

PROPOSTA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

RAFAEL B.A. CUNHA*, ANDRÉ P.N. TAHIM*, FERNANDO A. MOREIRA*, FABIANO F. COSTA*

*Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia

rafael.b.a.cunha@gmail.com, atahim@ufba.br, moreiraf@ufba.br,
fabiano.costa@ufba.br

Abstract— This paper proposes the modelling and simulation of a grid-connected photovoltaic system, carried out in Matlab/Simulink environment. The system consists of photovoltaic (PV) panel connected through a capacitor to a boost converter which rules the DC voltage to a H-bridge which, in turn injects AC power into the grid. To filter out the PWM voltages, generated by the H-bridge, this paper investigates the usage of a LCL filter alternatively to the most applied LCL topology. Also in this work, it is discussed and shown the advantages of the feed-forward of the power available from the PV panel into the AC current control loop. This analysis is only possible due to the simulation of the whole PV system. The simulated results show an improvement in the dynamic response of the DC voltage and the AC grid current with regards to abrupt changes in irradiance values onto the PV panel.

Keywords— Photovoltaic systems, Filter design, Resonant Control

Resumo— Neste trabalho, propõe-se a modelagem e simulação de um sistema fotovoltaico (SF) conectado à uma rede elétrica em ambiente Matlab/Simulink. O sistema consiste de um modelo de um painel fotovoltaico conectado através de um capacitor à um conversor *boost* que regula uma tensão CC para uma ponte H que inverte a tensão e injeta uma corrente AC, por meio de um filtro, em uma rede monofásica. Neste trabalho, utiliza-se a topologia LLCL para filtragem das tensões PWM geradas pela ponte H, alternativamente aos filtros LCL, mais comumente utilizados nestas aplicações. Também, discute-se e evidencia-se as vantagens da alimentação direta da potência disponível do painel na malha de controle de corrente CA para a resposta dinâmica da corrente AC injetada na rede e da tensão CC frente a mudanças abruptas da irradiação sobre o painel.

Palavras-chave— Sistemas fotovoltaicos, Projeto de Filtros, Controle Ressonante

1 Introdução

Até 2010, a contribuição de fontes fotovoltaicas para matriz energética global era pouco significativa (Xin et al., 2014). No entanto, a partir do início da presente década, observam-se taxas crescentes de utilização destas fontes tanto em sistemas conectados à rede elétrica, como nos que alimentam cargas isoladas, como instalações rurais cujo o acesso da rede elétrica é proibitivo em termos econômicos. Estima-se que no ano de 2035, a energia gerada dos referidos sistemas seja cerca de vinte e seis vezes maior do que em 2010, expandindo-se de 32 Twh até 846 Twh. Em termos de potência instalada, espera-se aumento de 67 GW, em 2011, para 600 GW em 2035, devido a custos menores e subsídios governamentais (Sumathi et al., 2015, Chap. 1). Em termos nacionais, sabe-se, segundo o atlas de irradiação solar no Brasil, que diariamente a incidência de irradiação no Brasil encontra-se na faixa entre 4500 Wh/m^2 a 6300 Wh/m^2 (ANEEL, 2016). Como base de comparação, o lugar mais ensolarado da Alemanha recebe 40% menos irradiação solar que o lugar menos ensolarado do Brasil. Ainda assim, a Alemanha é um dos países líderes no aproveitamento desta fonte de energia. Neste contexto, pesquisas de âmbito nacional que objetivem o desenvolvimento de SFs se tornam gradativamente mais pertinentes.

De modo geral, um SF conectado à rede elétrica é composto por um painel, ou conjuntos conectados de painéis, fotovoltaico que em sua saída fornece uma tensão CC cujo o valor basicamente depende da irradiação e da temperatura das células do painel. Devido à natureza instável e intermitente destas grandezas, o va-

lor da tensão de saída está sujeito a mudanças bruscas. Portanto, usualmente, faz-se utilização de um conversor CC-CC para regular a tensão de saída do painel a um valor estável. Este conversor também pode ser utilizado para impor na saída do painel uma tensão que assegure que se esteja extraindo a máxima potência de seus terminais. Esta tensão é fornecida por um algoritmo de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT - Maximum Power Point Tracking). Após o estágio de regulação CC, em sistemas conectados, um inversor é necessário para transformar a potência CA oriunda do conversor CC-CC em uma potência CA que é injetada na rede, através de um filtro que pode ter diferentes topologias. A operação do inversor pode envolver diferentes objetivos de controle. Neste trabalho, o chaveamento da ponte H é dependente de um valor de referência V_{CC} , da potência disponível no painel e da retroalimentação da corrente CA da rede. A corrente injetada, a princípio, deve estar em fase com a tensão da rede. Para tanto, utiliza-se um algoritmo de sincronização, geralmente baseado em uma malha de captura de fase (PLL - Phase-Locked Loop). Também como parte da operação do inversor, a proteção contra a condição de ilhamento é obrigatória segundo as normas reguladoras. A condição de ilhamento se configura na situação em que o SF se encontra isolado da rede elétrica, fornecendo energia a uma carga local ou a uma micro-rede.

Entre os diversos tópicos de pesquisa relacionados ao desenvolvimentos de SFs, um dos mais fundamentais é o que investiga a modelagem de seus diversos estágios bem como a interação dinâmica entre eles. Técnicas de controle, de proteção de anti-ilhamento, e

de MPPT dependem da modelagem e da simulação de SFs conectados ou isolados. De posse desta modelagem, também é possível avaliar diferentes técnicas de sincronização e a influência destas na resposta dinâmica e na estabilidade do SF. Ainda mais, é possível investigar como a topologia de diferentes filtros podem afetar o desempenho do SF no que se refere à qualidade de energia injetada na rede ou com a performance dinâmica do SF em relação a mudanças abruptas de irradiância ou temperatura das células do painel. Outra análise que pode ser viabilizada é sobre como a localização dos pontos de sensoriamento para o feedback de corrente ou de tensão do filtro do inversor pode afetar a resposta do SF.

É importante ressaltar que na literatura muitos dos estudos mencionados acima são realizados com a modelagem incompleta do SF. É comum, por exemplo, que propostas de técnicas de anti-ilhamento sejam apresentadas com simulações e montagens experimentais nas quais o conjunto dos painéis e dos conversores DC-DC são substituídos por uma fonte CC (Velasco et al., 2011; Bifaretti et al., 2015). Em outros trabalhos, todo SF é modelado por uma simples fonte de corrente (Tedde and Smedley, 2014). Encontram-se também na literatura, a investigação de propostas de técnicas para MPPT que consideram apenas a modelagem dos conversores DC-DC suprindo diretamente cargas CC (Abdelsalam et al., 2011; Pandey et al., 2011; Killi and Samant, 2015). Apesar dos trabalhos citados demonstrarem a eficácia das técnicas propostas, a inclusão da dinâmica completa de um SF conectado à rede elétrica poderia incitar novas conclusões por parte de seus autores.

Este trabalho investiga dois tópicos fundamentais relacionados a um sistema fotovoltaico conectado a uma rede elétrica. O primeiro se refere à mitigação dos harmônicos de corrente gerados pelo seu estágio de inversão. Neste artigo, propõe-se um filtro com topologia LLCL, que se mostra mais eficaz do que o usualmente empregado filtro LCL. O outro tópico é a resposta dinâmica do sistema. Aqui, utiliza-se um controle semelhante ao proposto por (Velasco et al., 2011), no qual a corrente CA é conduzida por um controlador ressonante. No entanto, a este sistema acrescenta-se um controlador PI para o link de tensão CC e se faz uso de uma alimentação direta na malha de controle de corrente pela potência de saída do painel fotovoltaico. Os resultados demonstram que as respostas dinâmicas da tensão no barramento CC e da potência injetada na rede são aprimoradas no que se refere a mudanças na irradiação sobre o painel solar.

2 Arranjo fotovoltaico

O modelo de painel utilizado no arranjo fotovoltaico foi obtido utilizando o bloco *PV Array* existente no *Simulink R2015a*. O bloco recebe como parâmetros de entrada o modelo do painel fabricado, o número de ramos paralelos e a quantidade de módulos em série por ramo no arranjo. É possível obter, para cada modelo,

os parâmetros construtivos do painel, como o número de células por módulo, potência máxima gerada e coeficientes de temperatura. Também são fornecidos os parâmetros do circuito equivalente, como resistências série e paralelo e corrente de saturação do diodo. É permitido ainda plotar as curvas características I-V e P-V para valores selecionados de irradiância ou temperatura. O bloco possui como entradas, a temperatura de funcionamento em $^{\circ}\text{C}$ e a irradiância em W/m^2 . Foi utilizado o modelo AXITEC AC-265M-156-60S, com 1 ramo contendo 5 painéis em série.

Segundo dados de placa do fabricante, o painel selecionado é constituído de 60 células, possui área externa de $1,63 \text{ m}^2$, pesando 19,5 Kg. Apresenta potência máxima de 265 W, possuindo corrente de 8,65 A e tensão de 30,85 V no ponto de máxima potência. A tensão de circuito aberto é 38,42 V e a corrente de curto circuito é 9,2 A. A eficiência energética do painel é de 16,3%.

3 Conversor boost

Para o sistema proposto, a regulação da tensão na saída do painel é realizada por um conversor boost. Para o sistema de controle deste conversor, uma tensão de referência deve-lhe ser provida por um algoritmo de MPPT. Esta tensão deve ser imposta nos terminais de entrada do conversor, pressupondo que a tensão na sua saída seja governada por uma malha de controle que envolva o inversor de tensão. O algoritmo de MPPT aqui empregado é baseado na técnica de "perturbar e observar", (Killi and Samant, 2015).

O modelo linearizado do conversor é constituído assumindo que a tensão nos seus terminais de saída é constante, com o valor de 250 V, e modelo do painel é simplificado por uma resistência dinâmica r , expressada pela relação entre a tensão e a corrente geradas. O ponto de operação assumido ocorre no ponto de máxima potência, em que $r = 3,57\Omega$.

4 Sistema fotovoltaico simulado

O SF simulado é apresentado na Figura 1. O sistema é composto por três blocos principais; o arranjo fotovoltaico, um conversor *boost* e o inversor. Além destes componentes, um filtro LLCL, foi utilizado para conectar o inversor com um rede elétrica, representada por seu equivalente de Thevenin, com um indutor L_r e uma fonte v_r .

Nesta figura, destaca-se inicialmente uma malha externa para controle da tensão V_{CC} . A saída i^* desta malha serve como uma referência de magnitude para a corrente i_1 a ser injetada na rede elétrica. Percebe-se ainda, uma retroalimentação da tensão v_2 que é utilizada por um PLL que fornece a sincronização da corrente. O PLL é o baseado em geração de sinal ortogonal, conforme descrito em (Subramanian and Kanagaraj, 2014). Na malha externa, emprega-se um proporcional-integral (PI), com ganhos K_{P2} e K_{I2} , que zera o erro entre V_{CC} e um valor de referência de

250V. Também apresenta-se uma malha interna para o controle da corrente i_1 . Nesta malha, aplica-se um controlador proporcional ressonante com ganho proporcional K_p e ganho ressonante K_R . W_o é a frequência de ressonância do controlador e W_c , sua frequência de corte. A saída desta malha é a tensão de referência v_{ref} para o PWM da ponte H.

Para melhorar seu comportamento dinâmico, propõem-se neste artigo, uma alimentação direta desta malha por potência de saída do painel fotovoltaico. Essa alimentação de potência é escalonada de acordo com a seguinte consideração. Considerando que o processamento da energia oriunda do painel ocorre sem perdas, então a potência na saída do inversor é fornecida pelo produto $V_{PC}I_{PC}$. Assim, é possível afirmar que o pico da corrente associada a esta potência é expresso por $\sqrt{(2)V_{PC}I_{PC}/127}$, já que a tensão eficaz no lado da rede é de 127V. Dessa forma, o escalonamento E é fornecido por:

$$E = \frac{\sqrt{2}}{127}. \quad (1)$$

Ainda na Figura 1, observa-se um conversor *Boost* que opera como atuador regulando a tensão de saída no painel, V_{PV} para um valor de referência. Esta referência é fornecida por um algoritmo de MPPT que assegura que se extraia a máxima potência do painel, para uma determinada condição de irradiação e temperatura. Um controlador PI, com ganhos K_{P1} e K_{I1} zera o erro entre o valor medido de V_{PV} e a referência.

A tensão do link CC entre o conversor CC-CC e o inversor é sustentada, V_{CC} , por um capacitor C_{CC} de valor 1,5mF. Este valor considera a expressão:

$$C_{CC} = \frac{P_{PV}}{2\pi f V_{CC} \Delta V_{CC}}, \quad (2)$$

em que P_{PV} é a potência que o painel, ou conjuntos de painéis podem fornecer ao sistema e f é a frequência fundamental do painel. ΔV_{CC} é a variação de tensão permitida aplicado sobre o capacitor (Hu et al., 2013).

5 Filtro LLCL

As topologias mais comuns de filtros para conexão de SFs à rede elétrica são que utilizam um LC ajustado ou um filtro LCL. Neste trabalho, investiga-se a topologia LLCL e propõe-se um procedimento para seu projeto, semelhante àquele apresentada em (Wu et al., 2012). O filtro LLCL está desenhado Figura 1. A resistência R , em série com o indutor L_3 e o capacitor C é muito pequena e tem o valor de $0,1\Omega$ que modela as perdas joule no enrolamento do indutor. A função de transferência entre a tensão de saída, V_2 e a de entrada, V_1 , do filtro é fornecida por:

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{L_2 C s^2 + R C s + 1}{(L_1 + L_2) C s^2 + R C s + 1}, \quad (3)$$

e a função de transferência relacionando a corrente i_2 e a tensão v_1 é:

$$\frac{I_2(s)}{V_1(s)} = \frac{L_3 C s^2 + 1}{(L_1 L_2 C + (L_1 + L_2) L_3 C) s^3 + (L_1 + L_2) s}, \quad (4)$$

Os diagramas de bode para estas duas funções de transferência são mostrados nas Figuras 2 e 3.

O procedimento para o projeto do filtro é descrito nos passos abaixo:

- Seleciona-se um valor para o capacitor baseado em sua capacidade de absorção de potência reativa em condições nominais. Este valor é limitado pela condição (Wu et al., 2012):

$$C = \frac{5\% P_n}{V_r^2 \omega}, \quad (5)$$

em que P_n é a potência nominal e V_r é a tensão nominal da rede. Neste paper, encontrou-se o valor de $C = 2,5\mu F$.

- Define-se L_3 de tal forma que a impedância seja nula no braço $L_3 C$ para 20kHz. Dessa forma $L_3 = 25,33\mu H$.
- Define-se o valor de L_1 de tal modo que a ondulação (*ripple*) de corrente, ΔI_1 seja pequena. Neste trabalho, utiliza-se a expressão (Teodorescu et al., 2011):

$$\Delta I_1 = \frac{1}{n} \frac{V_{CC}}{L_1 f_c}, \quad (6)$$

em que n é um coeficiente que cresce com os níveis de tensão produzidos pela modulação PWM e f_c é a frequência de chaveamento utilizada igual a 20 kHz. No presente caso $n = 2$. O valor encontrado para L_1 foi de 5 mH.

- Determina-se o valor de L_2 no intuito de mitigar harmônicos de corrente em torno do dobro da frequência de chaveamento da ponte H. Isso se justifica, ao se observar a Figura 3, na qual já existe uma ressonância que mitiga as frequências em torno de 20kHz. Obviamente, esta característica foi obtida pelos ajustes de C e L_3 . Dessa forma, L_2 é ajustado para que os harmônicos em torno 40kHz sejam inferiores à 0.3%. Este valor é recomendado pela norma IEEE 519-1992, (*IEEE-Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*, 1992). Outro fator a ser considerado, é o tipo de modulação empregado pelo inversor, pois para cada técnica de modulação, gera-se um conteúdo espectral. Em nosso trabalho, utiliza-se a modulação PWM com amostragem natural por portadora dente de serra, descrita em (Holmes and Lipo, 2003). O valor de L_2 foi fixado em 0,23 mH

Para mostrar a efetividade do filtro projetado de acordo com o procedimento acima, o espectro da corrente em sua saída é comparado com o espectro da corrente obtido ao se utilizar um filtro com topologia LCL

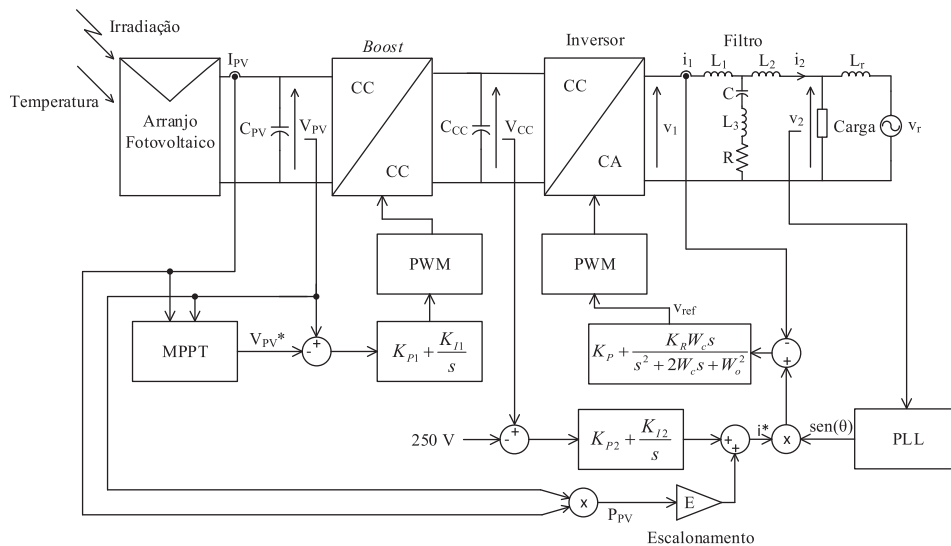


Figura 1: Sistema fotovoltaico simulado em ambiente Matlab/Simulink.

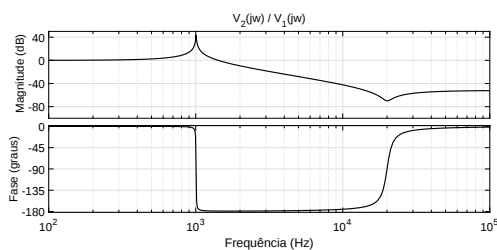


Figura 2: Bode para a função de transferência $V_c(s)/V(s)$.

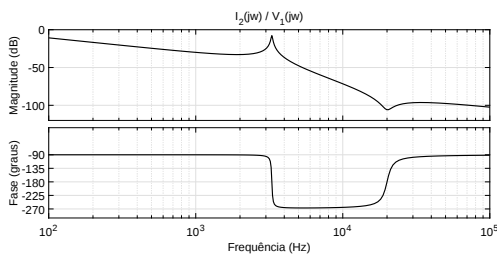


Figura 3: Bode para a função de transferência $I_f(s)/V(s)$.

e projetado de acordo com o descrito em (Teodorescu et al., 2011). Este espectros são mostrados nas Figuras 4 e 5. Os parâmetros do filtro LCL são $L_1 = 5$ mH, $C = 2,5 \mu$ F e $L_2 = 0,23$ mH. Nota-se dos dois espectros, que a topologia LLCL é mais eficiente, neste exemplo, na mitigação dos harmônicos de corrente. A distorção harmônica total (DHT) é de 0,12% contra 0,35% obtidos pela filtro LCL. Isso explica-se pelo pico de ressonância em 20kHz do filtro LCL observado na Figura 3. Este pico não está presente no bode do filtro LCL. Da figura, nota-se que após este pico, a taxa de decaimento de ganho do filtro é reduzida, o que não ocorre com o filtro LCL. Ainda assim, como existe um conteúdo harmônico significativo concen-

trado em 20kHz, a presença do pico nesta frequência, compensa o menor decaimento de ganho causado pela presença do filtro em série com o capacitor.

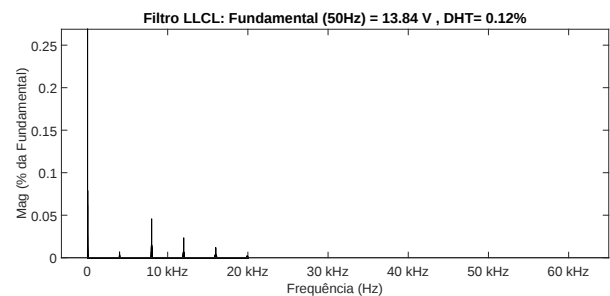


Figura 4: Espectro da corrente de rede na saída do filtro LLCL

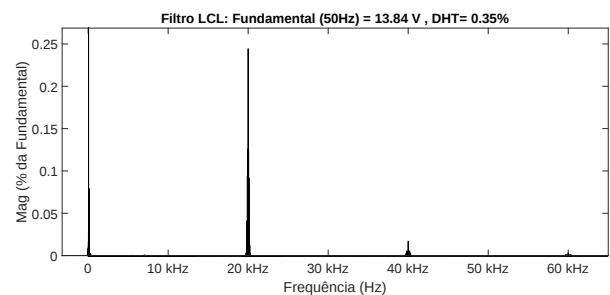


Figura 5: Espectro da corrente de rede na saída do filtro LCL

6 Controle com alimentação direta da potência CC

Neste trabalho, o sistema mostrado na Figura 1 apresenta uma alimentação direta de potência CC na malha de controle da corrente CA. É razoável supor que o comportamento dinâmico da corrente CA e também da tensão CC é fortemente influenciada pela potência

disponível do painel. Essa suposição pôde ser confirmada por meio de simulações. A potência disponível no painel, para uma dada temperatura, depende da irradiação, que, para efeitos de simulação, foi variada conforme mostra a Figura 6. Essa variação se realiza na forma de uma rampa e, portanto, parâmetros de mérito como *overshoot* ou tempo de assentamento não podem ser aplicados para avaliar o desempenho da técnica proposta. Assim, de modo incipiente, neste trabalho, realiza-se uma análise qualitativa da técnica proposta. Para verificar o efeito da referida alimentação, inicialmente, apresenta-se na Figura 7, os gráficos da corrente CA i_2 , e da tensão V_{CC} , indicados na Figura 1, sem a alimentação direta da potência. Os mesmos gráficos, obtidos com a alimentação são apresentados na Figura 8.

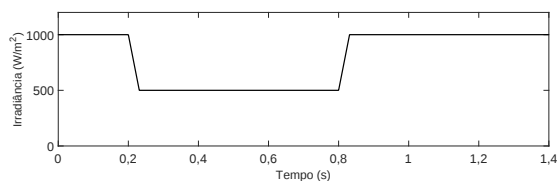


Figura 6: Variação da irradiação sobre o painel no período de simulação.

A compreensão dos resultados pode ser apoiado pela Figura 1. Nela, observa-se que a corrente de referência i^* é determinada pela combinação da influência da tensão V_{CC} e da potência P_{PV} , disponível na saída do painel solar. Na situação em que a alimentação direta de potência não é efetuada e há uma queda abrupta da irradiação, o capacitor C_{CC} é o único responsável por manter o nível de corrente demandado pelo sistema de controle. É preciso perceber que neste evento, sem a alimentação direta de potência, o nível de corrente demandado pelo sistema de controle não acompanha a mudança brusca da irradiação e muda gradualmente, como mostrado na Figura 7. Isso significa que é a tensão no capacitor que deve oscilar para um valor menor, a despeito do referência de 250V imposta pela malha de tensão. Na condição em que a alimentação de potência se faz presente, esta oscilação é muito menor. A Figura 9 mostra os gráficos para as potências ativas injetadas na rede, sem e com a alimentação direta de potência. Observa-se que as mudanças nos níveis de potência são mais rápidas e sem oscilações quando da presença da alimentação de direta. As oscilações de potência são causadas pelas oscilações na tensão V_{CC} .

Considerando que o sistema PV simulado tem como objetivos primário a injeção de corrente CA na rede elétrica, é desejável que isto se faça com uma menor oscilação de potência. Desse modo, é razoável argumentar que a introdução da alimentação direta aprimora o controle do sistema PV. Vale salientar que a análise qualitativa elaborada nesta seção é somente possibilitada pela simulação completa do sistema PV.

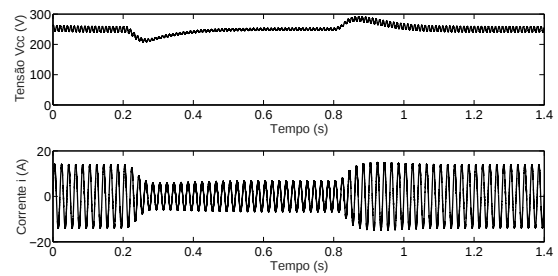


Figura 7: Dinâmica da tensão CC e da corrente CA sem alimentação direta de potência.

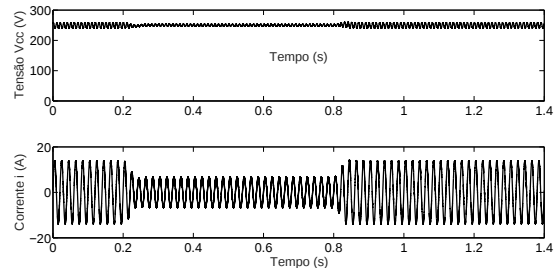


Figura 8: Dinâmica da tensão CC e da corrente CA com alimentação direta de potência.

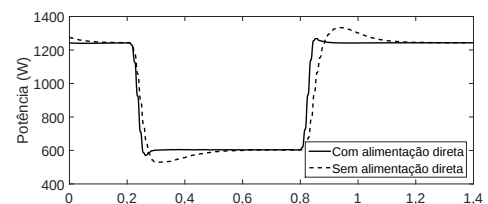


Figura 9: Potência no lado CC injetado na rede para os casos sem e com a alimentação direta de potência.

7 Conclusões

Neste trabalho, um sistema fotovoltaico conectado a uma rede de distribuição foi simulado em ambiente Simulink/Matlab. Para mitigação dos harmônicos de corrente injetados através da ponte H, utilizou-se de um filtro com topologia LLCL que obteve melhores resultados do que os obtidos com o filtro de topologia LCL. Além disso, mostrou-se neste artigo que a alimentação direta da potência fornecida pelo painel fotovoltaico na malha de controle da corrente da rede é capaz de aprimorar a injeção de potência ativa frente a mudanças repentinas na irradiação solar. Obviamente, esta situação é perfeitamente usual em sistemas fotovoltaicos. Também, verificou-se um aperfeiçoamento no controle da tensão CC entre o conversor CC-CC e a ponte H. Vale salientar que a análise efetuada neste trabalho é primordialmente qualitativa e ainda carece de uma complementação sustentada em uma exploração matemática das funções de transferências envolvidas na dinâmica da principais variáveis de interesse do sistema simulado. Outro aspecto a ser salientado é a escolha de simulações de variações de irradiação em

forma de rampa. Variações nesta forma se coadunam melhor com as ocorrências em situações reais. Parâmetros de mérito devem ser definidos para avaliação das técnicas aplicadas para estas variações. Esta tarefa está reservada a ser apresentada em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem o suporte financeiro oferecido através do projeto Universal CNPq-*n*º 447674/2014-5.

Referências

- Abdelsalam, A. K., Massoud, A. M., Ahmed, S. and Enjeti, P. N. (2011). High-performance adaptive perturb and observe mppt technique for photovoltaic-based microgrids, *IEEE Trans. Power Electron.* **26**(4): 1010 – 1021.
- Bifaretti, S., Lidozzi, A., Solero, L., and Crescim-bini, F. (2015). Anti-islanding detector based on a robust pll, *IEEE Trans. Ind. Applications* **51**(1): 398–405.
- Holmes, D. G. and Lipo, T. A. (2003). *Pulse width modulation for power converters*, IEEE Press, USA.
- Hu, H., Harb, S., Kutkut, N., Batarseh, I. and Shen, Z. J. (2013). Single-phase grid voltage attributes tracking for the control of grid power converters, *IEEE Trans. Power Electron.* **28**(6): 2711–2726.
- IEEE-Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems* (1992). IEEE Standard 519-1992.
- Killi, M. and Samant, S. (2015). Modified perturb and observe MPPT algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **62**(9): 5549 – 5559.
- Pandey, A., Dasgupta, N. and Mukerjee, A. K. (2011). High-performance algorithms for drift avoidance and fast tracking in solar mppt system, *IEEE Trans. Energy Conversion* **23**(2): 681–689.
- Subramanian, C. and Kanagaraj, R. (2014). Single-phase grid voltage attributes tracking for the control of grid power converters, *IEEE Trans. Power Electron.* **2**(4): 1041–1048.
- Sumathi, S., Kumar, L. A. and Surekha, P. (2015, Chap. 1). *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Technique*, first edn, Springer, Switzerland.
- Tedde, M. and Smedley, K. (2014). Anti-islanding for three-phase one-cycle control grid tied inverter, *IEEE Trans. Power Electron.* **29**(7): 3330–3345.
- Teodorescu, R., Liserre, M. and Rodríguez, P. (2011). *Grid converter for photovoltaic and wind power systems*, John Wiley, United Kingdom.
- ANEEL (2016). Energia solar, <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/>.
- Velasco, D., Trujillo, C., Garcerá, G. and Figueres, E. (2011). An active anti-islanding method based on phase-pll perturbation, *IEEE Trans. Power Electron.* **26**(4): 1056 – 1066.
- Wu, W., He, Y. and Blaabjerg, F. (2012). An llcl power filter for single-phase grid-tied inverter, *IEEE Trans. Power Electron.* **27**(2): 782–789.
- Xin, H., Liu, Y., Qu, Z. and Gan, D. (2014). Distributed control and generation estimation method for integrating high-density photovoltaic systems, *IEEE Trans. Energy Conv.* **56**(4): 988–996.