

PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE UM CONVERSOR MULTISTRING PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Philippe R. de Souza, Alexandre W. Preissler, Jumar L. Russi, Guilherme S. da Silva

Universidade Federal do Pampa

Alegrete, RS, Brasil, 97546-550

philipe-ssr@hotmail.com, xandewp@gmail.com, jrussi@gmail.com, guilhermesds@gmail.com

Resumo— Este artigo apresenta o projeto do sistema de controle de sistema fotovoltaico composto por dois conversores boost e um inversor de meia ponte para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição. Além disso, é aplicado o método de rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT) e são apresentados os modelos dinâmicos para o projeto do controlador de corrente de saída e do controlador de tensão do barramento CC. Desta forma, resultados são apresentados para validar o sistema de controle proposto.

Palavras-chave— *Multistring, conversor boost, conversor meia ponte, método de MPPT, sistema fotovoltaico.*

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, devido ao crescimento da demanda por energia elétrica, formas e técnicas de geração de eletricidade têm sido estudadas para atender a mesma sem que haja impactos negativos ao meio ambiente.

As usinas hidrelétricas são consideradas fontes renováveis de energia elétrica, mas em períodos de seca apresentam uma redução na sua capacidade de geração, pois dependem da chuva para um armazenamento satisfatório de água em seus reservatórios. Este processo resulta em uma queda na produção de energia elétrica destas usinas, o que pode ocasionar a ativação de fontes não renováveis, como as usinas termoeletricas.

Neste âmbito, é importante ressaltar o investimento em fontes renováveis de energia elétrica, tais como a eólica e solar fotovoltaica (PV), já que estas vêm demonstrando viabilidade econômica e um grande potencial de geração. Com isso, as unidades consumidoras podem gerar sua própria energia elétrica e fornecer seu excedente quando conectadas à rede de distribuição por meio da Resolução Normativa ANEEL n° 482/2012 de micro e minigeração distribuídas, alterada pela n° 687/2015 e, posteriormente, pela n° 786/2017 [1].

Neste contexto, os conversores CC-CC e CC-CA são designados a elevar e inverter, respectivamente, a tensão gerada por um painel solar fotovoltaico, a fim de fornecer energia elétrica às cargas em corrente contínua (CC) e em corrente alternada (CA), bem como proporcionam o dimensionamento e a implementação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Assim, a utilização de baterias e controladores de carga pode ser dispensada para reduzir os custos das instalações. Além disso, os conversores influenciam diretamente no rendimento

global do sistema na transferência de energia da fonte à carga e, por este motivo, devem ser projetados adequadamente.

Os conversores possibilitam o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) de cada módulo ou arranjo fotovoltaico, o que pode aumentar o rendimento da extração da potência dos sistemas fotovoltaicos. Assim, o método Perturbação & Observação (P&O) foi utilizado para o MPPT [2]. Esta técnica tem como vantagem a simples implementação, mas apresenta erro em regime permanente, principalmente para rápidas variações de radiação solar [3].

Desta forma, este artigo apresenta uma topologia de conversor para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição. Nesse sentido, o artigo tem como proposta um sistema de controle para a corrente inserida na rede e para o equilíbrio das tensões dos capacitores do barramento CC. Também apresenta os modelos dinâmicos relativos a este sistema de controle, bem como os resultados que demonstram o adequado funcionamento dos controladores e o rastreamento do ponto de máxima potência.

II. CONVERSOR EMPREGADO

A. Características

O conversor empregado consiste na topologia de sistemas fotovoltaicos *multi-string*, conforme ilustra a Fig. 1.

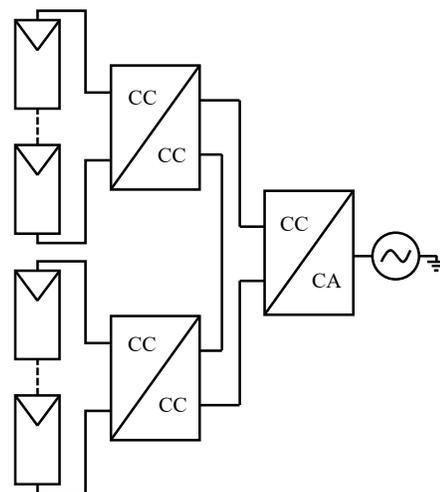


Fig. 1. Arquitetura empregada de sistemas fotovoltaicos.

A topologia empregada neste estudo é ilustrada na Fig. 2. Basicamente, é um conversor, composto por dois conversores elevadores de tensão (*boost*) e um inversor meia-ponte, que tem como principais vantagens dois rastreamentos independentes do ponto de máxima potência dos arranjos fotovoltaicos. Os conversores *boost* são responsáveis por realizar o MPPT dos arranjos fotovoltaicos, enquanto que o inversor é responsável por controlar a tensão dos capacitores do barramento CC e a corrente inserida na rede elétrica.

Esta estrutura aumenta o rendimento do sistema, pois o sombreamento incidente em um dos arranjos não afeta o ponto de máxima potência do outro, quando comparada a um conversor com único canal de MPPT.

Além das vantagens mencionadas, diferentemente de outras topologias utilizadas em cascata, esta topologia possui apenas quatro chaves semicondutoras estáticas (S_1, S_2, S_3 e S_4) e dois diodos (D_1 e D_2).

Em relação à configuração, o sistema fotovoltaico foi dimensionado para utilização de no máximo dois módulos fotovoltaicos em série por arranjo, dependendo da tensão nominal dos mesmos. Isso é permitido pelo estágio de elevação da tensão de cada conversor *boost*, que dispensa o uso de vários painéis em série por *string* e, conseqüentemente, evita o aumento demasiado da tensão gerada para atender ao nível adequado de tensão do barramento CC.

No entanto, as principais desvantagens deste conversor são a elevada indutância do filtro de saída comparada aos demais conversores tradicionais e o desequilíbrio das tensões nos capacitores do barramento CC na ocorrência de sombreamento parcial de um dos arranjos fotovoltaicos, o que ocasiona assimetria na forma de onda da corrente de saída. Neste caso, para manter o equilíbrio de tensão nos mesmos, além das distorções harmônicas, é gerada uma componente CC na forma de onda de corrente injetada na rede elétrica. Para evitar este problema, os arranjos fotovoltaicos devem produzir a mesma potência, ou seja, a estrutura estudada restringe-se para aplicações residenciais de baixa potência.

Desse modo, para realizar a conexão de um sistema fotovoltaico com a rede elétrica, devem-se obedecer aos limites do nível CC e de distorção harmônica total (*THD - Total Harmonic Distortion*) de corrente estabelecidos na ABNT NBR 16149-2014 [4].

Sendo assim, projetou-se um sistema de controle para manter o equilíbrio de tensão nos capacitores do barramento CC e controlar a corrente que flui na saída do conversor.

B. Operação do Conversor Boost

Este conversor, apresentado na Fig. 2, foi usado para aumentar a baixa tensão gerada pelos painéis fotovoltaicos, a fim de adequá-la ao nível de tensão do barramento CC, que deve ser superior à tensão de pico de saída. Além disso, o conversor *boost* também é destinado a realizar o MPPT dos painéis solares. Assim, cada conversor *boost* da topologia modular eleva a tensão de 60 V dos arranjos fotovoltaicos (*PV1* e *PV2*) para 220 V, produzindo uma tensão de 440 V no barramento.

A operação do conversor *boost* está diretamente relacionada ao acionamento das chaves S_1 e S_2 . Quando as chaves são

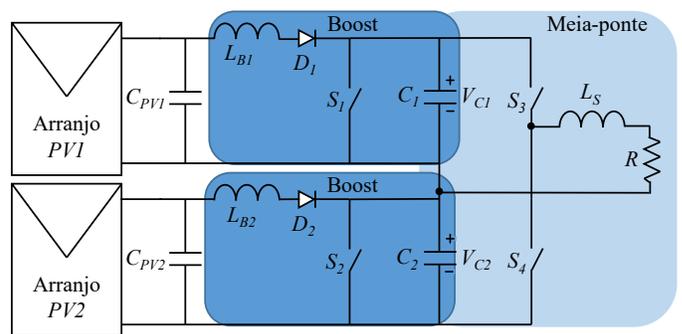


Fig. 2. Topologia empregada.

ligadas, os diodos D_1 e D_2 são bloqueados, pois estão reversamente polarizados, e a tensão de entrada, gerada pelos arranjos, é aplicada aos indutores L_{B1} e L_{B2} , que armazenam energia. No entanto, ao desligar as chaves, a corrente dos indutores é conduzida pelos diodos e a energia armazenada carrega os capacitores C_1 e C_2 [5].

C. Operação do Inversor Meia-ponte

Este inversor é utilizado para inverter a tensão de entrada para fornecer energia elétrica às cargas em CA e conectar o sistema fotovoltaico à rede de distribuição.

O inversor meia-ponte da Fig. 2 opera em duas etapas. Na primeira etapa (semiciclo positivo), a chave S_3 é ativada e S_4 permanece desligada, e a tensão V_{C1} é aplicada nos terminais do resistor R . Enquanto na segunda etapa (semiciclo negativo), a chave S_3 é desligada e S_4 é ativada, aplicando a tensão $-V_{C2}$ ao resistor R [5].

III. SISTEMA DE CONTROLE

Para obedecer às especificações descritas a seguir, é apresentado, na Fig. 3, o diagrama de blocos do sistema de controle proposto, que é formado por uma malha interna de corrente e duas malhas externas de tensão [6].

A topologia da Fig. 2 deve realizar o processamento da potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos visando garantir o fornecimento de energia elétrica às cargas em CA e a adequação da conexão com a rede elétrica. Para isto, o sistema de controle deve atender às seguintes especificações:

- Prover uma corrente de saída senoidal e em fase com a tensão da rede elétrica;
- Estabilizar a tensão total do barramento CC no valor projetado;
- Manter equilibradas as tensões nos capacitores que compõem o barramento CC.

A malha interna de corrente é utilizada no controle do acionamento das chaves estáticas de modo que a corrente de saída tenha a forma de onda senoidal conforme à rede. O compensador $Cig(s)$ possui uma frequência de cruzamento (f_{cz}) por zero de 4000 Hz, a fim de gerar a forma de onda senoidal da corrente de saída, e em caso de oscilações, deve apresentar uma rápida resposta transitória e erro nulo em regime permanente. O sinal de referência (ig^*) da malha interna de corrente depende

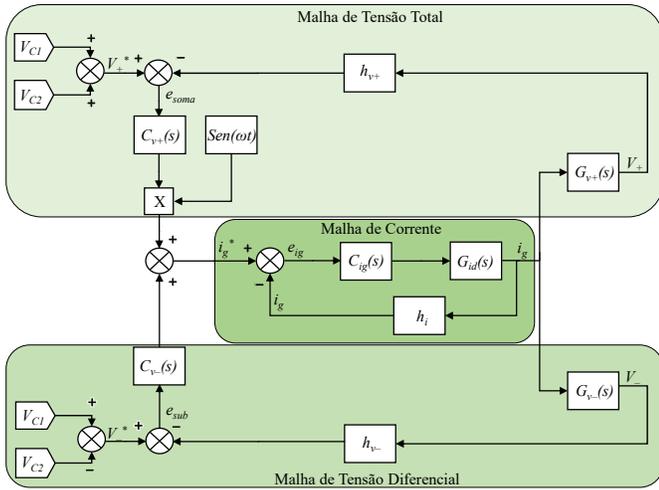


Fig. 3. Sistema de controle proposto.

do resultado da soma das malhas de tensão e a corrente de saída (i_g) é obtida através do sensor de corrente (h_i).

A regulação da tensão total é feita por meio de uma malha de tensão que tem como referência o valor da soma das tensões dos capacitores do barramento CC ($V_+^* = V_{C1} + V_{C2}$). Considerando que as malhas externas de tensão possuem uma resposta mais lenta que a malha de corrente, o compensador $CV_+(s)$ deve garantir a operação da malha de tensão total para o valor desejado, tendo em vista que sua frequência de cruzamento por zero foi definida em uma década abaixo da frequência da rede, sendo igual a 6 Hz, e a tensão é medida pelo sensor de tensão (h_{v+}).

Já a outra malha de tensão tem como sinal de referência a subtração das tensões do barramento CC ($V_-^* = V_{C1} - V_{C2}$) e busca manter a mesma tensão nos capacitores, assim, a tensão diferencial deve ter valor igual a zero. Para tornar constante o equilíbrio das tensões nos capacitores, mesmo que sejam conectadas a estas cargas diferentes, esta malha de tensão insere um nível CC na referência de corrente i_g^* [6]. A frequência de cruzamento por zero especificada desta malha é de 12 Hz, sendo o dobro de uma década abaixo da frequência fundamental, e a aquisição de tensão é realizada através do sensor de tensão (h_{v-}).

A. Modelos Dinâmicos

A obtenção das funções de transferência dos modelos dinâmicos, do sistema de controle, é necessária para o projeto dos controladores das três malhas de controle descritas anteriormente. Observa-se na Fig. 3 que as funções de transferência que devem ser obtidas para o projeto dos compensadores são:

- $G_{id}(s)$ – função de transferência que relaciona a corrente de saída do inversor com a razão cíclica;
- $G_{v+}(s)$ – função de transferência que relaciona a tensão total do barramento CC com a corrente de saída;
- $G_{v-}(s)$ – função de transferência que relaciona a tensão diferencial do barramento CC com a corrente de saída.

Desta forma, a função de transferência obtida da malha interna de corrente é apresentada em (1), da tensão total em (2), enquanto para a tensão diferencial é mostrada em (3).

$$G_{id}(s) = \frac{\tilde{i}_g(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{V_{CC}/2}{L_s \cdot s} \quad (1)$$

$$G_{v+}(s) = \frac{V_S(s)}{i_g(s)} = -\frac{M}{2 \cdot C \cdot s} \quad (2)$$

$$G_{v-}(s) = \frac{V_{Sub}(s)}{i_g(s)} = -\frac{1}{C \cdot s} \quad (3)$$

onde V_{CC} é a tensão do barramento CC, L_s é o indutor de saída, C representa os capacitores do barramento ($C = C1 = C2$) e M é a modulação em amplitude do inversor.

B. Controle da Corrente de Saída

Para o projeto do controle da corrente de saída foram definidas as seguintes especificações

- O sistema compensado deve apresentar margem de fase (MF) de 50°;
- Frequência de cruzamento por zero de 4 kHz;
- Erro nulo em regime permanente na frequência de 60 Hz.

Assim, o controlador que satisfaz todas as especificações é o proporcional-ressonante-derivativo (PRD), pois baseia-se no princípio do modelo interno, que por sua vez garante erro nulo em regime permanente para referências senoidais [7], [8], [9].

Desta maneira, a função de transferência que representa o compensador PRD é expressa em (4) [7].

$$C_{PRD}(s) = K_1 \frac{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n) \cdot (s + z_D)}{(s^2 + p_R^2) \cdot (s + p_D)} \quad (4)$$

onde ω_n é a frequência natural dos zeros, ζ é o coeficiente de amortecimento dos zeros, p_R são os polos ressonantes, z_D é o zero e p_D é o polo da parcela derivativa e K_1 é o ganho do compensador PRD.

Após definir o posicionamento dos polos e zeros, o ganho K_1 do compensador foi obtido por meio da ferramenta de sistemas de controle do *software* MATLAB®, com objetivo de obter a margem de fase e frequência de cruzamento por zero desejadas, conforme mostra a Fig. 4.

Para as malhas de tensão não se preocupou com a margem de fase e, por se tratarem de referências constantes, foi adotado o controlador proporcional-integral (PI), cujo projeto atende às seguintes especificações:

- Frequência de cruzamento por zero de 6 Hz para a malha de tensão total e 12 Hz para a malha de tensão diferencial;
- Erro nulo em regime permanente.

Deste modo, a função de transferência do compensador PI é demonstrada em (5) [8], [9], [10], e a sua resposta em frequência é ilustrada na Fig. 5 para o controle da tensão total e na Fig. 6 para a tensão diferencial.

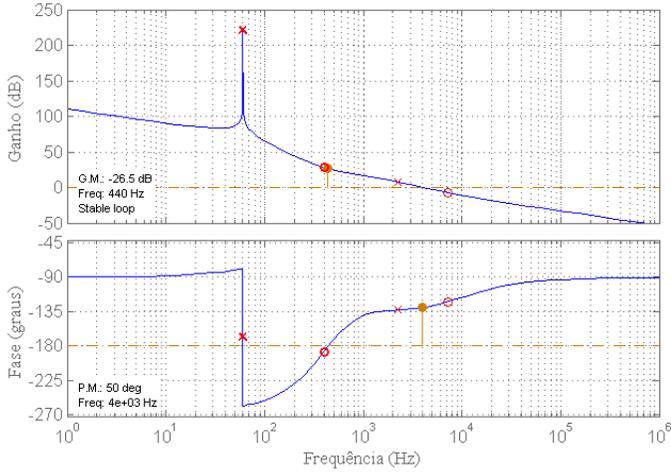


Fig. 4. Resposta em frequência da malha de corrente com o compensador PRD.

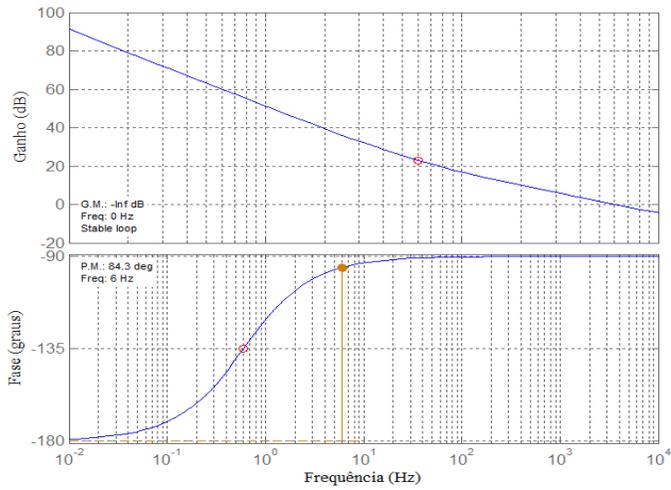


Fig. 5. Resposta em frequência da malha de tensão total com o controlador PI.

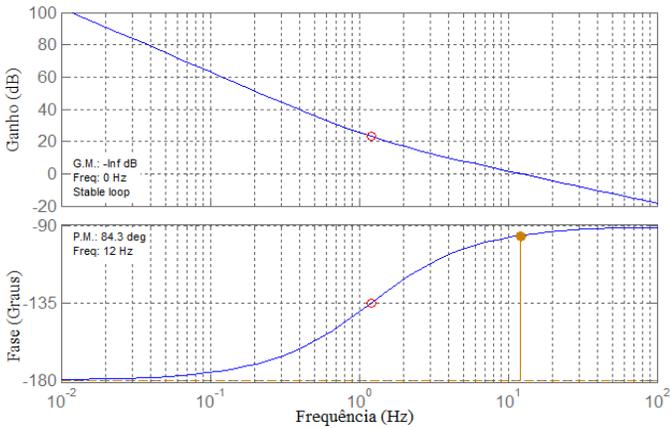


Fig. 6. Resposta em frequência da malha de tensão diferencial com o controlador PI.

$$C_{PI}(s) = K_p \frac{(s + z_I)}{s} \quad (5)$$

onde z_I é o zero e K_p é o ganho do compensador PI.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações da topologia de conversor modular proposta para sistemas fotovoltaicos, conforme apresentada na Fig. 2 e com os parâmetros da Tabela I. Além disso, a simulação do rastreamento do ponto de máxima potência dos arranjos fotovoltaicos também é mostrada.

O dimensionamento da topologia da Fig. 2 foi realizado para atender uma potência de 980 W e tensão eficaz de 127 V na saída, considerando que cada conversor *boost* eleva a tensão de aproximadamente 60 V do arranjo fotovoltaico composto por dois módulos em série de 245 W cada, do modelo KD245GH-4FB, da Kyocera.

A Tabela I apresenta os parâmetros dos conversores.

A. Topologia Completa sem Variação da Radiação Solar dos Arranjos Fotovoltaicos

A Fig. 7 mostra o rastreamento do ponto de máxima potência dos arranjos *PV1* e *PV2* para radiação solar igual a 1000 W/m² e temperatura de 25 °C. Como pode ser observado, a estratégia Perturbação e Observação apresenta uma potência rastreada com erro em regime permanente nos dois arranjos fotovoltaicos, que é uma desvantagem da mesma.

Na Fig. 8 são demonstrados os valores de pico e as formas de onda das grandezas controladas e comparadas com suas respectivas referências. A tensão diferencial tem apenas uma forma de onda, pois o valor da sua referência é igual a zero.

Observa-se que a corrente de saída possui o mesmo valor de pico e forma de onda da sua referência, enquanto as tensões total e diferencial do barramento CC apresentam valores e forma de onda diferentes de suas referências, porém a média dos valores destas tensões gera um valor aproximado da referência.

B. Topologia Completa com Variação da Radiação Solar dos Arranjos Fotovoltaicos

O MPPT dos arranjos fotovoltaicos com variação da radiação solar é mostrado na Fig. 9.

TABELA I. PARÂMETROS DO CONVERSOR

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão eficaz da rede elétrica	$V_{s,ef}$	127 V
Corrente de pico de saída	$I_{s,p}$	11 A
Frequência da tensão da rede	f_r	60 HZ
Frequência de chaveamento	f_{ch}	40 kHz
Índice de modulação	M	0,8
Tensão no barramento CC	V_{cc}	440 V
Tensão nos capacitores CC	V_{C1}, V_{C2}	220 V
Capacitâncias CC	C_1, C_2	2,63 mF
Indutância de entrada	L_{B1}, L_{B2}	2,64 mH
Indutância de saída	L_s	5,04 mH
Resistência de carga	R	16,46 Ω

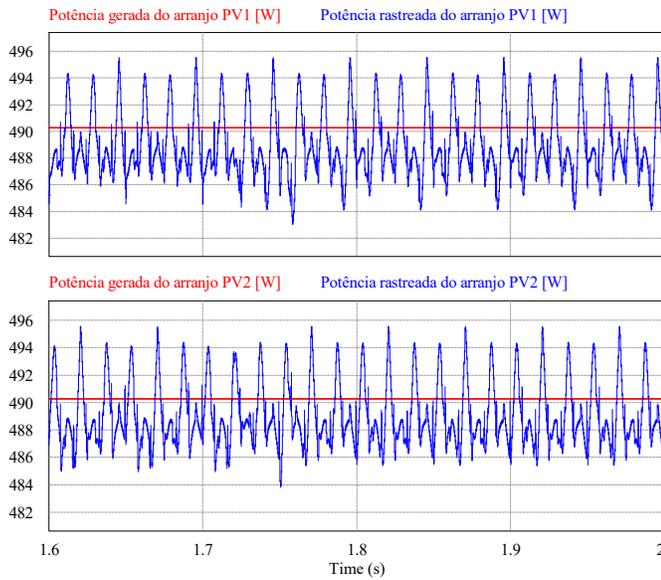


Fig. 7. MPPT dos arranjos fotovoltaicos sem variação da radiação solar.

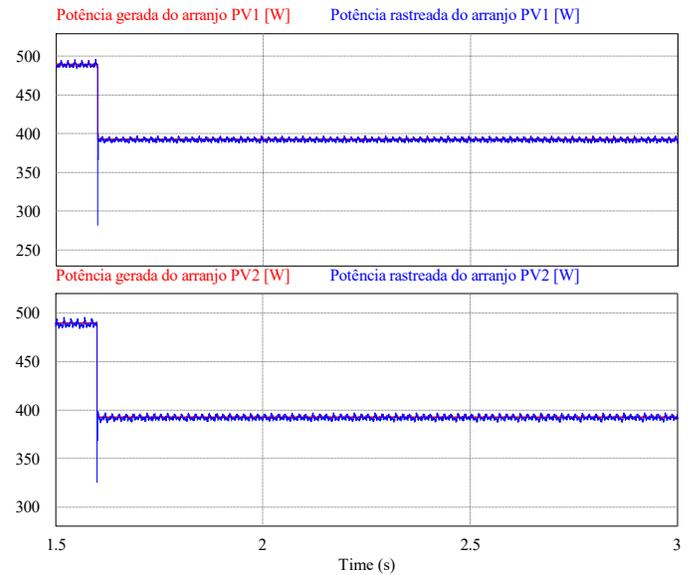


Fig. 9. MPPT dos arranjos fotovoltaicos com variação da radiação solar.

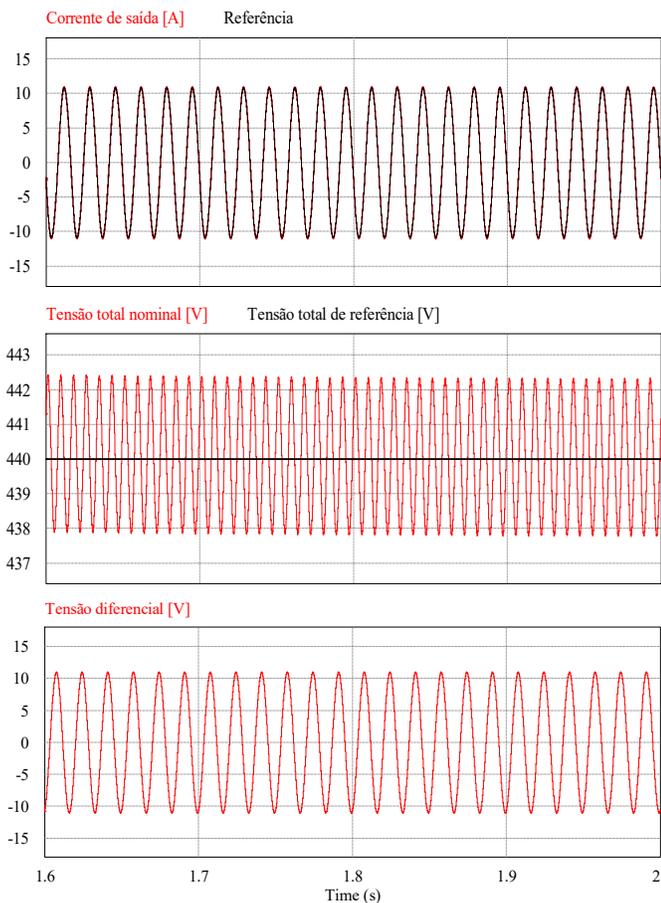


Fig. 8. Corrente de saída e tensões total e diferencial do barramento CC sem variação da radiação solar.

A ação do controle das malhas externas de tensão e de corrente para a variação de radiação solar de 1000 para 800 W/m² dos arranjos fotovoltaicos é ilustrada na Fig. 10.

Nota-se que a malha de tensão total do barramento CC se afasta da referência por alguns períodos de tempo devido à alteração da radiação solar, e depois começa a se aproximar novamente do seu valor nominal.

A Tabela II apresenta a distorção harmônica total de corrente conforme a variação de radiação solar dos arranjos fotovoltaicos. Observa-se que os valores apresentados, em porcentagem, são inferiores ao limite exigido pela norma, que é de 5 %.

Observa-se na Transformada Rápida de Fourier da (FFT–Fast Fourier Transform) da Fig. 11 que, para a mesma variação de radiação solar dos arranjos fotovoltaicos, o sistema além de mostrar a intensidade de corrente para a frequência fundamental (60 Hz), apresenta uma distorção harmônica de terceira ordem (180 Hz) de 1,16%, que está abaixo do limite de 4,0% permitido pela ABNT.NBR 16149.

Já para a mudança de radiação solar de um dos arranjos fotovoltaicos, conforme ilustra a Fig. 12, o sistema apresenta uma distorção harmônica de 1,26 % na frequência de 180 Hz e componente CC de 4,5 % em relação à corrente nominal do conversor injetada na rede elétrica, sendo 0,5 % o valor máximo permitido pela ABNT NBR 16149.

Dessa forma, foi constatado que, para qualquer variação de radiação solar de um dos arranjos fotovoltaicos, o sistema apresentará nível CC na corrente de saída superior a 0,5 %. Assim, como já foi comentado, para eliminar este problema, os mesmos devem produzir a mesma potência.

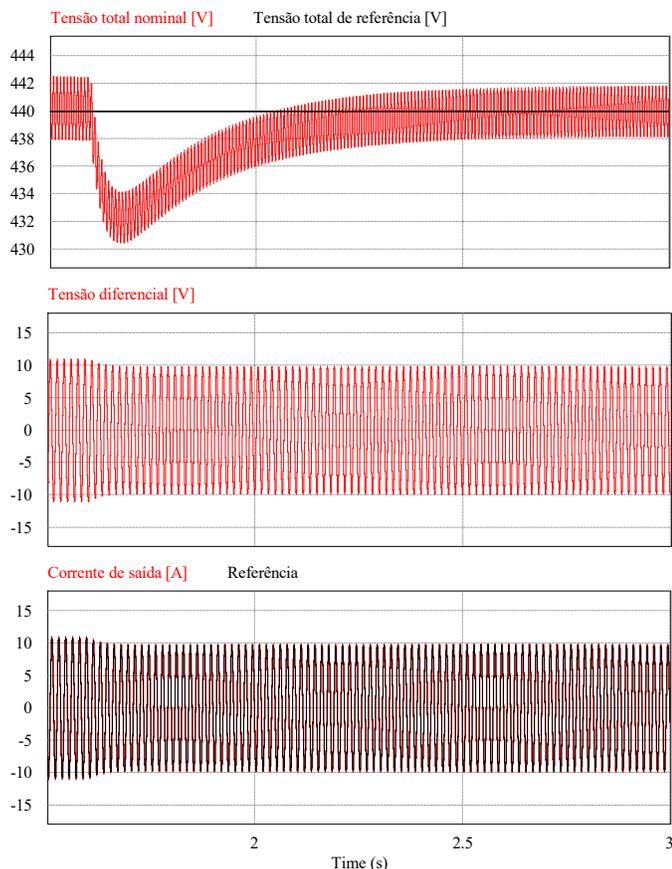


Fig. 10. Tensões total e diferencial do barramento CC e corrente de saída com variação da radiação solar.

TABELA II – DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL PARA A VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DOS ARRANJOS PV.

Descrição	Valores		
Radiação Solar PV1 (W/m ²)	1000	800	800
Radiação Solar PV2 (W/m ²)	1000	800	1000
THD (%)	1,93	2,06	6,6
Componente CC (% da fundamental)	-	-	4,5

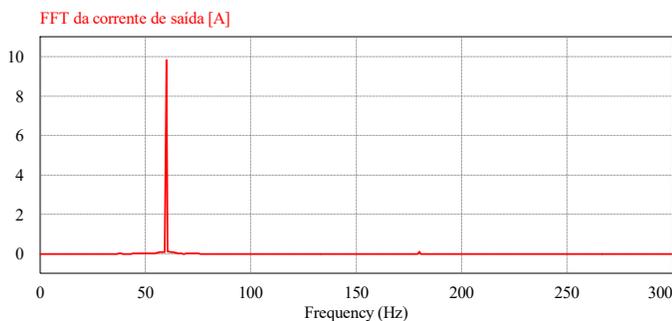


Fig. 11. FFT da corrente de saída para a variação da radiação solar dos arranjos PV.

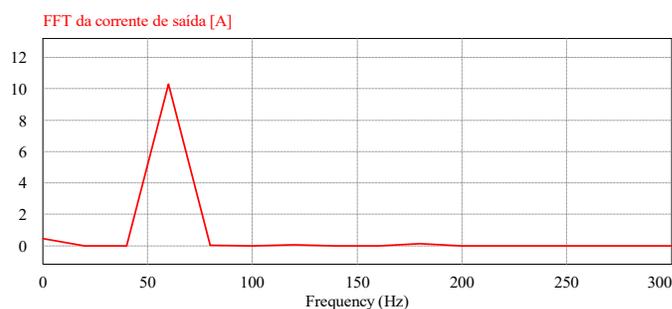


Fig. 12. FFT da corrente de saída para a variação da radiação solar do arranjo PV1.

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a simulação de um sistema de controle e o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) de um conversor formado pelos conversores *boost* e meia-ponte para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

No rastreamento do ponto de máxima potência, a técnica Perturbação e observação (P&O), embora tenha rastreado a potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos, demonstrou erro em regime permanente, principalmente durante as variações de radiação solar.

Por fim, quando há a mesma variação da radiação solar dos arranjos fotovoltaicos, o sistema apresenta os valores nominais da tensão do barramento CC e da corrente de saída do conversor e distorções harmônicas dentro dos limites previstos em norma. Porém, com a variação distinta da radiação solar dos arranjos, o conversor gera nível CC na corrente de saída superior ao estabelecido em norma.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 de microgeração e minigeração distribuída,” disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 19 mar. 2018.
- [2] M. A. G. Brito, L. Galotto Jr., L. P. Sampaio, G. A. Melo, and C. A. Canesin, “Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1156-1167, Mar. 2013.
- [3] J. Imhoff, “Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos,” dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, “NBR 16149 primeira edição, de 01 de mar. 2013: características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição”.
- [5] N. Mohan, *Power Electronics: A first course*, John Wiley & Sons, 2012.
- [6] L. M. Nodari, “Sistema de controle digital com rápida resposta transitória para um retificador monofásico meia-ponte,” dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, 2011.
- [7] R.W. Erickson, D. Maksimović, *Fundamentals of power electronics*. 2^a Ed., Colorado, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [8] H. Guillard Jr. and P. J. A. Serni, “A review of project of the controllers for an UPS,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 2, pp. 314-321, Feb. 2018.
- [9] A.C. Souza, D. T. S. Borges, I. N. Santos, and J. R. Macedo Jr., “Assessment of linear current control methods in single-phase grid-tie inverters,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 5, pp. 1424-1431, May 2018.
- [10] N. S. Nise, *Engenharia de sistemas de controle*. Editora LTC, 5^a Ed., 2009.