

CONTROLE DE UM INVERSOR MONOFÁSICO *T-TYPE NPC* EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Leonardo A. Rodrigues e Guilherme S. da Silva

Universidade Federal do Pampa
Alegrete, RS, Brasil, 97546-550

leonardoactrodrigues@gmail.com, guilhermesds@gmail.com

Resumo—Neste trabalho é realizado o projeto de um sistema de controle para a conexão de um inversor monofásico do tipo T à rede elétrica de distribuição. O sistema de controle é composto por um controlador Proporcional Ressonante (PR), um controlador Proporcional Integral (PI) e o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) utilizando uma adaptação do método Perturba e Observa (P&O) para sistemas fotovoltaicos. A proposta de modificar o método P&O fornece para o rastreamento da máxima potência uma resposta com baixo erro em regime permanente e adequada resposta transitória. São apresentados resultados de simulação da conexão do sistema fotovoltaico à rede elétrica de distribuição sob condições de variação de irradiância e variação da tensão da rede elétrica.

Palavras-chave — Controle de Sistemas, Inversor *T-Type NPC*, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, Sistemas Fotovoltaicos, Perturba e Observa

I. INTRODUÇÃO

O Sol é a principal fonte de energia do nosso planeta. A superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar, nas formas de luz e calor, suficiente para suprir milhares de vezes as necessidades mundiais durante o mesmo período. Apenas uma pequena parcela dessa energia é aproveitada. Mesmo assim, com poucas exceções, praticamente toda a energia usada pelo ser humano tem origem no Sol [1].

A demanda pela geração de energia elétrica através das fontes renováveis vem aumentando cada vez mais, concentrando os interesses principalmente em energia solar e eólica. Considerando a inserção cada vez maior da geração distribuída na rede elétrica, foi desenvolvido este trabalho envolvendo uma otimização para a conexão de um sistema fotovoltaico com a distribuição de energia elétrica. Por sua vez, a integração deste tipo de geração exige uma estabilidade controlada para sua conexão, enquanto que a eletrônica de potência desempenha um papel fundamental nesse âmbito, contribuindo com uma inserção eficiente e de fácil controle.

Desta forma, a escolha da topologia *T-Type NPC* (*Neutral Point Clamped*) para aplicação neste trabalho foi pela van-

tagem de possuir um ponto neutro no braço central do conversor quando comparado ao inversor ponte-completa. Neste conversor, a tensão de bloqueio do ponto neutro é a metade da tensão do barramento CC, enquanto que para os interruptores do inversor meia ponte convencional a tensão de bloqueio é a tensão do barramento CC.

Além disso, a topologia apresenta alta eficiência para aplicações com frequência de chaveamento abaixo de 20 kHz, devido a baixas perdas no circuito, apresentando portanto, resultados de melhor rendimento quando comparados a um conversor NPC convencional de dois níveis (2N) [2]-[3].

Em aplicações como o processamento de energia fotovoltaica, a eficiência é uma questão importante. Frequências de comutação médias (algo entre 10 e 20 kHz) são utilizadas para obter componentes passivos mais baratos. Apesar disso, a frequência de comutação pode ser elevada a uma magnitude acima de 20 kHz em aplicações residenciais, a fim de evitar ruído audível [4]. A topologia *T-Type* já possui uma eficiência maior do que o NPC convencional [5],[6] e vem sendo empregada recentemente para sistemas fotovoltaicos conectados à rede principalmente devido à possibilidade de aterramento do ponto central do barramento CC [5]-[8]. Verifica-se em [9] bons resultados de um *T-Type NPC* monofásico para redução das componentes de modo comum, onde utilizou-se da estratégia de modulação apresentada em [10].

Neste trabalho, apresenta-se o projeto de um sistema inversor da topologia *T-Type NPC*, em conjunto com o desenvolvimento do algoritmo de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) baseado no método P&O (Perturba e Observa). Para isso, foi realizado um projeto de conversor Boost, operando em modo de condução contínua, para uma string de sete painéis fotovoltaicos (FVs), o qual foi implementado no software PSIM. Por fim, é apresentado o projeto do controlador PR (Proporcional Ressonante) para corrente e tensão utilizando o MATLAB/SIMULINK. Para validação da metodologia proposta resultados são apresentados para elevações de tensões e variações de irradiância, mostrando-se ser eficiente para a ligação de energia fotovoltaica à rede elétrica.

II. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

A. Estratégia MPPT

Os painéis FVs apresentam comportamentos variados para diferentes condições de operação, como pode ser observado na curvas $v_{pv} \times i_{pv}$ e $v_{pv} \times p_{pv}$ na Figura 1, a qual também indica o ponto de máxima potência (PMP) do painel fotovoltaico. Com isso, é desejável que o sistema sempre opere próximo desse ponto, para isso é utilizada a estratégia de MPPT.

A estratégia de MPPT utilizada se trata do método Perturba e Observa, a qual atua incrementando ou decrementando a razão cíclica, modificando a tensão de saída do sistema e, consequentemente a potência extraída, buscando alcançar o Ponto de Máxima Potência (PMP) do sistema instalado. Neste trabalho, foi realizado uma otimização deste método. Além disso, também foi utilizado uma aplicação de filtro de média móvel no algoritmo, inserindo na razão cíclica original uma média do valor em medições anteriores quando detectados picos elevados de potência em variações positivas bruscas, suavizando, portanto, a potência de saída. Para a detecção da variação, foi utilizado uma série de condições que justificam a atuação do filtro no algoritmo. Dentro da ramificação de verificação da potência anterior no P&O, caso a potência medida for maior que a anterior, e a variação de potência máxima for de caráter positivo, a condição ainda testa se a razão cíclica é maior que 106% da anterior. Com todas as condições satisfeitas, o algoritmo injeta a média dos últimos 4000 ciclos da razão cíclica. A Figura 2 apresenta o fluxoograma do algoritmo utilizado.

B. Conversor Boost

Para atingir a tensão adequada no barramento CC, com o objetivo de se conectar com o inversor sem necessitar de um arranjo elevado de painéis fotovoltaicos em série, foi utilizado o conversor Boost. Além disso, o mesmo também é utilizado para possibilitar o rastreamento do PMP. O conversor Boost está apresentado na Figura 3(a).

C. Inversor T-Type NPC CC/CA

O inversor é um circuito que permite transformar tensão contínua em tensão alternada. A Figura 3(b) mostra um inversor T-Type NPC, o qual possui um par de interruptores conectados em anti-paralelo com diodos. Os interruptores S1 e S2, assim como \bar{S}_1 e \bar{S}_2 , devem operar de forma complementar. Assim como no conversor NPC convencional, os

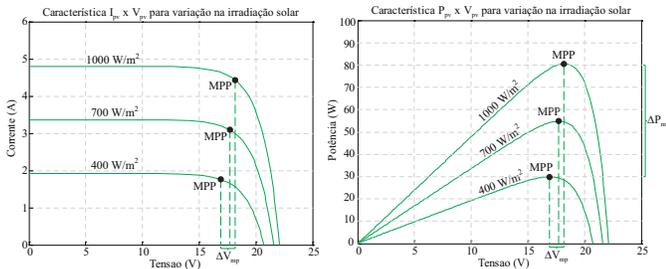


Figura 1: Curvas características de painéis fotovoltaicos

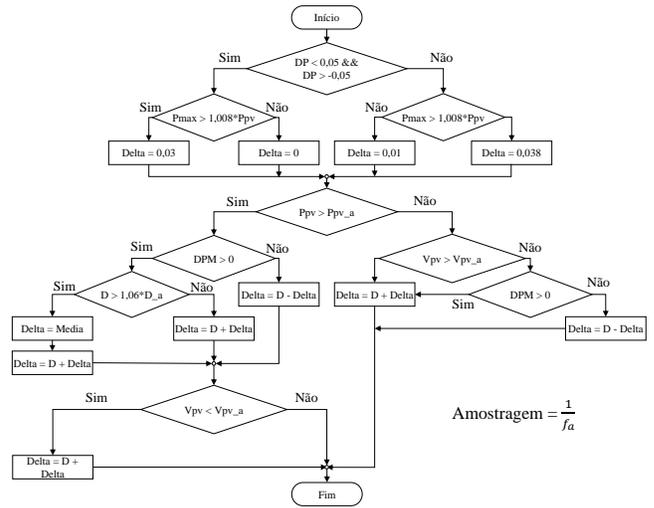


Figura 2: Método Perturba e Observa modificado

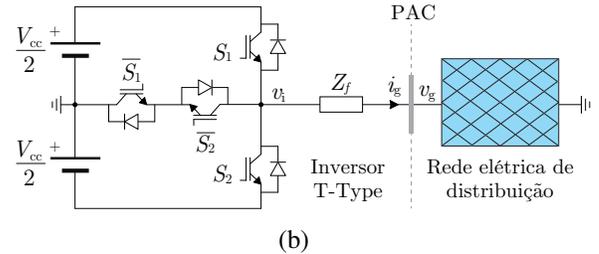
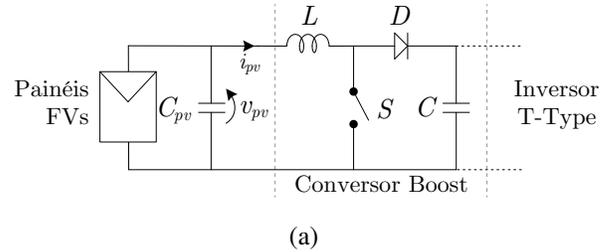


Figura 3: Sistema Fotovoltaico. (a) Conversor Boost. (b) Inversor T-Type NPC CC/CA

interruptores estão sujeitos a metade da tensão do barramento CC quando bloqueados [5].

A Figura 4 apresenta o módulo PWM utilizado para geração dos sinais de acionamento das chaves do índice de modulação do inversor.

III. PROJETO DOS ELEMENTOS PASSIVOS E DO SISTEMA DE CONTROLE

Para a conexão do sistema fotovoltaico apresentado neste trabalho foi proposta uma estrutura que inclui um conversor Boost e um inversor T-Type NPC CC/CA com um controle PR para a corrente e um controle PI para a tensão do barramento CC.

A. Projeto do Conversor Boost

A Tabela I apresenta os parâmetros iniciais do projeto do sistema de controle e do dimensionamento dos componentes

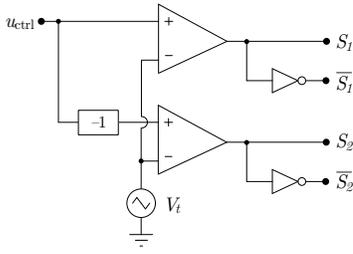


Figura 4: Estratégia de modulação PWM para o inversor *T-Type* NPC CC/CA

dos conversores.

Inicialmente, foi calculada a razão cíclica do conversor Boost, a partir de (1).

$$V_{pv}DT = (V_{pv} - V_{cc})(1 - D)T$$

$$\frac{V_{cc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1 - D} \quad (1)$$

Considerando os dados de tensão de entrada dos painéis FVs e do barramento CC do inversor obtém-se um valor de razão cíclica de 0,48.

a) Dimensionamento dos capacitores do barramento CC

O projeto do capacitor do barramento CC do inversor foi realizado com base em (2).

$$C = \frac{2P_o}{\Delta V_C V_p \omega} \quad (2)$$

onde $V_p = 127\sqrt{2}$, $\omega = 2\pi f$ e f é a frequência da tensão da rede elétrica.

Substituindo os valores da Tabela I em (2), obtém-se a capacitância do barramento de aproximadamente 10,2 mF.

c) Dimensionamento do indutor L

Tabela I: Parâmetros do sistema

Parâmetros	Valores
Tensão eficaz da rede $V_{g,rms}$	127 V
Tensão de entrada V_{pv}	208,6 V
Corrente de entrada I_{pv}	8,2 A
Potência do arranjo fotovoltaico P_{pv}	1715 W
Tensão do barramento CC V_{cc}	400 V
Corrente do barramento CC I_{cc}	4,29 A
Oscilação de corrente no indutor ΔI_L	10%
Oscilação de tensão no capacitor ΔV_C	1,25%
Frequência de operação (conversor) f_s	10 kHz
Frequência de operação (inversor) f_{si}	6 kHz
Frequência de atualização do MPPT f_a	200 Hz
Frequência da rede f	60 Hz

O projeto do indutor L é realizado a partir de (3).

$$L = \frac{V_{pv}D}{\Delta I_L f} \quad (3)$$

Substituindo os valores de entrada em (3), obteve-se o valor de 12,14 mH. Para verificar se o indutor está acima da indutância crítica para permitir a condução em modo contínuo, foi utilizada (4).

$$L_{crit} = \frac{V_{pv}(1 - D)D}{2fI_o} \quad (4)$$

Substituindo os valores, obteve-se o valor de 0,6 mH.

B. Projeto do filtro de saída do inversor *T-Type*

O circuito utilizado para o dimensionamento dos componentes do inversor *T-Type* NPC está apresentado na Figura 3(b). Neste caso, foi considerado o projeto do indutor de saída para a carga nominal do inversor, onde foi considerada uma resistência de saída equivalente à potência ativa do ponto de máxima potência dos painéis FVs.

A resistência de carga teórica para máxima potência é obtida por (5).

$$R = \frac{V_{g,rms}^2}{P_{pv}} \quad (5)$$

Substituindo os valores, obteve-se o valor de 9,4 Ω .

a) Dimensionamento do filtro Passa-Baixa

Para o projeto do filtro passa baixa para conexão com a rede, foi utilizada (6), enquanto que (7) apresenta a impedância a ser calculada para o indutor.

$$Z_L = Z_R \quad (6)$$

Onde:

- Z_L : Impedância do Indutor (Ω);
- Z_R : Impedância do Resistor (Ω);

Para:

$$Z_L = 2\pi L \frac{2f_{si}}{10} \quad (7)$$

Substituindo os valores em (5)-(7), obteve-se 1,24 mH.

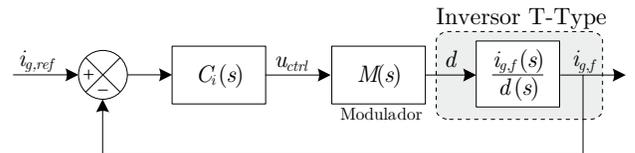


Figura 5: Malha de controle de corrente de saída

Tabela II: Dados Iniciais do Controlador PR

Parâmetros	Valores
Frequência de cruzamento por zero dB f_{cz}	600 Hz
Ganho do sensor de corrente G	1

Tabela III: Dados Iniciais para controlador PR para controle de corrente

Parâmetros	Frequência Natural	Amortecimento
Polo Complexo	60 Hz	0
Zero Complexo	60 Hz	0,7

C. Projeto do Controlador PR para controle de corrente

A Figura 5 apresenta as conexões entre o sistema de controle, sistema de modulação e conversor.

A Tabela II apresenta os dados iniciais para os dimensionamentos dos valores do controlador.

A partir da Figura 5 obtém-se da função de transferência de malha aberta compensada, dada por:

$$FTMA_{id}(s) = C_i(s)M(s)G_{id}(s) \quad (8)$$

onde a função de transferência do conversor, é dada por:

$$G_{id} = \frac{i_{g,f}}{d(s)} = \frac{V_{cc}}{s2L_f} \quad (9)$$

A Tabela III apresenta os valores iniciais para localizar a frequência de 600 Hz (uma década abaixo da frequência de operação).

A Equação (10) apresenta a função de transferência final do controlador de corrente.

$$C_i(s) = K_{PR} \frac{s^2 + 528s + 142000}{s^2 + 142000} \quad (10)$$

A partir de (8)-(10) e considerando $s = j2\pi f_{cz,id}$ obtém-se o ganho K_{PR} de 0,01158.

D. Projeto do Controlador PI para controle de tensão do barramento CC do inversor

A Figura 7 apresenta as conexões para o sistema de controle em tensão. A partir deste diagrama obtém-se da função de transferência de malha aberta compensada de tensão, dada por:

$$FTMA_{vi}(s) = C_v(s)FTMA_{id}(s)G_{vi}(s) \quad (11)$$

onde a função de transferência do conversor, é dada por:

$$G_{vi} = \frac{v_{cc}(s)}{i_{g,f}(s)} = \frac{M}{sC} \quad (12)$$

A Tabela IV apresenta os valores iniciais para localizar a frequência de 6 Hz (uma década abaixo da frequência de oscilação da tensão do barramento CC).

A partir dos parâmetros da Tabela IV obtém-se (13), sendo a função de transferência do controlador de tensão.

$$FTV_{cc}(s) = K_{PI} \frac{s + 37,7}{s} \quad (13)$$

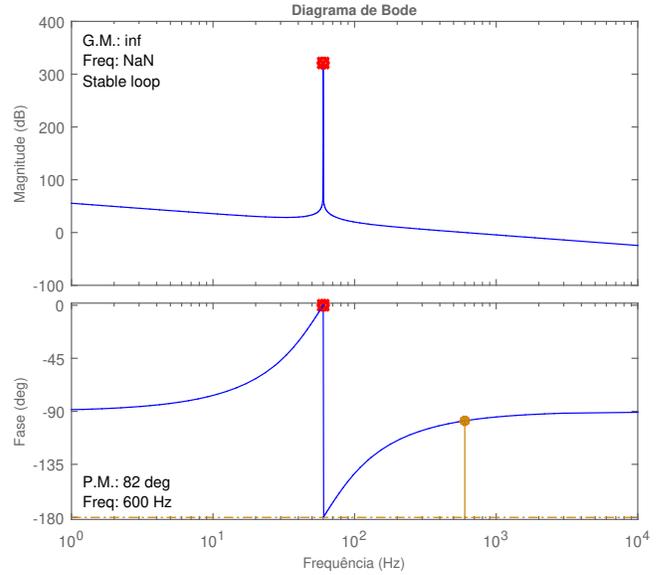


Figura 6: Diagrama de Bode para corrente

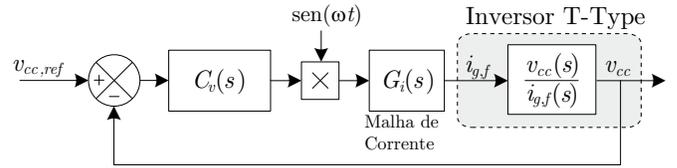


Figura 7: Malha de controle de tensão do barramento CC

A partir da função de transferência de malha aberta da malha de tensão, obtida a partir do diagrama de blocos da Figura 7, obtém-se o ganho K_{PI} de $-0,606$.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A Figura 8 apresenta o esquemático do sistema fotovoltaico conectado no conversor e à rede elétrica CA. Se trata de um arranjo de sete painéis do modelo KYOCERA-KD245GH-4FB. Neste diagrama é apresentado o bloco de MPPT utilizado para controlar a razão cíclica do PWM para controle do conversor boost.

Para obter resultados do circuito e do controle dimensionados, foi utilizado o *software* de simulação PSIM. A resposta do sistema foi analisada para uma variação de potência radiante, conforme Figura 10, e um surto de tensão de 20 V em $t = 6$ s na tensão da rede elétrica CA, com um tempo total de simulação para 10 s e considerando um step de irradiância em $t = 1$ s.

a) Resposta em forma de onda senoidal

A Tabela V apresenta os dados de entrada para a simulação de irradiância em senoidal.

A Figura 10 demonstra a variação de potência radiante com um tempo de simulação de 10 s. Neste caso, nota-se que em 1 s ocorre um degrau de irradiância de 0 para $1000W/m^2$,

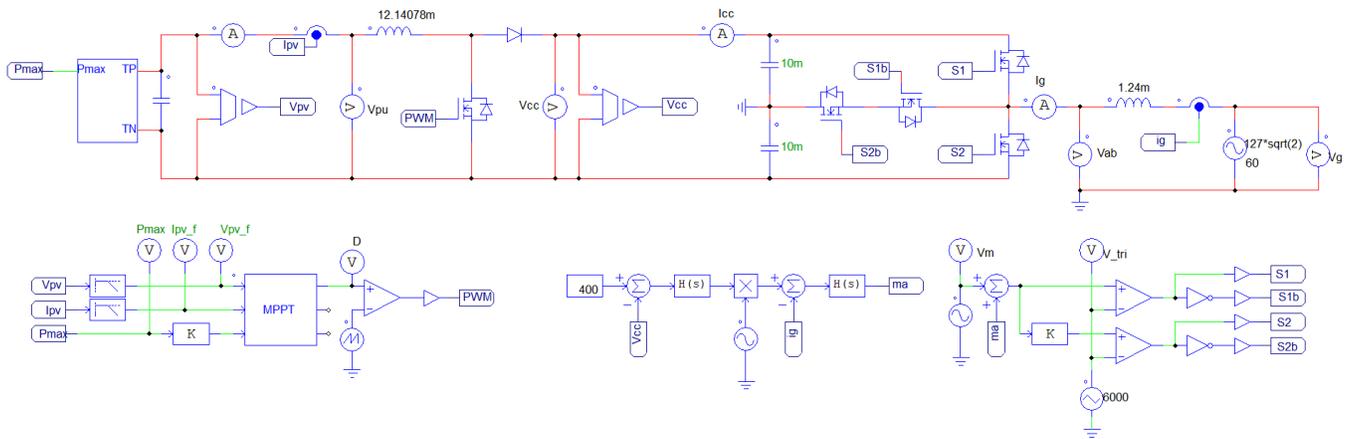


Figura 8: Esquemático do sistema fotovoltaico simulado

Tabela IV: Dados Iniciais do controlador PI para controle de corrente

Parâmetros	Localização	Amortecimento
Zero Real	-37,7 rad/s	1
Integrador	0	-1

Tabela V: Dados Iniciais para Resposta em Senoidal

Parâmetros	Valores
Frequência	0,2 Hz
Variação de irradiância	1000-0 W/m^2

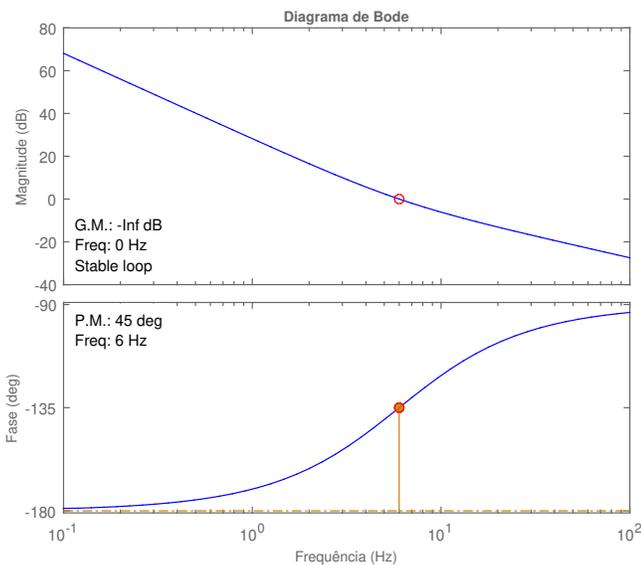


Figura 9: Diagrama de Bode para tensão

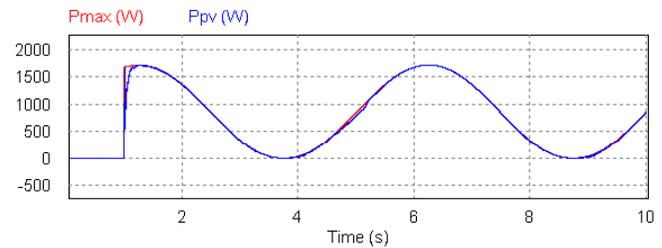


Figura 10: Variação de Potência Radiante

onde o algoritmo P&O modificado possibilita o rastreamento adequado do ponto de máxima potência.

Na Figura 11 são apresentadas as formas de onda de tensão do barramento CC V_{cc} medida e de referência. Neste caso, nota-se o adequado controle da tensão do barramento CC, mesmo em condições de variação de irradiância em 1 s, bem como em variações na tensão da rede elétrica em 6 s.

Já a Figura 12 demonstra a corrente de saída (I_g) do inversor conectado na rede, onde observa-se o correto controle da

corrente, uma vez que a amplitude corrente de referência foi modificada de acordo com a variação de potência ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico. Na Figura 13 apresenta uma ampliação da corrente de referência e da corrente injetada na rede elétrica, onde é possível observar a adequada operação da malha de controle de corrente.

A Figura 14 apresenta a variação da razão cíclica do MPPT durante a simulação e a Figura 15 demonstra a tensão na rede durante a simulação, onde observa-se o aumento da tensão da rede elétrica em 6 s.

V. CONCLUSÃO

A partir dos dados de simulações demonstrados, foi possível concluir que o projeto de controle do sistema inversor, em conjunto com o MPPT desenvolvido com base no método P&O, atendeu as expectativas dos objetivos primários. O tempo de resposta do sistema proposto é rápido para variações de irradiância solar mesmo com degrau de tensão na rede, menor de 500 ms, apresentando uma variação de apenas 0,5% da tensão de saída do barramento CC. Ainda observando que os testes realizados vão muito além das variações obtidas na

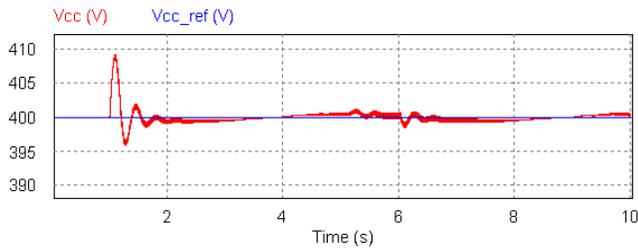


Figura 11: Variação de Tensão no Barramento CC

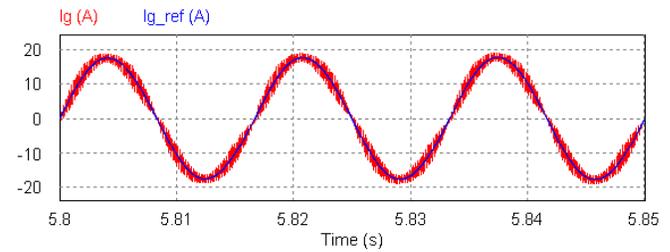


Figura 13: Ampliação do rastreamento de corrente

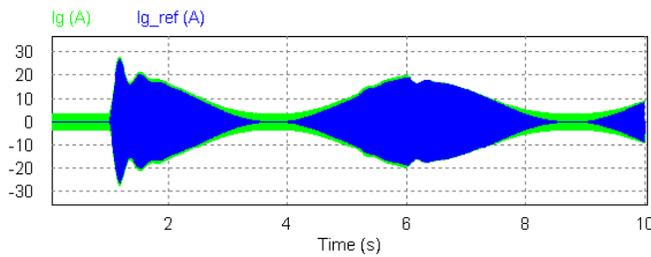


Figura 12: Variação de Corrente I_g com a referência

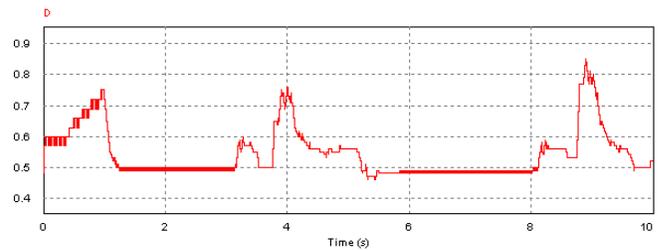


Figura 14: Variação de Razão Cíclica

prática, levando ao extremo a resposta do sistema como um todo, o que aprova o resultado com um bom índice de rastreamento de máxima potência. Através de simulações, observou-se que, caso a irradiância solar apresente elevada derivada, o sistema proposto pode não convergir no tempo esperado, contudo, tais variações são raramente encontradas no sistema prático. Futuras propostas estudam detectar a taxa de variação da irradiância, aumentando ou diminuindo a frequência de atualização do MPPT de acordo com a variação detectada, implementando por fim, um sistema com uma resposta ainda melhor que a desenvolvida até então.

REFERÊNCIAS

- [1] M. G. Villalva, (2015). Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, 2 edn, Érica.
- [2] T. Soeiro and J. Kolar, "Analysis of high-efficiency three-phase twoand three-level unidirectional hybrid rectifiers," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, pp. 3589–3601, Sept 2013.
- [3] T. Soeiro and J. Kolar, "The new high-efficiency hybrid neutral point-clamped converter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, pp. 1919–1935, May 2013.
- [4] F. G. Stein and Y. R. de Novaes, "Analysis of a snubber for the T-type NPC converter," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp. 239-244.
- [5] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-17, pp. 518–523, Sept 1981.
- [6] M. Schweizer and J. W. Kolar, "Design and Implementation of a Highly Efficient Three-Level T-Type Converter for Low-Voltage Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 2, pp. 899-907, Feb. 2013.

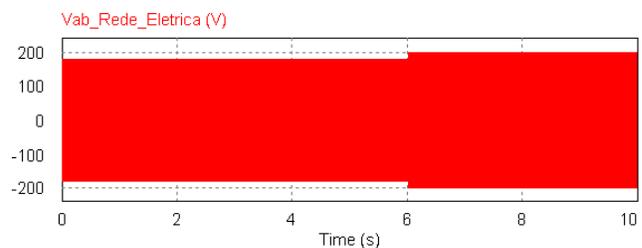


Figura 15: Variação de Tensão na Rede

- [7] J. Wang, X. Mu and Q. Li, "Study of Passivity-Based Decoupling Control of T-NPC PV Grid-Connected Inverter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 9, pp. 7542-7551, Sept. 2017.
- [8] Y. Xuan, M. Tian, X. Song, W. Chen, and X. Yang, "Design and implementation of a high power three-level T-type inverter for a photovoltaic system," in Proc. 9th Int. Conf. Power Electron. ECCE Asia, 2015, pp. 2808–2813.
- [9] C. A. Limones-Pozos, G. Vazquez, P. R. Martinez-Rodriguez, F. I. Mariscal and A. A. Valdez-Fernandez, "Analysis and design of single-phase T-type transformerless inverter for PV applications," 2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, 2017, pp. 1-6.
- [10] G. R. Moradi, E. Afshari, R. Rahimi, B. Farhangi and S. Farhangi, "Improvement of the modulation method for single-phase transformerless photovoltaic conergy inverter for reactive power injection capability," 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Shiraz, 2016, pp. 1312-1317