo. E, para cada valor do ângulo α , tem-se um valor médio de tensão de saída diferente, conforme Fig. 4.

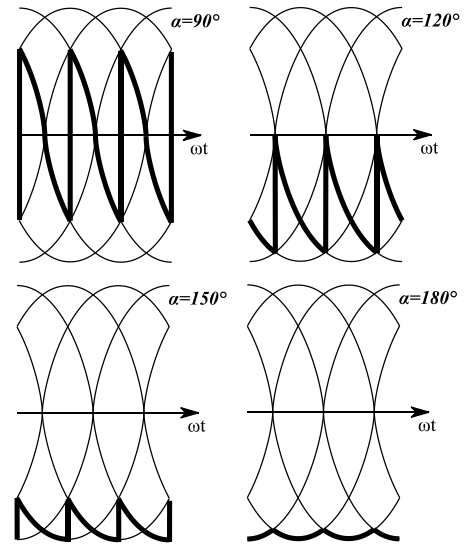


Figura 4. Tensão média com $\alpha = 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ e 180° , respectivamente.

C. Modelagem da Planta Fotovoltaica

Para a modelagem da célula PV foi utilizado o modelo de um diodo, [6], conforme Fig. 5.

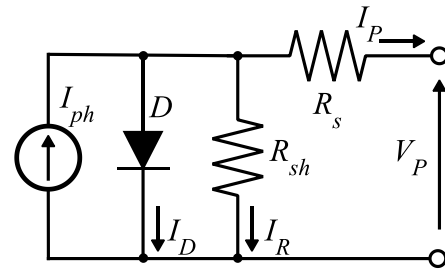


Figura 5. Modelo elétrico do gerador fotovoltaico.

Na qual, a fonte de corrente I_{ph} representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de luminoso incidente sobre a superfície ativa do gerador. Essa corrente é unidirecional e constante para uma dada irradiância e temperatura.

Como o gerador é composto por silício, o mesmo se comportará como um diodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_D , que depende da tensão V_P nos

terminais do gerador. Observa-se uma queda de tensão no circuito até os contatos exteriores, causada por uma resistência parasita que pode ser representada por uma resistência em série R_s . Do mesmo modo, também existe uma corrente de fuga, provocada por outra resistência parasita que pode ser descrita por uma resistência em paralelo R_{sh} , [7].

A corrente I_P é definida conforme (2).

$$I_P = I_{ph} - I_D - I_R \quad (2)$$

E é decomposta em (3), (4) e (5).

$$I_{ph} = \frac{S}{S_r} (I_{sc} + K_i (T - T_r)) \quad (3)$$

$$I_D = I_o \left(e^{\left(\frac{V_P + R_s I_P}{m V_T} \right)} - 1 \right) \quad (4)$$

$$I_R = \frac{V_P + R_s I_P}{R_{sh}} \quad (5)$$

Onde, I_o e T são definidos como (6) e (7), respectivamente.

$$I_o = I_{or} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left(\frac{\varepsilon_g}{m} \left(\frac{1}{V_{Tr}} - \frac{1}{V_T} \right) \right)} \quad (6)$$

$$T = T_a + S \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (7)$$

E, I_{or} e ε_g são definidos como (8) e (9), respectivamente.

$$I_{or} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{V_{oc}}{m V_{Tr}} \right)} - 1} \quad (8)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{gr} - 7,02 \cdot 10^{-4} \left(\frac{T^2}{1108 + T} \right) \quad (9)$$

Onde, S é a irradiância; I_{sc} é a corrente de curto-circuito; K_i é o coeficiente de corrente de curto-circuito; T é a temperatura de trabalho da célula em Kelvin (K); I_o é a corrente reversa máxima de saturação do diodo; V_P é a tensão nos terminais do gerador; m é o fator de idealidade do diodo; R_s é a resistência parasita em série; R_{sh} é resistência parasita em paralelo; V_T é o potencial térmico dado por $V_T = kT/q$, onde k é constante de Boltzman ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) e q é a carga do elétron ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C); V_{oc} é a tensão de circuito aberto; ε_g é o gap de energia do silício; T_a é a temperatura ambiente; $NOCT$ (Nominal Operating Cell Temperature) é a condição de operação para temperatura ambiente de 20°C, irradiância solar de 800 W/m² e velocidade do vento de 1 m/s². Em que, os demais com índice “r” são parâmetros de referência.

As equações (2) – (9) são referentes a uma célula solar PV. O painel é um arranjo de células ligadas em série. Assim, V_{oc} é proporcional ao número de células ligadas em série; R_s e R_{sh} são proporcionais ao quociente de células em série por células em paralelo, assim como para painéis. A Planta PV é uma

combinação série e paralelo dos painéis, onde V_P é proporcional ao número de painéis ligados em série; e I_{ph} e I_D são proporcionais ao número de painéis ligados em paralelo.

III. SIMULAÇÕES DO SISTEMA

Com base nas modelagens, as simulações foram desenvolvidas no *Simulink* do *MATLAB* R2015b [8].

A. Simulação da Rede de Distribuição de Energia Elétrica

A rede simulada foi adaptada, [9], onde na Barra 2, tem-se a Planta PV, conforme Fig. 6.

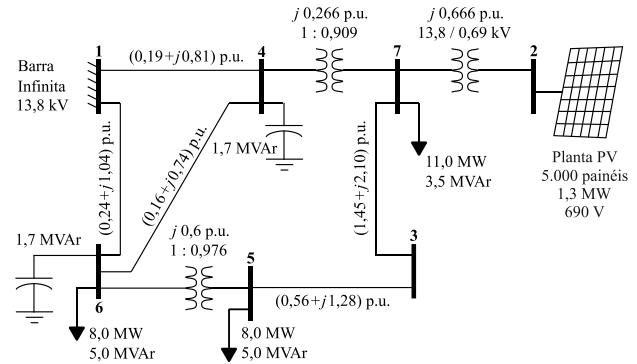


Figura 6. Rede de Distribuição de Energia Elétrica simulada.

De acordo com as condições locais e as perdas por conversão, a Planta PV fornecerá a rede uma potência trifásica ativa média de 1,045 MW, conforme Fig. 7.

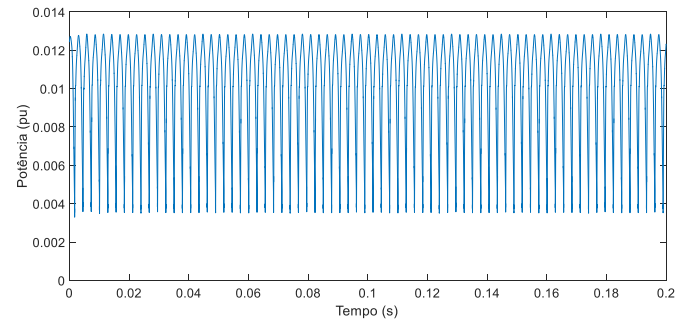


Figura 7. Potência Trifásica Ativa Injetada pela Barra 2.

Essa potência trifásica ativa é inferior devido as condições locais serem diferentes das condições *Standard Test Conditions* (STC).

B. Simulação do Conversor Trifásico

Para o funcionamento do conversor trifásico é necessário que haja a geração de pulsos positivos numa sequência apropriada para cada tiristor, de acordo com o ângulo da rede elétrica (ωt) e do ângulo de disparo (α). Para a simulação, foi utilizada a transformada de Clarke invariante em potência, mais conhecida como transformação *alpha-beta* (α - β), conforme (10).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

A transformação obtém a representação num espaço bidimensional com α no eixo das abscissas e β no eixo das ordenadas, que pelo o arco tangente do quociente β por α é possível encontrar o valor do ângulo ωt , que oscilará de 0 à 2π rad, conforme Fig. 8.

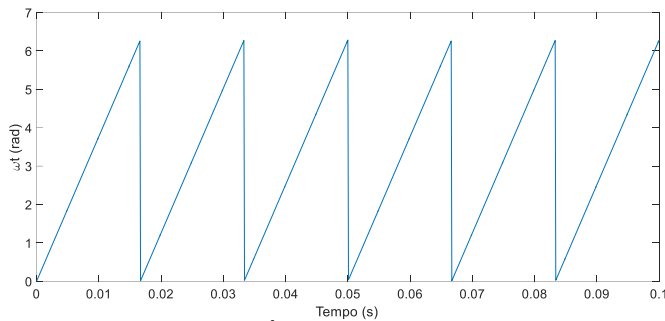


Figura 8. Ângulo da Rede Trifásica.

Como o VSR é um circuito chaveado, sua tensão de saída possui oscilações, devendo considerar o valor médio de tensão. E, para cada ângulo de disparo α , tem-se um valor médio de tensão de saída diferente, que foi simulado conforme Fig. 9.

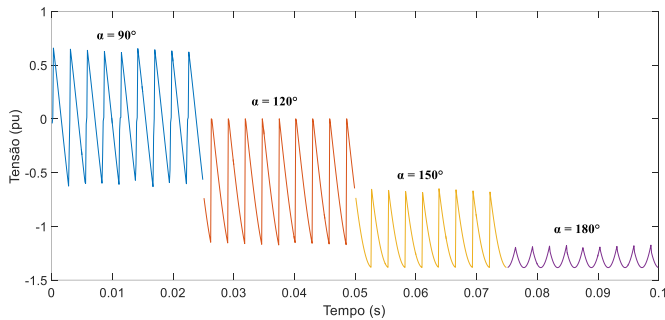


Figura 9. Tensão retificada com $\alpha = 90^\circ$, 120° , 150° e 180° , respectivamente.

C. Simulação da Planta Fotovoltaica

Para a simulação da Planta PV, foi realizada a subtração das correntes I_{ph} com I_D , injetando-a no circuito elétrico através de uma fonte de corrente controlada e ligada às resistências parasitas. O painel simulado foi o da marca *Canadian Solar*, modelo CS6P-260, de 260 W, [10], e as características elétricas são apresentadas conforme Tabela I.

TABELA I. TABELA DAS CARACTERÍSTICAS DO PAINEL CS6P

Dados Elétricos CS6P em STC ^a	260P
Potência Máxima Nominal (P_{max})	260 W
Tensão de Potência Máxima (V_{mp})	30,4 V
Corrente de Potência Máxima (I_{mp})	8,56 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	37,5 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	9,12 A
Eficiência do Módulo	16,16%
Temperatura de Trabalho	-40°C ~ +85°C
Tesão Máxima do Sistema	1000 V

a. Irradiância de 1000W/m² e Temperatura de Célula de 25°C.

As curvas características foram geradas, comparadas e adequadas com as curvas características disponíveis no *datasheet* do painel para ajustar os valores das resistências parasitas do painel.

Assim, a curva característica I-V obtida para as condições locais pode ser observada, conforme Fig. 10.

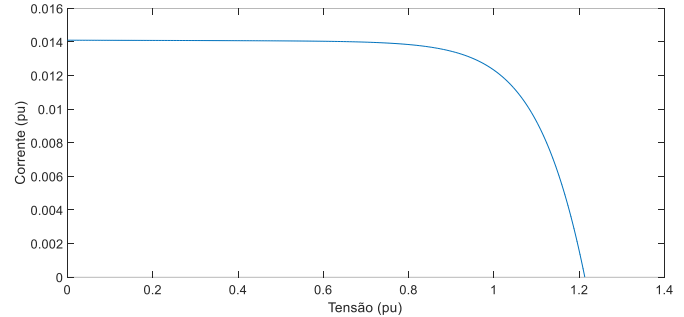


Figura 10. Curva característica I-V.

E a curva característica P-V obtida para as condições locais pode ser observada, conforme Fig. 11.

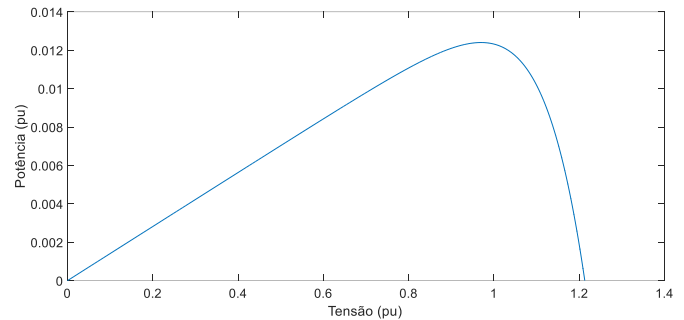


Figura 11. Curva característica P-V.

As curvas características são funções do nível de tensão, que por sua vez, é função dos parâmetros de entrada, e para as condições locais, a potência máxima fornecida é 1,24 MW.

IV. RESULTADOS

O sistema modelado e simulado foi, primeiramente, submetido a afundamentos de tensão no PCC. Em seguida, o sistema foi submetido a variações dos parâmetros de entrada, ou seja, irradiância e temperatura.

Neste trabalho, os resultados foram obtidos considerando como dados de entrada os valores médios dos parâmetros da cidade de Natal, RN, ou seja, Irradiância Solar Incidente de 1100 W/m² e Temperatura Ambiente de 26°C.

A. Desempenho Perante Afundamentos de Tensão no PCC

Nessa etapa, foram simulados afundamentos de tensão de curta duração resultantes de curtos-circuitos no PCC. Para isso, foi simulado um curto-circuito com afundamento de 65% da magnitude da tensão de fase da rede.

No primeiro momento, foi realizado um curto-circuito trifásico e, no segundo momento, foi realizado um curto-circuito monofásico, para a verificação da dependência do desempenho da Planta PV perante os curtos-circuitos e os seus tipos, conforme Fig. 12 – 19.

1) Curto-Circuito Trifásico

a) Tensão de Fase da Rede no PCC

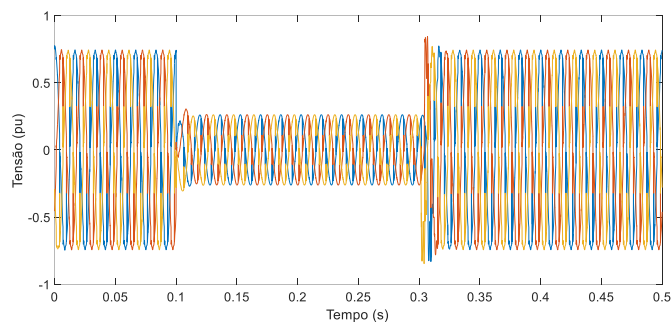


Figura 12. Tensão de fase da rede trifásica com curto-circuito trifásico.

b) Tensão na Planta PV

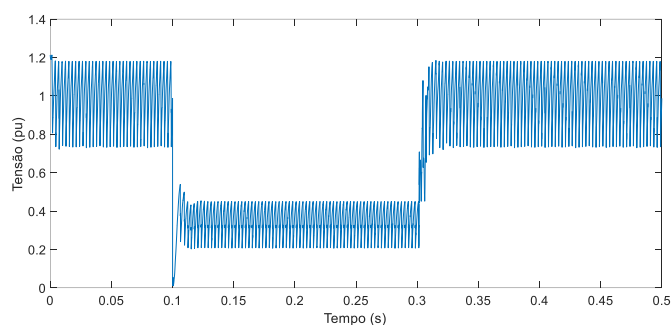


Figura 13. Curva de tensão com curto-circuito trifásico na Planta PV.

c) Corrente na Planta PV

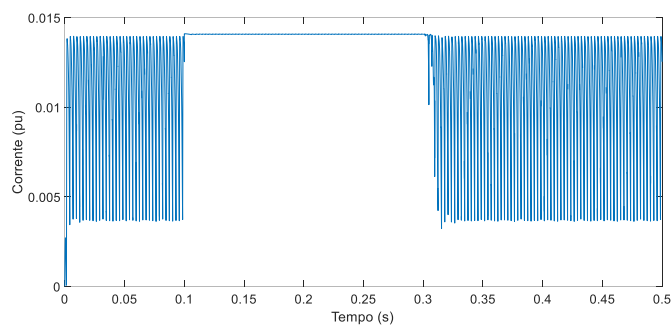


Figura 14. Curva de corrente com curto-circuito trifásico na Planta PV.

d) Potência na Planta PV

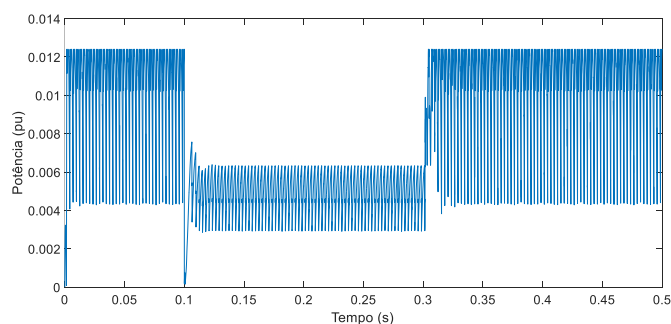


Figura 15. Curva de potência com curto-circuito trifásico na Planta PV.

2) Curto-Circuito Monofásico

a) Tensão de Fase da Rede no PCC

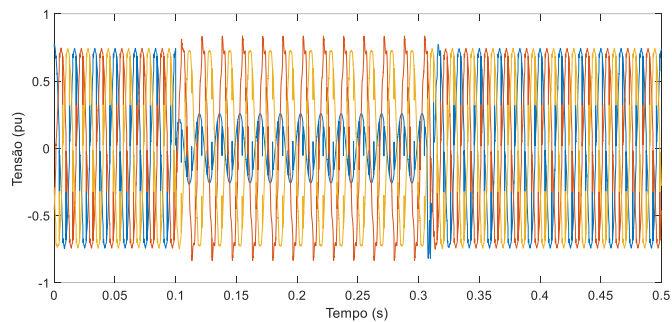


Figura 16. Tensão de fase da rede trifásica com curto-circuito monofásico.

b) Tensão na Planta PV

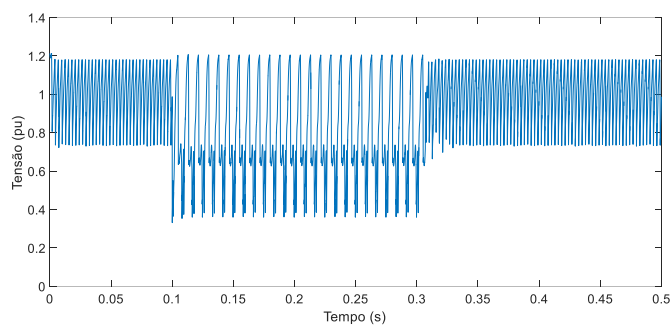


Figura 17. Curva de tensão com curto-circuito monofásico na Planta PV.

c) Corrente na Planta PV

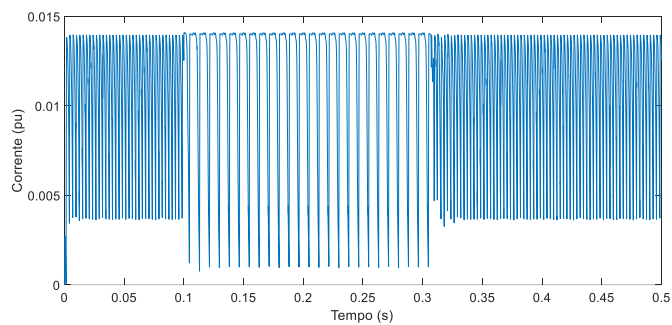


Figura 18. Curva de corrente com curto-circuito monofásico na Planta PV.

d) Potência na Planta PV

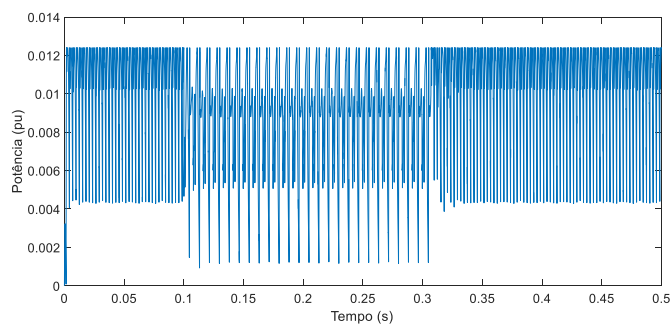


Figura 19. Curva de potência com curto-circuito monofásico na Planta PV.

O impacto do curto-circuito trifásico é maior se comparado com o curto-circuito monofásico, isso ocorre, pois, o conversor de potência utilizado ser um dispositivo conversor trifásico. Outra observação é que o curto-circuito monofásico oscila mais, pois se trata de um curto-circuito desequilibrado, diferente do curto-circuito trifásico que, é um curto-circuito equilibrado, sendo assim, menos susceptível às oscilações.

B. Desempenho Perante Variações de Irradiância Solar e Temperatura Ambiente

Foram realizadas variações de Irradiância Solar Incidente partindo de 200 W/m² até 1500 W/m² com acréscimo de 100 em 100 W/m² para verificar a dependência do desempenho perante as variações, considerando em condições STC, conforme Fig. 20.

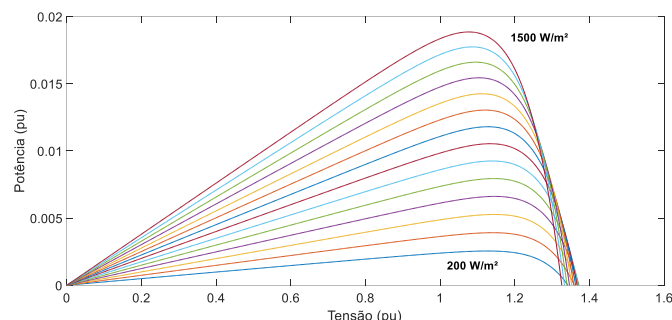


Figura 20. Influência da variação da Irradiância Solar na curva P-V.

Assim, a potência entregue pela Planta PV é diretamente proporcional ao aumento do módulo da Irradiância Solar.

Foram também realizadas variações de Temperatura Ambiente partindo de 5 °C até 70 °C com acréscimo de 5 em 5 °C para verificar a dependência do desempenho perante as variações, considerando em condições STC, conforme Fig. 21.

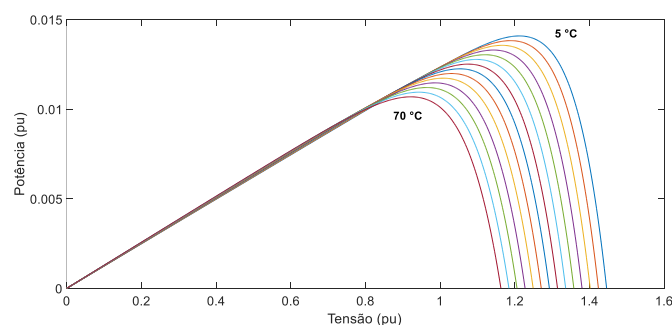


Figura 21. Influência da variação da Temperatura Ambiente na curva P-V.

E assim, a potência entregue pela Planta PV é inversamente proporcional ao aumento do módulo da Temperatura Ambiente. Portanto, o ponto de máxima potência é função da Irradiância Solar e da Temperatura Ambiente, que para cada valor de

Irradiância e Temperatura, tem-se um novo ponto de máxima potência.

Propõem-se para trabalhos futuros, a implementação do controle do ângulo de disparo, a fim de realizar o LVRT e o MPPT, obtendo um sistema que se ajusta para o melhor desempenho possível da Planta PV.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho permite verificar a sensibilidade de uma Planta PV perante os afundamentos de tensão no PCC e as variações de irradiância e temperatura. Pois, as variações aplicadas na simulação alteram o ponto de máxima potência, diminuindo a potência entregue pela Planta PV. Espera-se que essas perdas de desempenho por afundamentos de tensão e variações de irradiância e temperatura sejam compensadas através de um controle de LVRT e MPPT.

APÊNDICE

A. Valores Base

$S_{BASE} = 100 \text{ MVA}$; $V_{BASE} = 0,69 \text{ kV}$ (barra 2); $V_{BASE} = 13,8 \text{ kV}$ (para demais barras).

B. Parâmetros de Planta PV

$S = 1000 \text{ W/m}^2$; $T_A = 299\text{K}$; $N_{ps} = 25$ painéis; $N_{pp} = 200$ painéis; $R_s = 1,3127 \text{ pu}$; $R_{sh} = 15,753 \text{ pu}$; $V_{mp} = 0,9705 \text{ pu}$; $I_{mp} = 0,0128 \text{ pu}$; $P_{mp} = 0,0124 \text{ pu}$.

REFERÊNCIAS

- [1] Resolução Normativa Nº 482, ANEEL, Brasília, DF, Abr. 2012 [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>
- [2] (2015, Out.). ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída. ANEEL, Brasília, DF. [Online]. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90
- [3] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, 2ª ed. Chicago: CRC Press, 2014, págs. 21-30.
- [4] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, 3ª ed. Flórida: CRC Press, págs. 136 -140.
- [5] A. Ahmed, *Eletrônica de Potência*, J. A. Martino, Revisão técnica. São Paulo: Prentice Hall, 2001, págs. 268-293.
- [6] (2015, Out.). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. GTES - CRESESB, Rio de Janeiro, RJ. [Online]. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf
- [7] M. A. Vitorino, "Otimização do Processamento da Energia em Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico e Conversão Monofásica", de doutorado, Coord. de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2012.
- [8] MATLAB version 2015b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [9] L. S. Barros, W. S. Mota, L. G. Q. S. Junior, e P. S. Oliveira, "DFIG Rotor Side Control Through Gain-Scheduling Designed By Genetic Algorithm," IEEE T&D Latin American, Montevideu, 2012.
- [10] (2015, Ago.). CS6P-260. Canadian, Ontario. [Online]. Disponível em: http://www.canadiansolar.com/fileadmin/user_upload/downloads/datasheets/v5.3/Canadian_Solar-Datasheet-CS6PPv5.3_en.pdf