

MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS DE CONTROLE DE MPPT EMPREGADAS NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

P.F. Pereira, A.C. Souza, I.N. Santos

Núcleo de Redes Elétricas Inteligentes e Qualidade de Energia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG
priscila2.1@outlook.com; arthur_costasouza@hotmail.com; ivan@ufu.br

Resumo – Sabe-se que, dentre as fontes renováveis de energia, a fotovoltaica tem sido considerada uma das principais opções, haja vista a mesma ser livre, abundante, limpa e globalmente distribuída. Neste sentido, o presente trabalho pretende explorar essa técnica de geração de energia elétrica, apresentando uma discussão específica correlata aos sistemas de maximização da extração de energia dos painéis fotovoltaicos (MPPT). Assim sendo, serão realizados estudos de comparativos entre a lógica de funcionamento, tempo de resposta e eficiência, das duas principais estratégias de MPPT, a saber, Método Perturba e Observa e Metodologia da Condutância Incremental.

Palavras-Chave– geração distribuída; sistema de geração fotovoltaica; modelagem; MPPT.

MODELING AND PERFORMANCE EVALUATION OF MAIN TECHNIQUES EMPLOYED MPPT CONTROL IN PHOTOVOLTAIC GENERATION

Abstract – It is known that among the renewable energy sources, the photovoltaic energy has been considered one of the main options, given it is free, abundant, clean and globally distributed. In this sense, this paper will explore this technique of power generation, presenting a specific discussion related to maximizing the energy extraction of the photovoltaic panels (MPPT). Therefore, there will be comparative studies between the operating logic, response time and efficiency, of the two main strategies of MPPT, namely Perturb and Observe Method and Methodology of Incremental Conductance.

Keywords: distributed generation; photovoltaic generation system; modeling; MPPT.

I. INTRODUÇÃO

Verifica-se, na atualidade, um crescente ritmo de aumento do consumo de energias em todo o mundo, sendo esta proveniente, em sua grande fatia, de recursos naturais não

renováveis. Assim, a matriz energética global tornou-se extremamente poluente, dependente de recursos não renováveis e com um rendimento questionável. Dentre os recursos não renováveis presentes nesta nova composição da matriz mundial destacam-se, em sobremaneira, os combustíveis fósseis, petróleo e carvão mineral.

No final da década de 70, a emergência do movimento ambientalista e a crise do petróleo fizeram dos recursos naturais, da energia e do meio ambiente em geral, um tema de ordem econômica, social e política, de suma importância. [1]. Deste modo, alguns avanços têm sido alcançados por meio de pesquisas e desenvolvimentos de projetos voltados à inovação tecnológica de novas fontes de energia, tais como: aquelas provenientes de energia do sol, marés, biomassa, ventos e geotermia.

O Brasil é detentor natural de um grande potencial energético, apresentando-se, de acordo com a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), com 79,3% da oferta interna de eletricidade proveniente de fontes renováveis, as quais são resultantes da soma dos montantes referentes à produção nacional e as importações [2]. Todavia, é conhecido que a geração hídrica de energia elétrica tem se apresentado, nos dias atuais, como um potencial degradador do ecossistema. Portanto, fontes alternativas, tais como a fotovoltaica e a eólica têm ganhado destaque e importância no cenário atual de discussão da matriz energética brasileira.

Neste contexto, o presente trabalho pretende explorar a geração solar fotovoltaica de energia elétrica, a qual tem tido um crescimento vertiginoso em todas as partes do país, sobretudo devido ao incentivo à geração distribuída de energia, encarecimento do kWh e barateamento das tecnologias de geração. Assim sendo, o presente trabalho está voltado a uma discussão específica correlata aos sistemas de maximização da extração de energia dos módulos fotovoltaicos. Tal procedimento encontra-se neste artigo detalhado e é conhecido como controle de Ponto de Máxima Potência, sigla em inglês MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

II. PRINCÍPIO GERAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Na Figura 1 tem-se esquematizado um arranjo típico empregado na geração fotovoltaica de acoplamento direto à rede da concessionária. As principais etapas de transformação são: painéis fotovoltaicos, conversor *boost* CC/CC para realização do MPPT, controle de MPPT, inversor CC/CA de conexão com a rede da concessionária e, respectivo, controle de inversão de tensão (VSI).



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

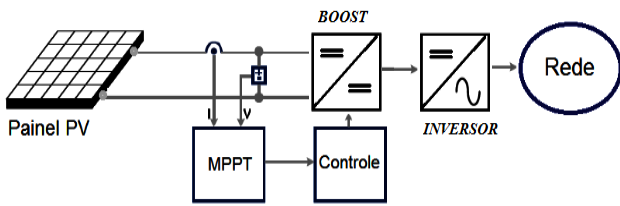


Fig. 1. Diagrama de blocos geração fotovoltaica.

Focando mais especificamente no objeto de estudo e análise deste trabalho, qual seja: o controlador de MPPT tem-se na Figura 2, um diagrama elétrico genérico do conversor empregado em tal processo, o conversor *boost*.

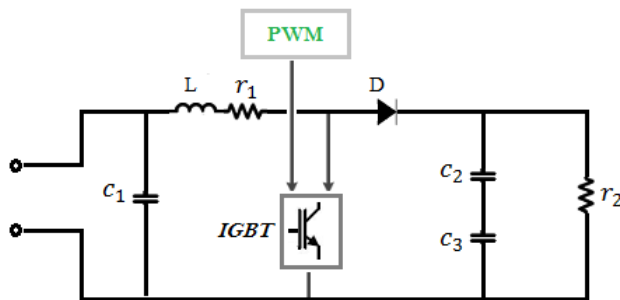


Fig. 2. Diagrama de blocos do conversor *boost*.

Este conversor é constituído basicamente por uma chave IGBT paralela, um indutor no ramo de entrada e um diodo no circuito de saída. O controle do IGBT é advindo de um sinal PWM de um bloco específico, o qual é responsável pelo rastreamento do máximo ponto de potência que pode ser extraída do painel fotovoltaico. As distintas estratégias serão esmiuçadas na próxima seção, pois no presente subtópico o objetivo é apenas fornecer uma visão geral do processo de geração solar fotovoltaica.

III. PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS PARA EXTRAÇÃO DA MÁXIMA POTÊNCIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO (MPPT)

Na literatura científica, verificam-se distintas técnicas para o rastreamento do ponto de máxima potência, sendo este dependente, em todos os procedimentos de extração de máxima potência, das variações de irradiação ocorridas durante o dia. O desempenho dinâmico de algoritmos seguidores do ponto de máxima potência pode ser simulado e, conseqüentemente, avaliado, por meio de modelagens matemáticas dos painéis solares *PV* implementados em softwares.

Tendo em vista os arranjos comercialmente encontrados, na atualidade, dos sistemas fotovoltaicos [3], pode-se afirmar que as duas principais estratégias de controle de MPPT são:

- Perturba e Observa (P&O);
- Condutância Incremental.

Não obstante a esta relação apresentada, vale destacar que há, ainda, outros procedimentos nesta mesma linha, a saber [3-5]: razão cíclica fixa; tensão constante; perturba e observa moderno; perturba e observa modificado; estima perturba e perturba; condutância incremental modificada; oscilação do

sistema; correlação de *ripple*; método beta e método da temperatura. Porém, as mesmas não serão aqui abordadas pelo fato de se tratarem de especificidades dos métodos selecionados ou, ainda, por serem pouco empregados na prática.

A. Controle P&O

Esta é uma das técnicas mais utilizadas devido à sua fácil implementação, visto que possui uma estrutura simples de controle e necessita de poucos parâmetros (tensão e corrente dos painéis fotovoltaicos) para realizar o *MPPT*. Este método consiste em perturbar periodicamente a tensão do painel (*V*) fotovoltaico em um determinado sentido (incrementando ou decrementando uma constante de ΔV), dependendo das variações de potência e tensão resultantes. As Equações 1 e 2 demonstram estas variações.

$$\Delta V = V_t - V_{(t-\Delta t)} \quad (1)$$

$$\Delta P = P_t - P_{(t-\Delta t)} \quad (2)$$

Se as variações de potência e tensão forem maiores que zero ou ambas menores que zero, haverá um incremento da tensão do painel, ou seja, o algoritmo rastreamento estará em uma posição à esquerda do ponto de máxima potência (MPP). Caso contrário, o rastreamento estará à direita do MPP, ou seja, quando a variação de potência for maior que zero e a variação de tensão menor que zero, ou vice-versa. Para uma melhor visualização deste procedimento, tem-se na Figura 3 um típico gráfico de potência de um painel fotovoltaico em função da tensão gerada.

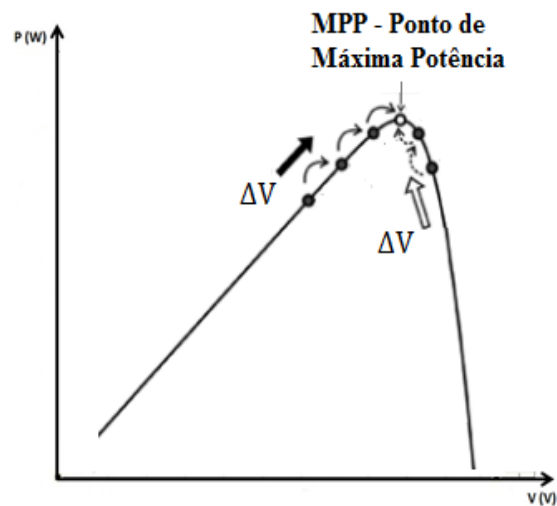


Fig. 3. Curva ilustrativa de um típico comportamento de potência gerada por um painel fotovoltaico em função da tensão.

As Equações 3 e 4 sintetizam este processo.

$$\begin{cases} (\Delta V > 0 \text{ e } \Delta P > 0), \\ (\Delta V < 0 \text{ e } \Delta P < 0), \end{cases} \quad \text{Rastreamento à esquerda do MPP} \quad (3)$$

$$\begin{cases} (\Delta V > 0 \text{ e } \Delta P < 0), \\ (\Delta V < 0 \text{ e } \Delta P > 0), \end{cases} \quad \text{Rastreamento à direita do MPP} \quad (4)$$

B. Controle Condutância Incremental

O método de condutância incremental é baseado no princípio de que o ponto de máxima potência pode ser alcançado na comparação entre as condutâncias, a saber, instantânea e incremental do arranjo. Desta forma, as medidas de corrente e tensão são utilizadas para a obtenção da derivada da potência em relação à tensão. A Equação 5 elucida tal técnica.

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial(V * I)}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} \quad (5)$$

Onde:

P é a potência, em Watts (W);

V é tensão, em Volts (V);

I é corrente, em Ampères (A).

Procedendo-se a divisão de ambos os lados da equação anterior pela tensão, chega-se à Equação 6.

$$\frac{1}{V} \frac{\partial P}{\partial V} = \frac{I}{V} + \frac{\partial I}{\partial V} \quad (6)$$

Tendo em vista que um dos pilares de fundamentação, deste método, são as premissas de inclinação da curva de potência do arranjo PV em relação à tensão, a Equação 7 as torna visível.

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial V} = 0, & \text{rastreamento no MPP} \\ \frac{\partial P}{\partial V} > 0, & \text{rastreamento à esquerda do MPP} \\ \frac{\partial P}{\partial V} < 0, & \text{rastreamento à direita do MPP} \end{cases} \quad (7)$$

Por outro lado, esta mesma relação pode ser feita em função da corrente convertida pelo painel, sendo o resultado evidenciado pela Equação 8.

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial V} = -I/V, & \text{rastreamento no MPP} \\ \frac{\partial I}{\partial V} > -I/V, & \text{rastreamento à esquerda do MPP} \\ \frac{\partial I}{\partial V} < -I/V, & \text{rastreamento à direita do MPP} \end{cases} \quad (8)$$

No presente trabalho será utilizado o simulador *Simulink* do *Matlab*[®], o qual foi escolhido por ser uma ferramenta interativa, baseada em diagramas de blocos, voltada para a modelagem, análise e controle de sistemas.

Vale ressaltar que esta metodologia, Condutância Incremental, já se encontra inserido a nos exemplos do *Simulink/Matlab*[®]. Contudo, pelo fato da técnica de MPPT Perturba e Observa não estar disponibilizada neste mesmo

software, faz-se necessária à implementação da mesma, a qual é detalhada na secção subsequente.

IV. IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA P&O DE MPPT EM SIMULADOR NO DOMÍNIO DO TEMPO

A implementação da estratégia de controle P&O no software *Matlab*[®]/*Simulink* foi realizada em consonância com a teoria explanada na seção anterior deste informe técnico. A Figura 4 apresenta uma visão geral de tal controle implementado, sendo os dados de entrada a tensão advinda do arranjo de módulos fotovoltaicos e a corrente de linha que flui do mesmo em direção ao sistema de inversão, enquanto a saída (para a chave IGBT do conversor *boost*) é um sinal de PWM (*Pulse Width Modulation*).

Da análise desta figura, pode-se verificar o uso de um controlador PID (*Proportional Integral Derivative*) após um dispositivo somador, o qual é realimentado por informações da tensão do sistema de modo a garantir a existência de uma variação adequada da mesma, ou seja, que o erro do comparador seja eliminado de forma rápida sem instabilidades e que a tensão de referência imposta (V_{ref}) seja alcançada.

Na sequência, na Figura 5, tem-se esmiuçado o sistema de cálculo de tensão de referência (V_{ref}). Esta tensão é aquela que garante que arranjo fotovoltaico opere na máxima potência. Em outras palavras, esta é a tensão final com incremento ou decremento, devido à imposição de uma variação de tensão pela lógica do algoritmo P&O. Por fim, o circuito presente na Figura 9 representa o arranjo da fotovoltaica de forma mais completa, excetuando-se apenas a ilustração do conversor DC/AC devido a não importância deste no estudo em condução que visa tão somente à avaliação dos métodos de MPPT.

Na Figura 6 percebe-se o conversor boost recebendo um sinal de controle de MPPT e também o arranjo de painéis solares. Tal painel foi retirado de um exemplo pré-estabelecido no *Matlab/Simulink*.

É importante destacar que o controlador P&O também se encontra esquematizado no *Matlab*, porém em arquivo “.m” e não propriamente no *Simulink* como fora implementado.

V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS DOIS PRINCIPAIS PROCESSOS DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA VIA SIMULAÇÃO

A avaliação de desempenho, ora pautada, será realizada por meio da implementação de um sistema de geração fotovoltaico

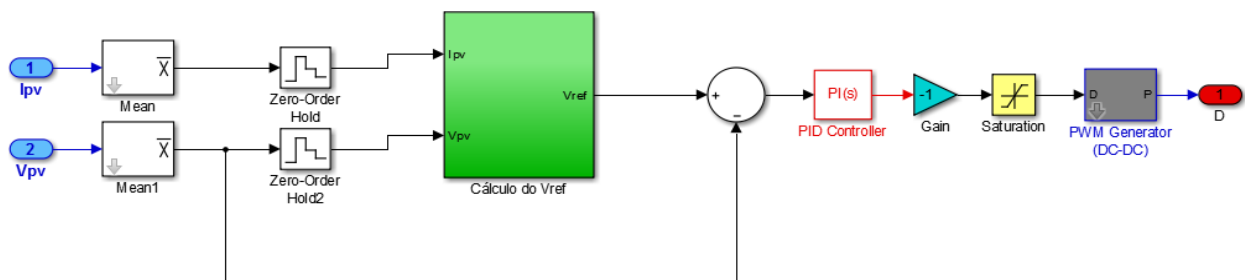


Fig. 4. Representação esquemática bloco MPPT – P&O no simulador.

hipotético funcionando segundo as condições que são na sequência enumeradas:

- Caso 01: geração fotovoltaica sem controle MPPT;
- Caso 02: sistema fotovoltaico com adoção de controle MPPT do tipo Perturba e Observa (P&O);
- Caso 03: planta fotovoltaica com controle de MPPT do tipo Condutância Incremental.

Vale ressaltar que para os três casos estudados, o sistema de geração fotovoltaico hipotético implementado foi o mesmo e com o emprego de mesmas condições ambientais, conforme será detalhado na sequência.

Vale mais uma vez justificar que os dois métodos de controle de MPPT escolhidos para este estudo de caso, foram assim selecionados devido ao fato de serem os mais amplamente empregados atualmente em arranjos comerciais.

A. Sistema fotovoltaico hipotético adotado na análise de desempenho

O arranjo fotovoltaico (PV) utilizado nesta representação computacional, está inserido nos exemplos do

matlab®/simulink, tendo seus parâmetros destacados na Tabela I.

TABELA I. PARÂMETROS ELÉTRICOS DO ARRANJO PV

Arranjo PV	330 - Módulos		Circuito Aberto	Tensão [V]	Corrente [A]
	Série	Paralelo		64,2	
	5	66	Curto Circuito		5,96
Potência [kW]	Módulo	Arranjo PV	Ponto máxima Potência	54,7	5,58
	0,305	100			

Vale ressaltar que a potência total do arranjo PV apresentada acima, é alcançada para condições ideais de funcionamento do sistema e que os módulos solares utilizados, foram caracterizados de acordo com o modelo *SunPower SPR - 305*.

Acoplado à saída do arranjo solar encontra-se o conversor *boost*, o qual teve sua topologia de conexões ilustrada em seções anteriores deste artigo (Figura 3). Os parâmetros elétricos do conversor, os quais são necessários à implementação computacional, são aqueles destacados na Tabela II.

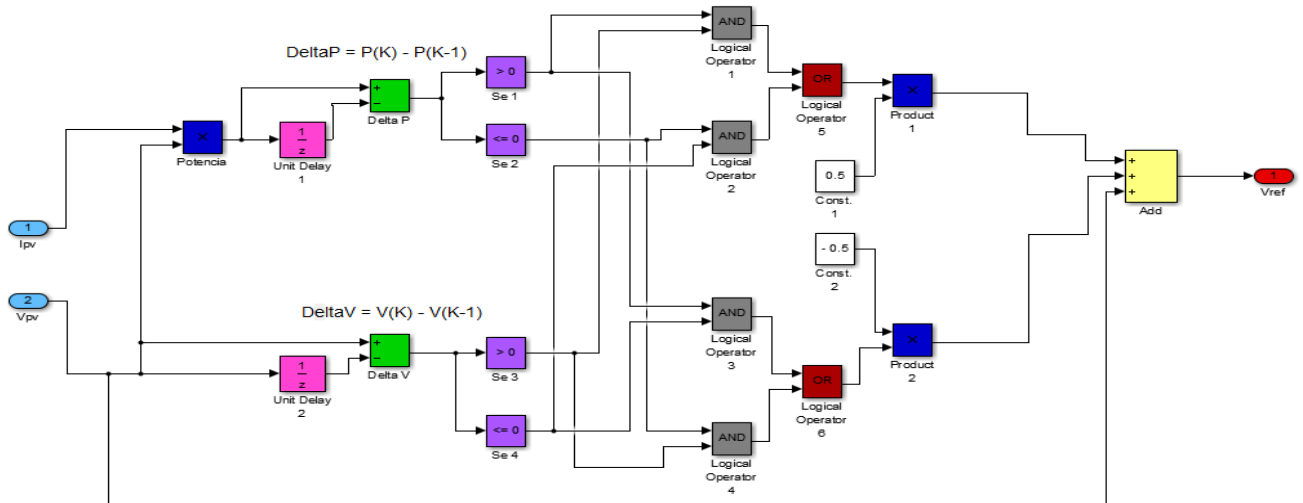


Fig. 5. Representação esquemática para o cálculo de V_{ref} .

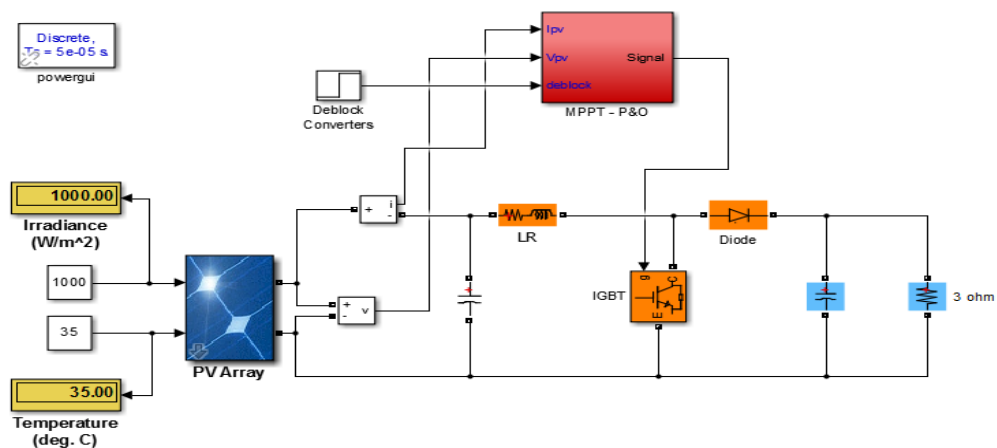


Fig. 6. Arranjo de geração fotovoltaica com o emprego do Método de Controle de MPPT P&O.

TABELA II. PARÂMETROS ELÉTRICOS DO CONVERSOR *BOOST*

Parâmetro	Valor
L	5 mH
C_1	100 μF
C_2	12000 μF
C_3	12000 μF
D	0,005 Ω
r_1	0,005 Ω
r_1	3 Ω
$F_{chaveamento}$	3khz

Neste esquemático mostrado na Figura 2, em verdade, r_2 é a resistência representativa da carga em que a potência elétrica é injetada. Neste estudo, tal carga é considerada constante. Esta teve seu valor especificado levando-se em conta sua influência nas magnitudes de tensão e corrente dos painéis.

B. Resultados de Simulação – Caso 01: sem MPPT

No gráfico da Figura 7 é mostrado o desempenho da potência ao longo do tempo, para o sistema sem a inserção de um método de controle do ponto de máxima potência.

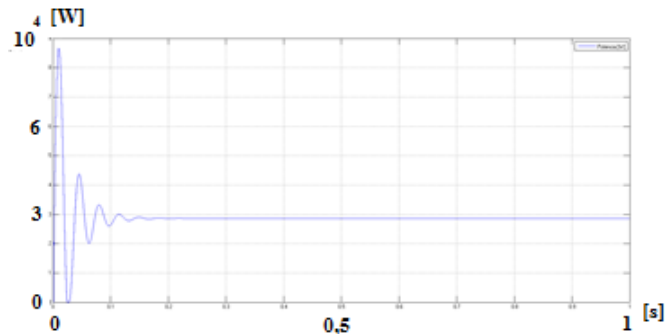


Fig. 7. Potência extraída dos painéis sem MPPT – Caso 01.

O comportamento da tensão e da corrente na saída do arranjo PV pode ser visualizado por meio da Figura 8.

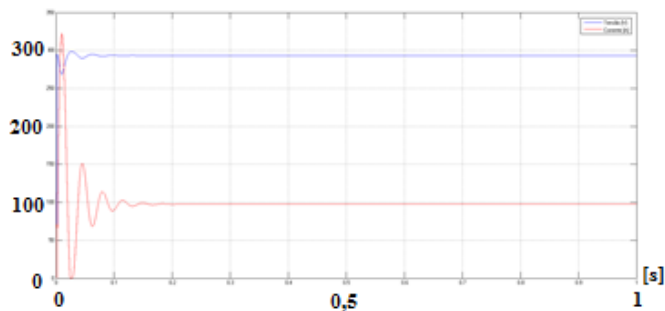


Fig. 8. Tensão (curva em azul) e corrente (curva em vermelho) na saída do painel fotovoltaico – Caso 01.

C. Resultados de Simulação – Caso 02: controle P&O

No gráfico da Figura 9 é mostrado a potência extraída dos painéis com o emprego do sistema do método de rastreamento P&O.

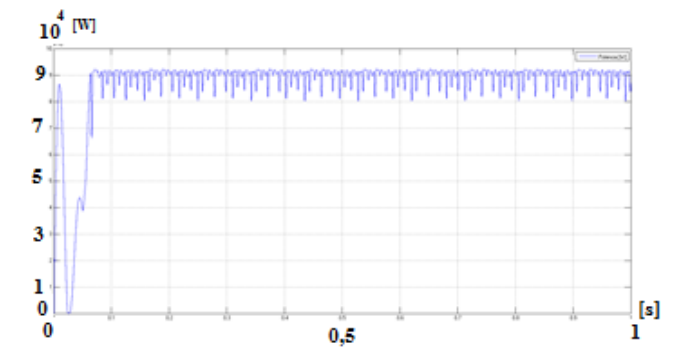


Fig. 9. Potência extraída dos painéis através com adoção do Método de Controle P&O – Caso 02.

Complementarmente, as Figuras 10 e 11 evidenciam o comportamento da tensão e corrente nas saídas, respectivamente, do arranjo PV e do conversor *boost*.

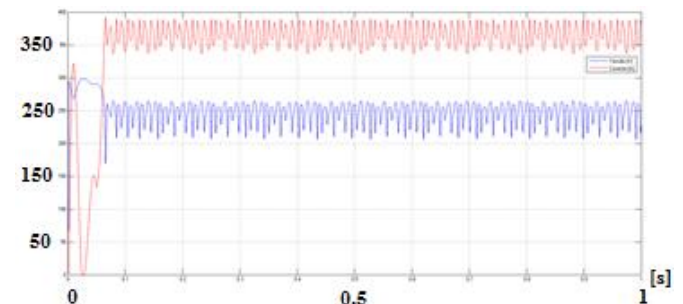


Fig. 10. Tensão (curva em azul) e corrente (curva em vermelho) na saída do painel fotovoltaico – Caso 02.

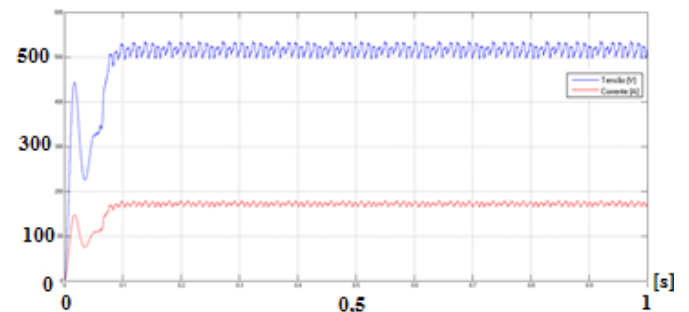


Fig. 11. Tensão (curva em azul) e corrente (curva em vermelho) na saída do conversor *boost* – Caso 02.

D. Resultados de Simulação – Caso 03: controle Condutância Incremental

Tem-se na Figura 12, a resposta em função do tempo com a adoção da estratégia de rastreamento da Condutância Incremental.

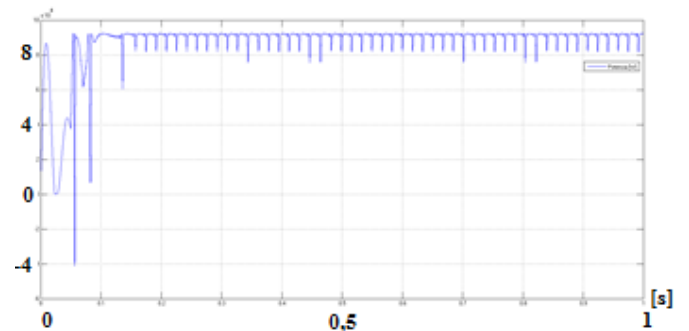


Fig. 12. Potência extraída dos painéis com o Método de Controle da Condutância Incremental – Caso 03.

Por fim, as Figuras 13 e 14 também apresentam os valores de tensão e corrente no ponto de conexão do painel com o conversor e na saída deste respectivamente.

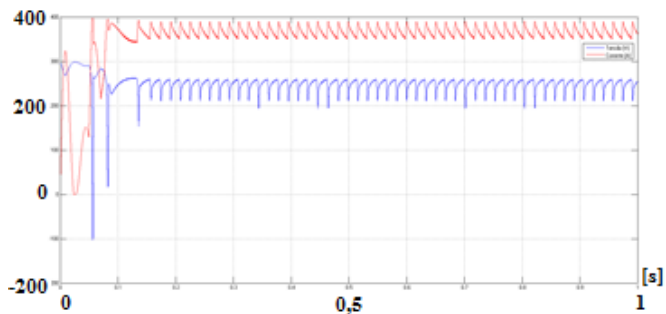


Fig. 13. Tensão (curva em azul) e corrente (curva em vermelho) na saída do painel fotovoltaico – Caso 03.

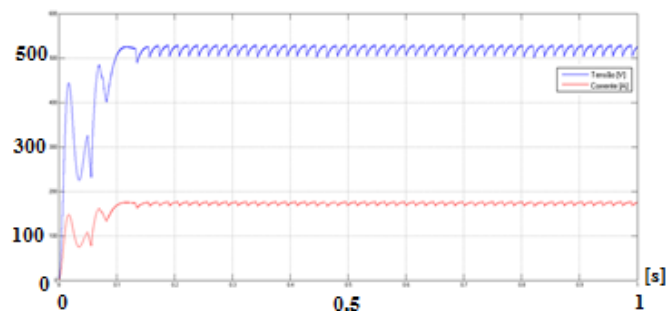


Fig.14. Tensão (curva em azul) e corrente (curva em vermelho) na saída do conversor *boost* – Caso 03.

E. Análises de desempenho das metodologias de MPPT

Para análise das metodologias implantadas no sistema fotovoltaico em questão, é feita uma comparação entre os resultados da simulação do sistema simples e do sistema com as técnicas de controle. Neste sentido, pode-se afirmar:

- No estudo de Caso 01, nota-se uma insatisfatória condição de funcionamento do sistema sem um artifício de rastreamento de potência. Observando a Figura 7, percebe-se que a potência já estabilizada do mesmo refere-se à aproximadamente 30kW, obedecendo as condições especificadas na elaboração do projeto. Este valor pode ser considerado baixo ao levar-se em conta que o painel fotovoltaico tem capacidade de fornecer uma potência de aproximadamente 100kW nas condições ideais de funcionamento (1000w/m^2 e 25°C).
- Inserindo no sistema o controle de rastreamento do ponto de máxima potência do tipo P&O, representado no Caso 02, observa-se por meio da Figura 9 um salto de potência de aproximadamente 33% em relação ao Caso 01. Em outras palavras, uma vez o sistema estabilizado, nota-se que o método utilizado consegue extrair uma potência de aproximadamente 90kW do arranjo fotovoltaico.
- Ao implementar o método de controle da Condutância Incremental, no estudo de Caso 03, é observado uma considerável melhoria da geração de energia, a qual expressa seus valores de potência similarmente ao método P&O em aproximadamente 90kW.
- Não obstante à grande diferença de lógica de controle empregada nos dois métodos de MPPT utilizados,

nota-se, conforme resultados, que as potências elétricas, para as condições ambientais impostas (1000w/m^2 e 35°C) em ambos, se apresentaram, após estabilização, num mesmo patamar. Todavia, é preciso salientar que a lógica de controle da Condutância Incremental apresenta-se com uma maior complexidade matemática, em termos de implementação computacional, quando comparada à estratégia Perturba e Observa.

- Em comparação das potências obtidas nos estudos de Casos 01, 02 e 03, nota-se que as mesmas foram obtidas para condições ambientais impostas de 1000w/m^2 e 35°C , entretanto sabendo que em condições ideais de funcionamento (1000w/m^2 e 25°C) o arranjo fotovoltaico fornece potência de 100 kW.
- Por fim, percebe-se que o tempo de atuação de ambas as metodologias são muito próximos, uma vez que em cerca de 0,06s, após o desbloqueio, os dois atingem um patamar de estabilidade.

VI. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma discussão sobre os métodos de controle utilizados para a rastreamento do ponto de máxima potência aplicados em sistemas de geração de energia fotovoltaica.

Os resultados dos estudos de caso se mostraram bem coerentes com o esperado, ou seja, as técnicas de MPPT implementadas tiveram respostas satisfatórias no tocante à elevação da potência gerada e também em relação ao tempo de atuação. Inclusive, os valores encontrados em ambas metodologias foram muito próximos, mostrando certa equivalência do ponto ótimo de potência rastreado.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressão seus agradecimentos ao CNPQ (Proc. 460208/2014-4) e à FAPEMIG (Proc. TEC-APQ-02447-15) pelo suporte financeiro concedido via Projetos de Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] L. E. Issa, *Avaliação de desempenho de modelos computacionais representativos de painéis solares*, Artigo submetido à Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia: 2015.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética. *Balço Energético Nacional – Relatório final 2014*. Acedido em 30 de setembro de 2015, em: <http://www.epe.gov.br/>.
- [3] L. R. C. Silva, *Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*, Dissertação de Mestrado, UFU, 2015.
- [4] Go SI, Ahn SJ, Choi JH, et al. “Simulation and analysis of existing MPPT control methods in a PV generation system”. *J Int Council Electr Eng* 2011; 1:446–451.
- [5] de Assis Sobreira P, Villalva MG, Barbosa PG, et al. “Comparative analysis of current and voltage-controlled photovoltaic maximum power point tracking”. In: 2011 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2011, pp. 858–63.