

SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE COM RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA E CONTROLE POR CORRENTE MÉDIA

Caio Kerson Oliveira Veras (UFC) - caiokerson@dee.ufc.br

Bruno Alves (UFC) - b.alves@dee.ufc.br

Robson Taveira Gonçalves da Silva (UFC) - robsontaveira1@gmail.com

Fernando Luiz Marcelo Antunes (UFC) - fantunes@dee.ufc.br

Túlio Pinheiro Moura (UNILAB) - pinheirutulio@unilab.edu.br

MICHAEL PABLO FRANÇA SILVA (DAS) - michaelfranca@unilab.edu.br

Resumo:

Este trabalho apresenta um sistema fotovoltaico (FV) de 5,2kWp conectado à rede, com implementação da técnica Perturbe&Observe para busca do ponto de máxima potência (MPPT - Maximum Power Point Tracker) com níveis de radiação solar variando entre 700 W/m² e 1000 W/m². A conexão do sistema FV com a rede foi realizada através do controle por corrente média. Este controle tem característica de monitorar a tensão do barramento CC-CA e a corrente do inversor para injeção da corrente em sincronismo com a rede. O circuito foi simulado por meio do Software PSIM. A utilização de um filtro passivo LC série permitiu a injeção da corrente com forma de onda senoidal. O fator de potência mostrou-se elevado 0,98 com baixa taxa de distorção harmônica de 10%.

Palavras-chave: : *Energia Solar Fotovoltaica, Injeção na rede, Taxa de Distorção Harmônica*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos*

SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE COM RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA E CONTROLE POR CORRENTE MÉDIA

Bruno Alves Sousa da Silva – b.alves@dee.ufc.br
Caio Kerson Oliveira Veras – caiokerson@dee.ufc.br
Robson Taveira Gonçalves da Silva – robsontaveira1@gmail.com
Fernando Luiz Marcelo Antunes – fantunes@dee.ufc.br
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Túlio Pinheiro Moura – pinheirotulio@unilab.edu.br
Michael Pablo França Silva – michaelfranca@unilab.edu.br
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Resumo. Este trabalho apresenta um sistema fotovoltaico (FV) de 5,2kWp conectado à rede, com implementação da técnica *Perturbe&Observe* para busca do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracker*) com níveis de radiação solar variando entre 700 W/m² e 1000 W/m². A conexão do sistema FV com a rede foi realizada através do controle por corrente média. Este controle tem característica de monitorar a tensão do barramento CC-CA e a corrente do inversor para injeção da corrente em sincronismo com a rede. O circuito foi simulado por meio do Software PSIM. A utilização de um filtro passivo LC série permitiu a injeção da corrente com forma de onda senoidal. O fator de potência mostrou-se elevado 0,98 com baixa taxa de distorção harmônica de 10%.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Injeção na rede, Taxa de Distorção Harmônica

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de diversificar a matriz de produção de energia elétrica brasileira intensificou o uso das fontes de energias renováveis como complemento às fontes convencionais. Dentre estas, a energia solar fotovoltaica vem ganhando cada vez mais espaço, visto que o sistema é de fácil implantação; possui um baixo custo de manutenção; é uma tecnologia ideal para locais onde há maiores índices de radiação solar e, com o avanço tecnológico, o custo dos sistemas fotovoltaicos para implantação está em declínio (Coutinho, 2015).

O Brasil possui um grande potencial para gerar eletricidade a partir da conversão fotovoltaica. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, diariamente incide entre 4.500 Wh/m² a 6.300 Wh/m² no país. Tais dados demonstram que as condições brasileiras são favoráveis ao aproveitamento dessa fonte de energia, o que justifica sua inserção na matriz elétrica brasileira (Carvalho, 2013).

Nesta perspectiva, o presente trabalho busca contribuir para o estudo e desenvolvimento de um sistema fotovoltaico de 5,2 kWp conectado à rede elétrica. A técnica *Perturbe&Observe* (Meriem, 2017) foi utilizada para extrair a máxima potência dos módulos. A conexão do sistema com a rede foi realizada através de um inversor com técnica de controle da corrente de saída por valor médio. Este controle tem característica de monitorar a tensão do barramento CA e a corrente do inversor para injeção da corrente em sincronismo com a tensão da rede.

2. CIRCUITO PROPOSTO

2.1 Sistema Fotovoltaico interligado à rede

A Fig. 1 ilustra o sistema fotovoltaico com conectado à rede de distribuição. O sistema proposto é formado por um arranjo com 16 módulos FV, um barramento CC, um conversor CC/CC do tipo boost, um conversor CC/CA monofásico, um filtro passivo LC série e a rede da concessionária.

O Conversor boost é controlado pela técnica *Perturbe&Observe* para busca do MPPT. Este algoritmo atua periodicamente no incremento ou decremento da razão cíclica, alterando a tensão de saída do módulo e, conseqüentemente, a potência extraída. A cada mudança da razão cíclica, a potência obtida no ciclo atual é comparada com a potência do ciclo anterior. Dependendo do resultado obtido, o controlador decide pelo incremento ou decremento na próxima interação (Meriem, 2017).

A saída do conversor boost é conectada a entrada do conversor CC/CA ou inversor.

O inversor tem por objetivo converter energia de uma fonte CC em CA, com módulo e frequência desejados. A técnica de controle utilizada na estratégia de modulação foi a *Average Current Mode Control*, conhecida como controle por corrente média.

A técnica de controle por corrente média é muito utilizada em aplicações de eletrônica de potência nas quais a corrente média do indutor, no caso a corrente a ser injetada na rede, precisa ser controlada, apresentando uma inerente proteção de sobre corrente. É também muito utilizada para o controle de topologias que se utilizam de paralelismo de

conversores, como por exemplo os conversores intercalados (*interleaved converters*), possibilitando que o controle atue na correção de um eventual desbalanço de corrente.

O Controle Por Corrente Média também pode ser utilizado para controlar tensão de maneira indireta, ou seja, o compensador de corrente comparando a amostra de corrente média no indutor, colhida pelo sensor, com um sinal de referência proveniente da saída de uma malha de tensão efetua ação de controle. Trata-se de um controle cascata no qual a malha de corrente é a malha mais interna e possui como referência a saída da malha de tensão (malha externa).

Um filtro LC série é conectado na saída do inversor com a finalidade de reduzir as distorções harmônicas, injetando uma corrente senoidal em sincronismo com a rede (Bezerra, 2010).

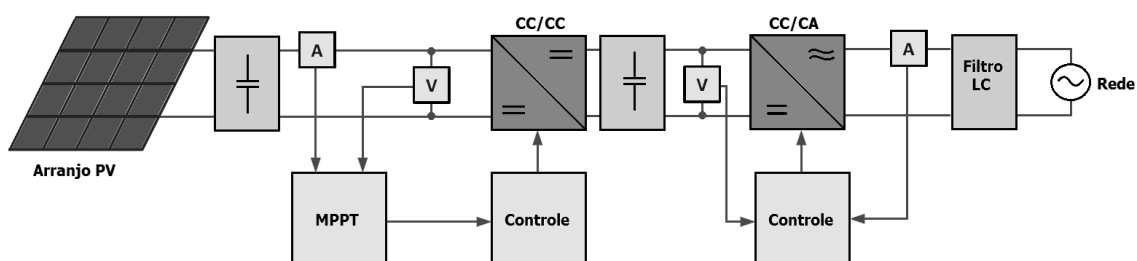


Figura 1 - Circuito proposto.

3. PROJETO

3.1 Arranjo FV

Para o arranjo fotovoltaico utilizou-se os painéis da marca *Bringing Green Power to Life* GCL-P6/72 cuja a potência nominal de cada módulo é 325Wp. O sistema é composto por dezesseis módulos rearranjados em quatro *strings* conectados em série-paralelo.

A Tab. 1 dispõe das especificações técnicas do módulo FV utilizado neste projeto.

Tabela 1 - Especificações técnicas do módulo FV.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima Potência (Pm)	325 W
Tolerância	0/5 W
Tensão de Máxima Potência (Vm)	37,6 A
Corrente de Máxima Potência (Im)	8,64 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	46,0 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	9,24 A

3.2 Determinação da capacitância do capacitor de barramento CC

A capacitância do capacitor de entrada pode ser calculada a partir da Eq. (1) (S. Junior, 2003).

$$C_i = \frac{L_b \cdot I_o \cdot \Delta I_{Li}}{V_i \cdot \Delta V_o} \quad (4)$$

Em que a C_i é a capacitância do capacitor do barramento CC, L_b é a indutância do conversor boost, I_o é a corrente nominal da entrada do boost, ΔI_{Li} é a ondulação de corrente na entrada boost, V_i é a tensão nominal de entrada do boost, ΔV_o é a ondulação na tensão de entrada do boost.

3.3 Equações, símbolos e unidades

A Tab. 2 dispõe das especificações adotadas para o conversor boost.

Tabela 2 - Especificações técnicas de projeto do boost.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tensão de entrada	$V_i = 150V$
Tensão de saída	$V_o = 400V$

Potência de saída	$P_o = 5,2kW$
Frequência de chaveamento	$f_s = 20kHz$
Ondulação da tensão do capacitor de saída	$\Delta V_{Co} = 20\%$
Ondulação de corrente de saída	$\Delta I_{Lo} = 20\%$

A indutância e capacitância do conversor boost pode ser determinada a partir da Eq. (2) e Eq. (3) (Hart, 2012), respectivamente.

$$L_b = \frac{V_i \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_L} \quad (2)$$

$$C_b = \frac{V_o \cdot D}{f_s \cdot R_o \cdot \Delta V_o} \quad (3)$$

Em que L_b é a indutância do conversor boost, C_b é a capacitância do capacitor do barramento CC.

3.4 Determinação da capacitância do capacitor de entrada do inversor

(S. Junior, 2003) determinou a capacitância do capacitor de barramento CC-CA a partir da Eq. (4). A tensão no barramento de entrada no inversor deve ser pelo menos, 30% maior que a tensão de pico na carga.

$$C_{barra} = \frac{2 \cdot P_i \cdot \frac{1}{f_r}}{(V_{máx} - V_{mín})^2} \quad (4)$$

Em que a C_{barra} é a capacitância do capacitor de entrada do inversor, P_i é a potência de entrada, f_r é a frequência da rede, $V_{máx}$ é a tensão máxima de entrada, $V_{mín}$ é a tensão mínima de entrada.

3.5 Inversor monofásico

A Tab. 3 dispõe das especificações adotadas para o inversor monofásico.

Tabela 3 - Especificações técnicas de projeto do inversor.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tensão de entrada	$V_{inv} = 400V$
Tensão de saída	$V_{o_rms} = 220V$
Potência de saída	$P_o = 5,2kW$
Frequência da rede	$f_r = 60Hz$
Ondulação da tensão do capacitor de saída	$\Delta V_{Co_inv} = 30\%$

3.6 Determinação do filtro LC série de saída

A indutância e a capacitância do filtro de saída são definidas pela Eq. (5) e Eq. (6) (Souza, 2000), respectivamente.

$$L_{inv} = \frac{(V_i - \sqrt{2} \cdot V_o) \cdot D}{2 \cdot f_s \cdot \Delta I} \quad (5)$$

$$C_{inv} = \frac{1}{L_{inv} \cdot \left(\frac{2\pi \cdot f_s}{10} \right)^2} \quad (6)$$

Em que L_{inv} e C_{inv} são a indutância e a capacitância do capacitor de entrada do filtro, respectivamente.

4. CIRCUITO DE CONTROLE

4.1 Ponto de máxima potência - MPPT

A seguir é apresentado o algoritmo utilizado para o rastreamento da máxima potência a ser extraída. Este algoritmo atua periodicamente no incremento ou decremento da razão cíclica, alterando a tensão de saída do módulo e, conseqüentemente, a potência extraída.

```
//Definição das Variáveis//
static double Potencia_lida, D=0.625, D1dt, Vi, Ii;
static double dt, Pn1=0, Vn1=0;
//Cálculos de Referência//
Vi=x1;
Ii=x2;
dt=0.015;
//Controlador//
Potencia_lida = (Vi * Ii); // cálculo da potência lida
if(Potencia_lida > Pn1 )
{
    D1dt=D+dt;
}
else
{
    D1dt=D-dt;
}
if(D1dt >=0.95)
{
    D1dt =D-dt;
}
if(D1dt < 0.625)
{
    D1dt =0.625;
}
Pn1=Potencia_lida;
D=D1dt;
y1=D1dt;
y2=Pn1;
```

A cada incremento ou decremento da razão cíclica, a potência obtida no ciclo atual é comparada com a potência do ciclo anterior com finalidade de obter a máxima potência.

4.2 Controle por corrente média

O controle do inversor tem como objetivo manter a tensão do barramento no valor de referência, e sincronizar a corrente injetada com a tensão da rede.

A Fig. 2 ilustra o diagrama de bloco do controle utilizado.

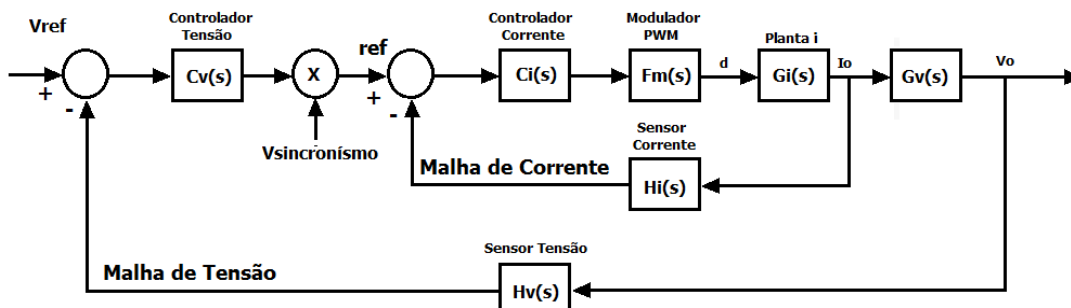


Figura 2 - Diagrama de blocos do circuito de controle.

O compensador necessita de uma amostra de corrente e um sinal obtido da malha externa de tensão, para efetuar a ação do controle.

A função de transferência da planta de malha interna é dada pela Eq. (7).

$$G_i(s) = \frac{i_L}{d} = \frac{(V_i \cdot C - C \cdot R_c \cdot D \cdot I_L) s - D \cdot I_L}{L \cdot C \cdot s^2 + C \cdot R_c \cdot D^2 \cdot s + D^2} \quad (7)$$

Em que $G_i(s)$ é a função de transferência da planta.

O ganho do modulador PWM é dado por Eq. (8).

$$F_m(s) = \frac{1}{V_D} \quad (8)$$

Em que $F_m(s)$ é o ganho do modulador.

A partir das especificações da malha de corrente, calculou-se o ganho de retroalimentação negativa conforme apresentado na Eq.9.

$$H_i(s) = \frac{i_{ref}}{i_L} \quad (9)$$

Em que $H_i(s)$ é o ganho de retroalimentação negativa.

Dessa forma, a função de transferência de laço aberto sem o controlador é dada por Eq. (10).

$$FTLA_{sci}(s) = G_i(s) \cdot F_m(s) \cdot H_i(s) \quad (10)$$

Em que $FTLA_{sci}(s)$ é a função de transferência de laço aberto sem o controlador.

A Fig. 3 ilustra o diagrama de Bode da $FTLA_{sci}(s)$.

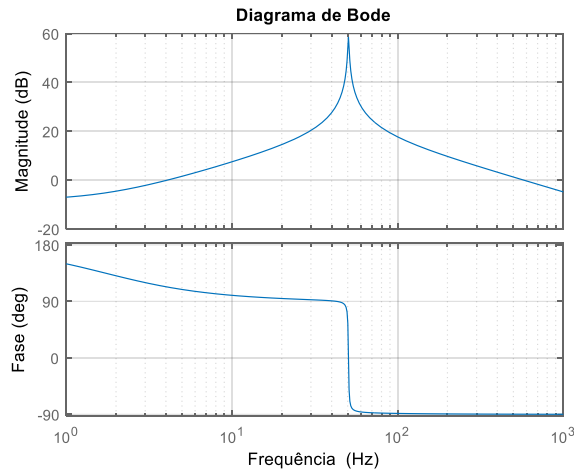


Figura 3 - Diagrama de Bode da função de transferência de laço aberto sem o controlador.

A frequência de cruzamento adotada para a função de transferência deve ser menor ou igual a 1/4 da frequência de chaveamento, conforme apresentado na Eq. (11).

$$f_{cv} = \frac{f_s}{4} = 5kHz \quad (11)$$

Em que f_{cv} é a frequência de cruzamento adotada.

A Fig. 4 apresenta o circuito do controlador de tensão a ser utilizado. O compensador selecionado para o projeto foi o PI (Proporcional integrador) com filtro. Os elementos do circuito podem ser determinados de acordo com (Lei, 2004).

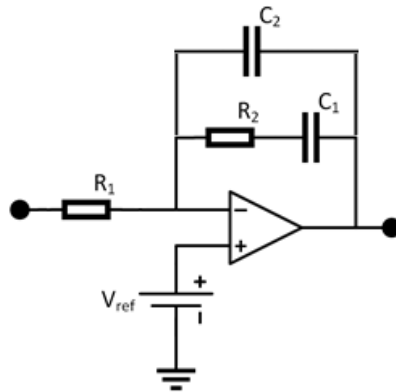


Figura 4 - Circuito do compensador.

A Fig. 5 ilustra o diagrama de Bode da $FTLA_{sci}(s)$ com compensador.

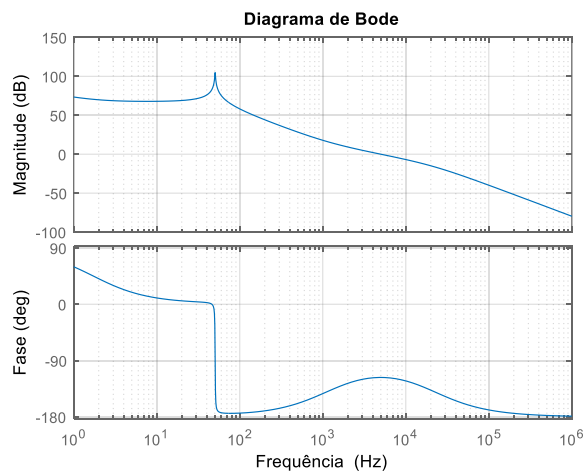


Figura 5 - Diagrama de Bode da função de transferência de laço aberto com o controlador.

A função de transferência da planta de malha externa por sua vez é dada pela Eq. (12).

$$G_v(s) = \frac{V_o}{i_L} = \frac{I_L \cdot L \cdot R_c \cdot C \cdot s^2 + (I_L \cdot L \cdot s + C \cdot R_c \cdot D \cdot V_i) s + D \cdot V_i}{C \cdot R_c \cdot D \cdot I_L - C \cdot V_i + D \cdot I_L} \quad (12)$$

Em que $G_v(s)$ é a função de transferência da planta.

O ganho do modulador PWM é dado por Eq. (13).

$$F_m(s) = \frac{1}{V_D} \quad (13)$$

Em que $F_m(s)$ é o ganho do modulador.

A partir das especificações da malha de corrente, calculou-se o ganho de retroalimentação negativa conforme apresentado na Eq. (14).

$$H_V(s) = \frac{V_{ref}}{V_o} \quad (14)$$

Em que $H_V(s)$ é o ganho de retroalimentação negativo.

Dessa forma, a função de transferência de laço aberto sem o controlador é dada por Eq. (15).

$$FTLA_{scv}(s) = G_v(s).F_m(s).H_V(s) \quad (15)$$

Em que $FTLA_{scv}(s)$ é a função de transferência de laço aberto sem o controlador.

A Fig. 6 ilustra o diagrama de Bode da $FTLA_{scv}(s)$.

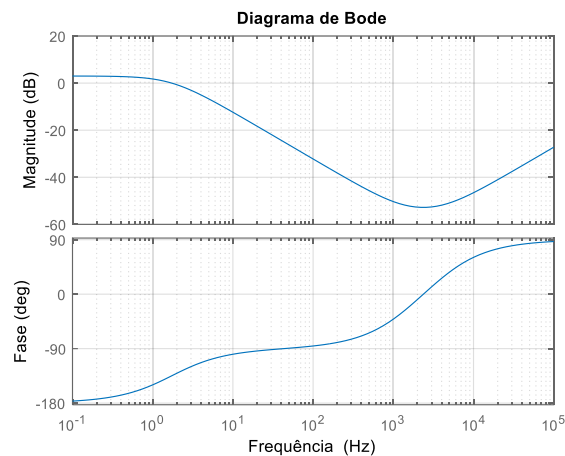


Figura 6 - Diagrama de Bode da função de transferência de laço aberto sem o controlador.

A frequência de cruzamento adotada para a função de transferência deve ser menor ou igual a 1/4 da frequência de chaveamento, conforme apresentado na Eq. (16).

$$f_{cv} = \frac{f_s}{4} = 5kHz \quad (16)$$

Em que f_{cv} é a frequência de cruzamento adotada.

O controlador utilizado é o mesmo ilustrado na Fig. 4. A Fig. 7 ilustra o diagrama de Bode da $FTLA_{scv}(s)$ com compensador.

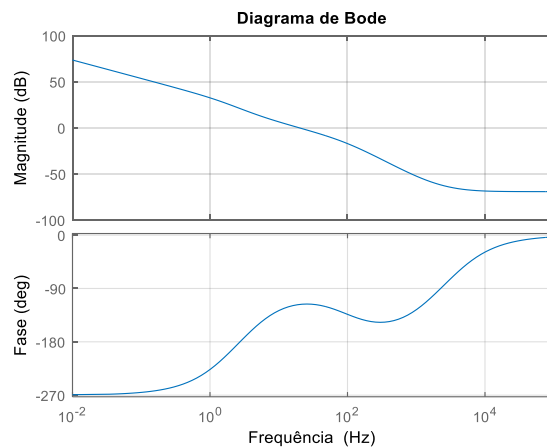


Figura 7 - Diagrama de Bode da função de transferência de laço aberto com o controlador.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

5.1 Tensão de saída do arranjo FV (barramento CC)

A Fig. 8 ilustra a tensão do barramento CC, saída do arranjo FV e entrada do conversor boost.

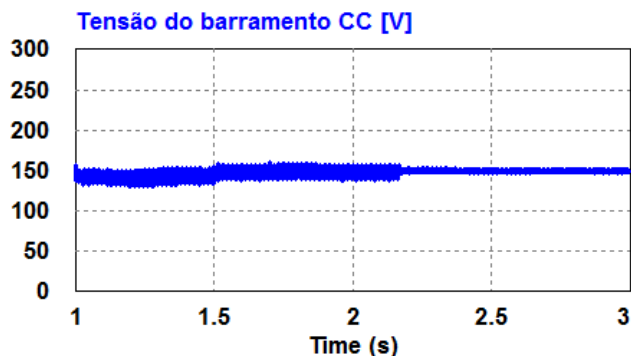


Figura 8 - Diagrama de Bode da função de transferência de laço aberto sem o controlador.

A tensão média do barramento CC permaneceu dentro do valor especificado de 150 V, com índice de radiação variando entre 700 e 1000 W/m², conforme ilustrado na Fig.9. Com o tempo de até 2,2 segundos tem-se a pior condição de radiação o que explica a oscilação no valor da tensão do barramento CC. Contudo o valor médio permaneceu em 150V. Após esse tempo, a condição de 100W/m² é adotada, o sistema passa a ter um comportamento mais estável, permitindo a extração da máxima potência dos painéis.

5.2 Busca do ponto de máxima potência - MPPT

A Fig. 9 ilustra a máxima potência extraída do painel GCL-P6/72 para cada nível de radiação.

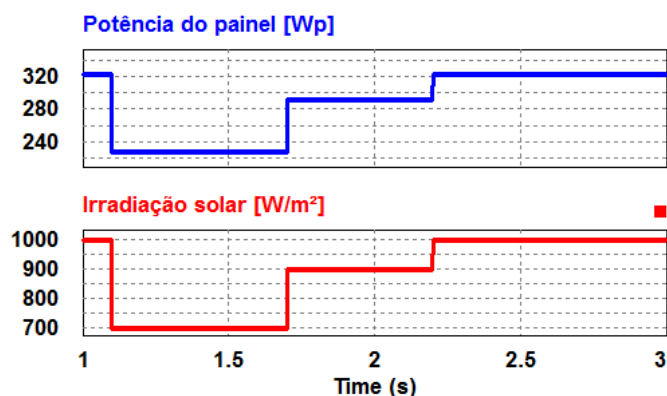


Figura 9 - Máxima potência extraída para cada nível de radiação.

A técnica do Pertube&Observe atuou procurando localizar o ponto de máxima potência de acordo com a nível de irradiação disponível no momento.

5.3 Tensão de saída do conversor boost

A Fig. 10 ilustra a tensão de saída do boost. Essa tensão é entrada do inversor e deve ser pelo menos 30% maior em relação a tensão de saída. Para tensão de saída de 220 V é definiu-se 400 V na entrada.

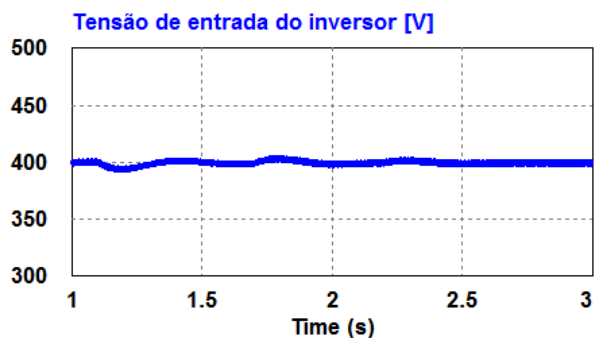


Figura 10 - Tensão de saída do conversor boost (entrada do inversor).

5.4 Corrente a ser injetada na rede

A Fig. 11 ilustra a tensão da rede e a forma de onda da corrente a ser injetada.

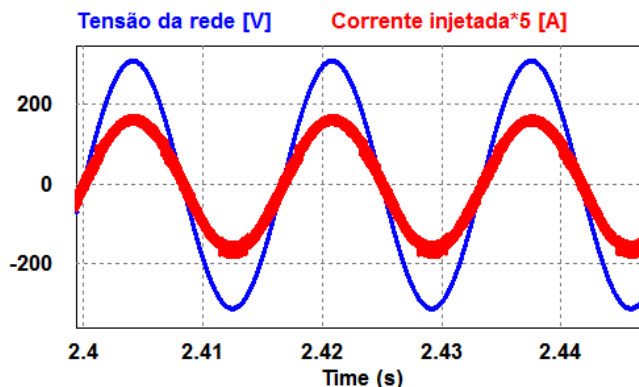


Figura 11 - Tensão da rede e corrente injetada.

A corrente segue a forma de onda senoidal da tensão da rede e em sincronismo. A fator de potência determinado foi de 0,98 com taxa de distorção harmônica de 10%.

5.5 Análise de harmônicos

A Fig. 12 apresenta a análise harmônica da corrente injetada na rede.

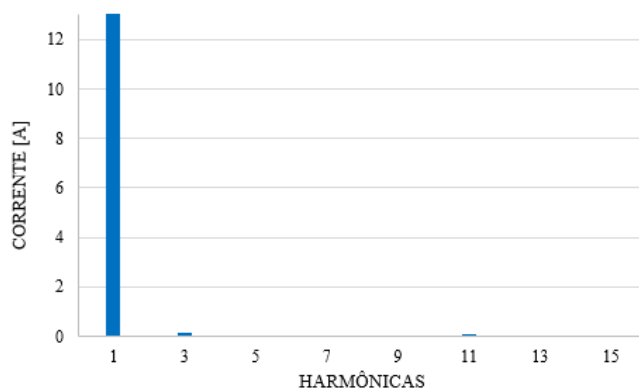


Figura 12 - Conteúdo harmônico da corrente injetada na rede.

Observa-se que a corrente injetada possui uma característica senoidal com a eliminação ou atenuação de todas as harmônicas ímpares. Isso explica o elevado fator de potência de 0,98 e o baixo valor de THD de 10%. Dessa forma, os valores para as harmônicas estão de acordo com a norma IEC-61000-3-4 para aplicações industriais.

6. CONCLUSÃO

A energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma boa alternativa para diversificação da matriz energética, principalmente em países com altos índices de radiação solar durante todo o ano, como é o caso do Brasil.

O sistema fotovoltaico analisado de 5,2kWp de potência instalada, com variação da radiação solar, entre 700 W/m² e 1000 W/m², e conectado à rede apresentou um alto fator de potência 0,98 e uma baixa taxa de distorção harmônica de 10%. A técnica do Perturbe&Observe buscou a máxima potência com o incremento ou decréscimo da razão cíclica. O controle por corrente média do inversor permitiu a injeção da corrente em sincronismo com a tensão da rede. O filtro LC série permitiu que a corrente injetada tivesse a forma de onda senoidal, eliminando o conteúdo harmônico.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos órgãos brasileiros de fomento à pesquisa CNPq e CAPES, pelo suporte financeiro, e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará pelo suporte e infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, L. D. S. Conversor CC-CA para aplicação em sistemas autônomos de energia elétrica. Dissertação de mestrado, departamento de engenharia elétrica, Universidade Federal do Ceara, 2010.
- COUTINHO, Giulia Duncan. Células solares. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Elétrica, 2015. 15 p.
- CARVALHO, Clázia Ramayana Freitas de. Sistema fotovoltaico isolado: uma aplicação prática no projeto xacupi. 2013. 46 f. Monografia (Especialização) - Curso de Formas Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- HART, Daniel W. Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos. São Paulo: Amgh Editora Ltda, 2012. 475 p.
- IEC. IEC 61000-3-2: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current < 16 A per phase). INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Emenda A14 2001.
- MERIEM, Ourahou; AYRIR, Wiam; HADDI, Ali. Optimization of the Perturbe & Observe technique for photovoltaic panel.
- LEI, W. H., MAN, T. K.: A General Approach for Optimizing Dynamic Response for Buck Converter. ON Semiconductor Application Note AND8143/D. 2004. pp. 1 to 9.
- PEREIRA, Enio Bueno et al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: Inpe, 2006.
- SOUZA, Fabiana Pottker. Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2000.
- S. JUNIOR, Edilson Mineiro et al. Suprimento de Energia para Iluminação Pública em Horário de Ponta Utilizando Energia Solar Edilson Mineiro S. Jr. Energias Renováveis, Fortaleza, v. 1, n. 1, p.246-251, 19 jan. 2003.

NETWORK PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING AND AVERAGE CURRENT CONTROL

Abstract. *This work presents a grid connected 5.2kWp photovoltaic (PV) system with the implementation of the Disturb & Observe technique for Maximum Power Point Tracker (MPPT) search with solar radiation levels ranging from 700 W / m² to 1000 W / m². The PV system was connected to the grid through medium current control. This control has the characteristic of monitoring the DC-AC bus voltage and the inverter current for injection of the current in sync with the grid. The circuit was simulated using the PSIM software. The use of a passive LC series filter allowed the injection of sine wave current. The power factor was high 0.98 with a low harmonic distortion rate of 10%.*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, Grid Injection, Harmonic Distortion Rate*