



ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UM CONVERSOR CC-CC BOOST QUADRÁTICO E DE UM INVERSOR FULL-BRIDGE PARA ALIMENTAÇÃO DE CARGAS CA

Julio Cesar dos Santos Junior*¹, Arthur Costa de Souza², Gustavo Brito de Lima¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

²ICT – Instituto de Ciências Tecnológicas – UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira

Resumo – Mesmo com o crescimento exponencial do uso de fontes alternativas de energia conectadas à rede, a exemplos de painéis fotovoltaicos que necessitam de irradiação solar e os aerogeradores que produzem energia por meio da velocidade dos ventos, fornecer energia as áreas remotas, principalmente ao meio rural, é um grande desafio do setor elétrico, devido ao fornecimento descontínuo da energia elétrica.

Diante desta conjuntura, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema em plataforma computacional que seja capaz de gerar energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos, para atender a demanda de lugares remotos que não possuem disponibilidade de rede elétrica ou até mesmo para suprir a demanda quando existir a falta de energia.

Palavras-Chave – Boost Quadrático, Fontes Alternativas de Energia, Full-Bridge.

Abstract - Even with the exponential growth in the use of alternative energy sources connected to the grid, such as photovoltaic panels that require solar irradiation and Wind turbines that produce energy through the speed of the winds supplying energy to remote locations mainly in rural areas is a major challenge for the electricity sector due to the discontinuous supply of electricity.

Given the situation the objective of this work is to develop a system on a computational platform that is capable of generation electrical energy by solar modules to meet the demand of remote places that do not have electrical grid availability or even for supply the demand when there is a lack of energy.

Keywords – Quadratic Boost, Alternative Energy Sources, Full-Bridge.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, a nova ordem mundial é a busca pela autossuficiência em geração de energia, aliada a uma diversificação da matriz energética, ou seja, a procura por diferentes fontes de energias alternativas que supram a demanda interna dos países[1].

Essas energias alternativas no que tangem nas fontes renováveis, causam o mínimo impacto ao meio ambiente, e garantem a confiabilidade da energia elétrica, sendo capaz de

manter-se disponíveis durante um longo prazo, contando com recursos que se regeneram ou que se mantem ativos permanentemente. No entanto, a utilização destas fontes alternativas conectadas à rede elétrica, nem sempre garantem um retorno positivo, principalmente quando instalados em sistemas rurais, onde o abastecimento de energia elétrica é descontínuo, repercutindo na eficiência da produção do sistema pela falta de tensão de referência da rede.

Uma alternativa bastante econômica que vem sendo utilizada para solucionar tal problema são os sistemas *off-grid* que consistem em painéis fotovoltaicos com baterias, assim, podem garantir durante um determinado intervalo de tempo a confiabilidade de energia elétrica.

Nesse contexto, o intuito deste artigo é desenvolver um sistema de cunho computacional capaz de atender um local remoto durante a falta de energia, que através da energia gerada por módulos fotovoltaicos, seja capaz de atender cargas CA, utilizando tecnologias da eletrônica de potência capaz de alcançar resultados eficazes com a novas topologias de conversores de energia.

II. DESENVOLVIMENTO TEORICO

Para o desenvolvimento deste trabalho, será aplicado conceitos do módulo fotovoltaico (FV), capaz de fornecer uma tensão CC a um conversor CC-CC chamado *Boost* Quadrático, que elevará a tensão produzida pelo módulo FV. Em seguida, a tensão produzida passará por um inversor CC-CA conhecido como *Full-Bridge* composto por um filtro LC capaz de filtrar os harmônicos indesejáveis na saída do inversor, desejando somente que a parcela da frequência fundamental esteja disponível, além disso, dentre todas as topologias de modulação será aplicado a SPWM, estratégia de modulação por largura de pulso senoidal, pois dentre todas ela apresenta o menor conteúdo harmônico, alimentando assim, um conjunto de cargas CA.

Esses módulos podem ser conectados para formar o chamado arranjo fotovoltaico, como ilustrado na Figura 1. Em geral, quanto maior a área de um módulo, mais eletricidade será produzida. Do ponto de vista elétrico eles também podem ser ligados em serie e em paralelo para produzir qualquer combinação de tensão e corrente[4].

Figura 1: Célula, módulo e arranjo fotovoltaico [4].



A. Associação em Série

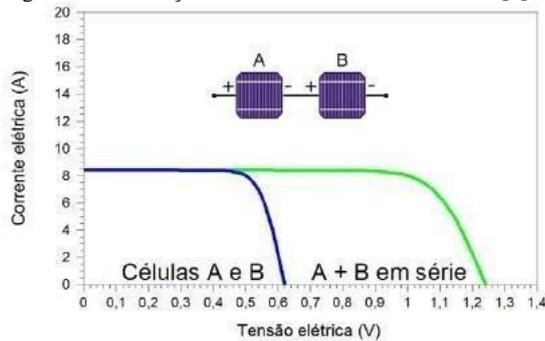
Na conexão série, o terminal positivo de um dispositivo fotovoltaico é conectado ao terminal negativo do outro dispositivo, e assim sucessivamente. Para dispositivos idênticos e submetidos à mesma irradiância, quando a ligação é em série, as tensões são somadas e a corrente elétrica não é afetada, como indicam (1) e (2) [4].

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (1)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2)$$

Se os dispositivos são idênticos e encontram-se sob as mesmas condições de irradiância e temperatura, então, as correntes elétricas individuais são iguais. No caso de se associarem os dispositivos em série com diferentes correntes de curto-circuito, a corrente elétrica da associação será limitada pela menor corrente. Entretanto, a associação de módulos de correntes diferentes não é recomendada na prática, pois pode causar superaquecimento [2]. A Figura 2 ilustra o resultado da associação série dos módulos solares.

Figura 2: Associação em série dos módulos solares [2].



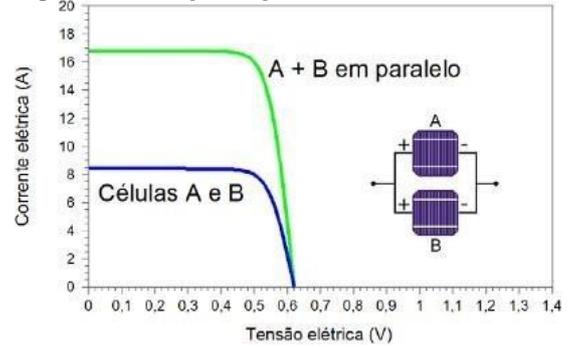
B. Associação em Paralelo

Na associação em paralelo, os terminais positivos dos módulos são interligados entre si, assim como os terminais negativos. A Figura 3 ilustra o resultado da soma das correntes elétricas em células ideais conectadas em paralelo, enquanto a tensão permanece inalterada. Sendo assim, tem-se as equações apresentadas e (3) e (4):

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (3)$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (4)$$

Figura 3: Associação em paralelo dos módulos solares [2].



C. Conversor CC-CC Boost Quadrático

O conversor *boost* é mais utilizado para tal aplicação, porém seu ganho é limitado pelas perdas de condução, quando a razão cíclica se aproxima da unidade. Sendo assim, é apresentado uma nova classe de conversores PWM conhecido como conversor *boost* quadrático, cujo ganho de tensão possui dependência quadrática em relação a razão cíclica, podendo obter ganhos elevados de tensão com menores valores de razão cíclica, ou seja, mais afastado do valor unitário. Além disso, o conversor possui um único interruptor, o que mantém a controlabilidade, reduzindo seus esforços de tensão e corrente sobre os componentes, pois tal topologia tem como principal vantagem a eliminação de uma das chaves do circuito, elevando seu rendimento e a manutenção do ganho quadrático.

$$G = \frac{1}{(1-D)^2} \quad (5)$$

Onde:

G – Ganho;

D – Razão Cíclica.

A Figura 4 apresenta a topologia do conversor *boost* quadrático, enquanto a Figura 5 compara os ganhos estáticos dos *boost* tradicional com o *boost* quadrático.

Figura 4: Conversor Boost Quadrático [3].

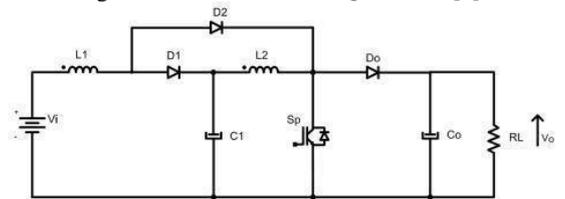
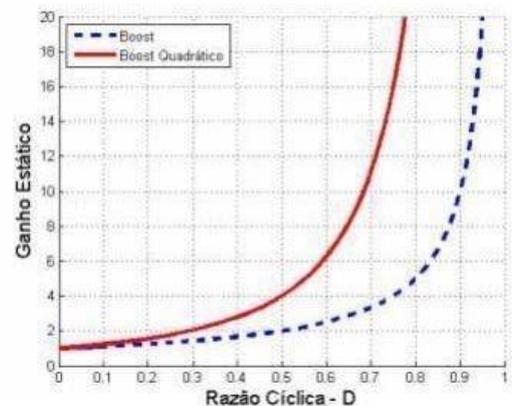


Figura 5: Curvas de Comparação de ganhos estáticos dos conversores CC-CC boost e boost quadrático [3].



Para obter resultados elevados na saída do conversor, a razão cíclica será menor se comparada a razão cíclica do conversor tradicional para a mesma aplicação, tornando o conversor *boost* incapaz de realizar a conversão porque necessitará de uma razão cíclica elevada, próxima de 100%, o que possibilita utilizar o conversor quadrático em uma faixa larga de conversão com uma única chave.

Apesar de o conversor *boost* quadrático apresentar vantagens em relação ao tradicional, a tensão gerada pelo módulo FV deverá ser analisado decorrente da sua variação. Visando obter um controle sobre essa tensão de entrada, propõe um projeto do controlador PI, que será determinado via simulação computacional através do software PSIM variando seus parâmetros de constantes K_p e K_i , até obter um valor de performance desejado.

D. Inversor CC-CA Full-Bridge

O inversor CC-CA *Full-Bridge* será o responsável por fornecer uma tensão senoidal as cargas. Este inversor receberá o sinal gerado pelo conversor CC-CC regulada em um determinado nível de tensão e alterá-lo para um sinal de corrente alternada, com valor médio nulo.

O circuito de potência do inversor em ponte completa apresentado na Figura 6, é composta pelos quatro interruptores controlados que irão possuir baixos esforços de tensão e corrente.

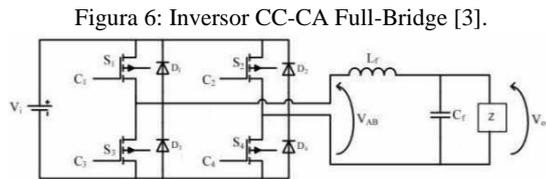


Figura 6: Inversor CC-CA Full-Bridge [3].

No entanto, a operação dos interruptores em alta frequência produz harmônicos indesejáveis na saída do inversor, por isso, será projetado um filtro LC na saída capaz de filtrar os harmônicos e deixar somente a parcela da componente fundamental em 60 Hz na saída.

III. ANÁLISE E RESULTADOS OBTIDOS

O roteiro de projeto será composto pelas especificações e dimensionamento dos componentes do conversor e do sistema de controle adotado através de análises das respostas obtidas na definição dos parâmetros do controlador PI. A seguir, serão apresentados os resultados e as simulações.

A. Especificações de projeto do conversor CC-CC

Será necessária a especificação de alguns parâmetros do projeto, para garantir que o conversor opere no Modo de Condução Contínua, os quais são detalhados a seguir:

- Tensão Máxima de Entrada (V_{in}) = 15 V.
- Potência de saída (P_o) = 90 W.
- Tensão de saída (V_o) = 300 V.
- Rendimento (η %) = 81%.
- Frequência de Chaveamento (f) = 50 kHz.

Uma vez definido os parâmetros principais do projeto, torna-se possível definir a especificação do conversor, conforme exhibe a Tabela 1.

TABELA 1
Parâmetros do conversor CC-CC

Parâmetros	Valores
R_0	1.000 Ω
I_0	0,30 A
D	0,7764
L_1	320 μ H
L_2	1.580 μ H
C_1	39 μ F
C_2	0,4 μ F

De acordo com a definição dos parâmetros do conversor CC-CC *boost* quadrático, pode determinar os esforços de tensão e corrente em cada semiconductor do circuito e comparar com os valores simulados, conforme apresenta as Tabelas 2 e 3.

TABELA 2
Análise de resultados médios obtidos

Parâmetros	Simulação	Teórico
ID1	1,3498	1,3416
ID2	0,2980	0,3
ID3	4,6889	4,6584
IL1	6,0388	6,0
IL2	1,334	1,3416
Ichave	5,7256	5,7000

TABELA 3
Análise de resultados rms obtidos

Parâmetros	Simulação	Teórico
ID1	3,0190	2,8372
ID2	5,6240	5,2868
ID3	0,3990	0,6344
Ichave	6,7727	6,468

A Figura 8 mostra a forma de onda da tensão de saída simulada deste conversor considerando os dados de projeto, provando o seu funcionamento através do *software PSIM*, ao utilizar um controle em malha aberta com um comparador, como mostra a Figura 7.

Figura 7: Circuito de controle em malha aberta.

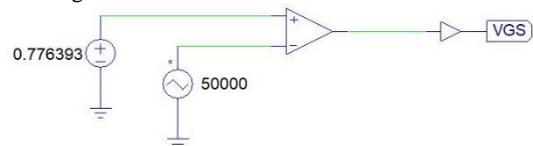
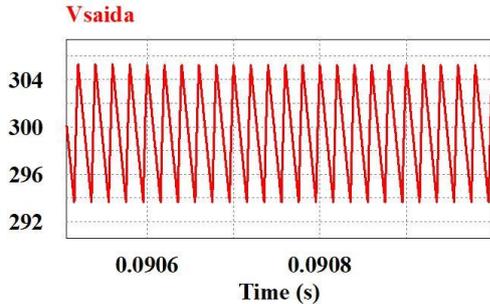


Figura 8: Forma de onda da saída do conversor.



É possível observar que o valor da tensão de saída simulado é próximo do valor definido como premissa de projeto. Através do *ripple* de corrente dos indutores e do *ripple* de tensão na saída do capacitor, pode-se verificar através de suas respostas que o conversor está operando corretamente conforme esperado, como ilustra as Figuras 9 e 10.

Figura 9: Forma de onda da corrente no Indutor L1 e L2.

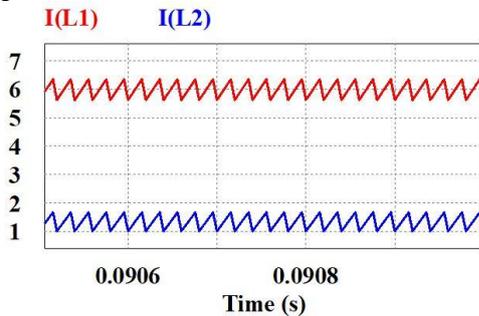
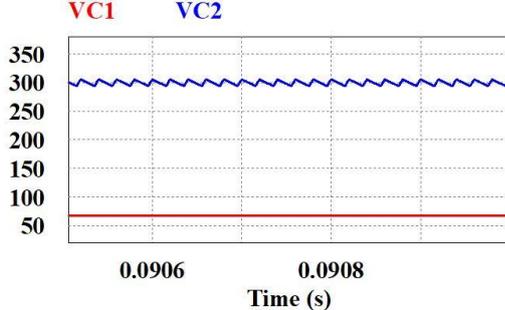


Figura 10: Forma de onda da tensão do Capacitor C1 e C2.



Nota-se na Tabela 4 que os valores encontrados de *ripple* de corrente nos indutores e o *ripple* de tensão nos capacitores computacionais e teóricos são próximos, conspirando que o circuito está operando sem perdas, ou seja, no modo ideal.

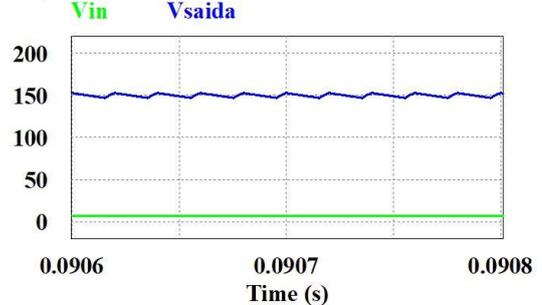
TABELA 4
Análise de resultados dos *ripple*

Parâmetros	Simulação	Teórico
ΔI_{L1}	0,7086	0,7407
ΔI_{L2}	0,6344	0,6625
ΔV_{C1}	0,5188	0,6708
ΔV_{C2}	11,4292	13,4164

Com base nisso, pode-se concluir que o conversor CC-CC está operando como esperado após análise dos componentes do circuito. No entanto, ao simular uma variação de entrada de 7,5 V, partindo da ideia que o arranjo FV fornecerá ao conversor uma tensão variante no decorrer

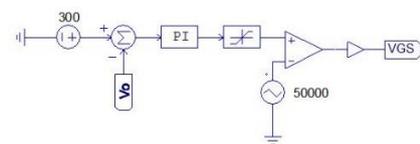
do dia, nota-se que a tensão de saída no conversor apresenta uma resposta diferente do esperado, com uma tensão média de 150 V. Nesse sentido, propõe-se a utilização de um controle em malha fechada com objetivo de controlar a tensão de saída, para manter a variável do processo próxima do valor desejado, independente das perturbações e variações admitidos.

Figura 11: Forma de onda da tensão de entrada e saída.



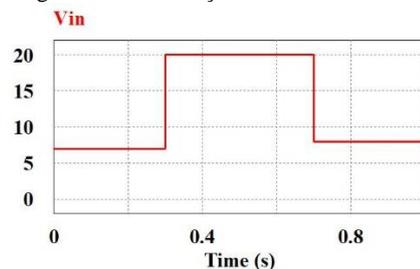
O controle será realizado fazendo uma comparação da tensão de saída do conversor com uma fonte de tensão em 300 V, com intuito de realizar uma comparação entre dois sinais de tensão, pelo qual passará por um controlador PI, para melhorar a resposta transitória com a contribuição da ação proporcional, enquanto a integral corrige o erro estacionário. A seguir, o sinal resultante em baixa frequência (modulante) é comparada com um sinal de alta frequência (portadora), resultando em um sinal com frequência fixa e largura de pulso variável, o qual será enviada para a chave do conversor *boost* quadrático. Na Figura 12, pode-se verificar o sistema de controle utilizado.

Figura 12: Circuito de controle em malha fechada.



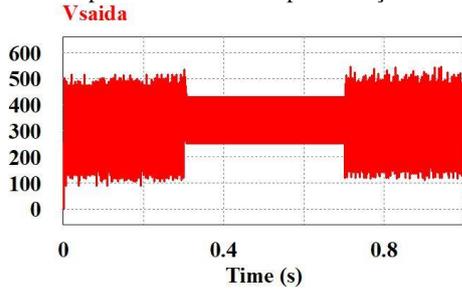
Foram realizadas diversas simulações via *PSIM*, utilizando uma fonte de tensão *PIECEWISE LINEAR*, capaz de simular as variações de tensões geradas pelo arranjo FV sendo capaz de definir as constantes de $K_p = 1$ e $K_i = 0.001$ por meio de métodos empíricos. A Figura 13 evidencia a tensão CC com perturbações na entrada do conversor *boost* quadrático.

Figura 13: Perturbação nas tensões de entrada.



Percebe-se na Figura 14 que, após aplicar as perturbações na entrada do arranjo FV (fonte de tensão de 15V), obteve uma resposta com bastante *overshoot* e durante as mudanças de tensão o sistema respondeu de forma lenta, sendo necessário considerar novas constantes para o controlador PI.

Figura 14: Resposta do conversor após variação da entrada.

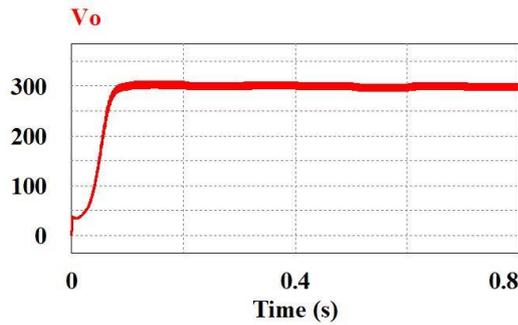


Realizando uma nova simulação com os valores das constantes de K_p e K_i , conforme estabelecido na Tabela 5, verifica-se que a resposta do sistema mesmo com as perturbações juntamente com o controle em malha fechada, ajusta em 300 V a tensão de saída do conversor CC-CC, além de tornar o sistema mais rápido e dinâmico perante as perturbações, como mostra a Figura 15.

TABELA 5
Constantes adotadas para o controlador PI

Parâmetros	Valores
K_p	0,00P02
K_i	0,0004

Figura15: Resposta do conversor após variação da entrada com controle em malha fechada.



A seguir, serão explorados a parametrização do inversor *Full-Bridge* e do filtro LC.

B. Especificações de projeto do inversor CC-CA e do filtro LC

Para especificar os parâmetros desejados de operação do inversor, deve-se lembrar que sua alimentação depende da resposta da saída do conversor CC-CC. Vale ressaltar que o conversor *boost* quadrático foi ajustado para atender uma carga resistiva de 90 W, sendo assim, é necessário definir os parâmetros de projeto do inversor, conforme especifica a Tabela 6.

TABELA 6
Parâmetros do inversor CC-CA

Parâmetros	Valores
V_I	300
V_o	127
F_{cf}	50.000
F_f	60
P_0	90

Onde: V_I é a tensão de entrada, V_o trata-se da tensão de saída, F_{cf} e F_f implicam na frequência de chaveamento e fundamental, respectivamente. E por fim, P_0 refere-se na

potência de saída do inversor.

O princípio de funcionamento do inversor está ligado a uma estratégia de modulação que define a mudança de estados dos componentes eletrônicos do mesmo. Como dito anteriormente, a modulação mais aplicada é a SPWM de dois níveis, também conhecida como bipolar, pois ela varia a razão cíclica aplicada aos interruptores em alta frequência de comutação com o intuito de obter uma determinada tensão na saída em baixa frequência, sendo assim, cria-se uma sequência de pulsos que devem ter o mesmo valor fundamental de referência desejada. No entanto, durante essa sequência existem harmônicos indesejados que devem ser minimizados [5].

Diante disto, e das especificações supracitadas na Tabela 6, inicia-se o dimensionamento das componentes do circuito e do filtro LC, com a função de retirar as componentes de frequência diferente da fundamental da tensão de saída, de forma a fornecer para a carga uma tensão mais senoidal possível, ou seja, com baixo *THD (Total Harmonic Distortion)*.

A frequência de corte do filtro LC deve apresentar uma década acima da frequência fundamental da tensão de saída (60 Hz), e uma década abaixo da frequência de comutação dos interruptores do inversor *Full-Bridge* (50 kHz). Sendo assim, adota-se uma frequência de corte em 1kHz. É importante ressaltar que, como a função do capacitor não é manter a tensão de saída mais constante/linear, estima-se o valor do mesmo em 10 μ F. Através da equação 6, torna-se possível determinar o valor do indutor do filtro (L_f).

$$L_f = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 C_f} \quad (6)$$

Onde:

f_c – Indutor do Filtro;

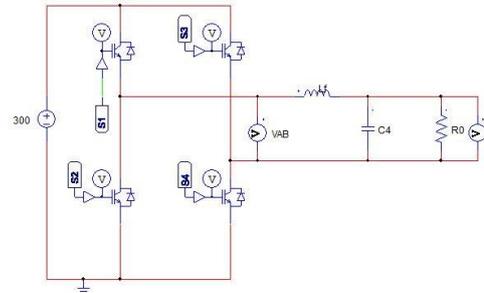
C_f – Capacitor do Filtro.

Em posse dos valores de tensão de referência e triangular, obtém-se o índice de modulação (M) do sistema, por meio da equação 7.

$$M = \frac{V_{ref}}{V_{tri}} = 0,4233 \quad (7)$$

Vale ressaltar que V_{ref} trata-se da tensão de referência e V_{tri} a tensão triangular. Após determinar os parâmetros, foi reproduzido o circuito do inversor, conforme ilustra a Figura 16.

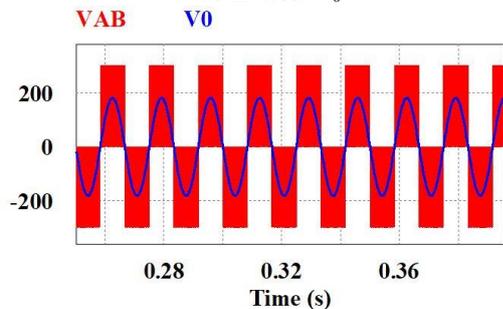
Figura 16: Circuito do inversor com filtro LC.



A Figura 17 mostra a forma de onda na entrada do filtro LC, denominada de V_{AB} e a forma de onda da saída denominada de V_o . Percebe-se que a tensão V_{AB} apresenta pulsos no semiciclo positivo e pulsos no semiciclo negativo,

por se tratar de um sinal modulado por PWM. Além disso, esta mesma tensão possui uma componente na frequência fundamental e uma componente no dobro da frequência de comutação (50 kHz), devido as características da modulação SPWM de dois níveis, também conhecida como SPWM bipolar, onde o sinal de referência é comparado com um sinal triangular na frequência de comutação de modo a se obter os pulsos de comando para os interruptores do inversor [5].

Figura 17: Forma de onda da tensão antes do filtro V_{AB} e da saída do inversor V_0 .



É possível provar a correta funcionalidade desse inversor, calculando a corrente teórica pela equação 8 e comparando com a corrente média de saída apresentado na Tabela 7.

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (8)$$

Onde:

V_0 – Tensão de saída do inversor;

R – Carga nominal na saída do inversor.

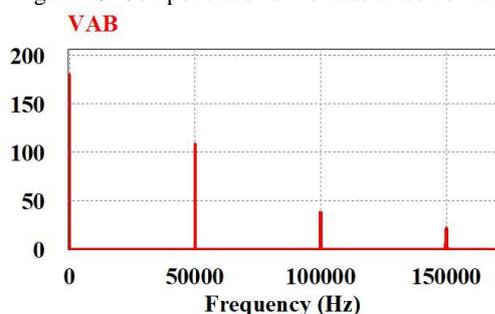
Verifica-se que ambas estão bem próximas, confirmando o funcionamento do inversor. Observa-se também, que a tensão fica estabilizada para um índice de modulação igual a 0,6 em 127 *rms*.

TABELA 7
Parâmetros do inversor CC-CA

Parâmetros	Simulação	Teórico
I_0	0.7092	0.7055

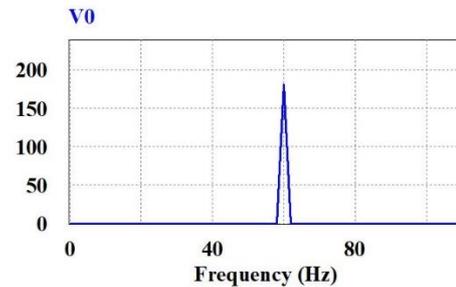
Nota-se também que as harmônicas são de baixa ordem, como esperado, pois a modulação SPWM é a que apresenta o menor conteúdo harmônico, o que foi um dos principais motivos pela sua escolha, pois ela visa deslocar o conteúdo harmônico para as altas frequências [5].

Figura 18: Componentes harmônicas antes do filtro.



É importante ressaltar conforme ilustra na Figura 19, que o filtro LC atenua quase toda componente em alta frequência da tensão V_{AB} , podendo concluir a implementação da modulação SPWM.N

Figura 19: Componentes harmônicas na saída do inversor.



IV. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a metodologia proposta apresenta funcionalidade como esperado, mesmo quando a fonte primária fornecida pelos módulos fotovoltaicos oscilar no decorrer do dia, ao sofrer variação na irradiância, o que está diretamente relacionada a corrente e tensão do módulo, assim, o conversor CC-CC *boost* quadrático ajustará a tensão de saída em 300 V, devido ao seu controle em malha fechada pelo compensador PI. É importante ressaltar também que o inversor CC-CA *Full-Bridge* com filtro LC permite passar apenas as frequências baixas, impossibilitando que as frequências de alta ordem cheguem na carga.

REFERÊNCIAS

- [1] PACHECO, Fabiana. **Energias Renováveis: breves conceitos.** (2006). Acedido em 30/09/2007, em <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/>.
- [2] João Tavares Pinho, Marco Antônio Galdino. “**Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**” Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, CEPTEL, DTE, CRESESB, Rio de Janeiro, março de 2014.
- [3] Vilefort, L. S. **Conversor Boost quadrático PWM associado à Célula de Auxílio à Comutação SR-ZVS-QRC.** Dissertação de mestrado apresentado no programa de pós-graduação da Universidade Federal de Uberlândia - UFU. julho de 2011
- [4] Souza, A. C., Melo, F. C., Macedo, J. R. **Modelagem Computacional de Módulos Fotovoltaicos.** XIII CEEL – Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica – Uberlândia -MG, Outubro, 2015.
- [5] Gerente, F.H. “**Metodologia de Projeto de inversores Monofásicos de tensão para cargas não-lineares.**” Dissertação de mestrado apresentado no programa de pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Junho de 2005.
- [6] Vilefort, L.S. **Estudo comparativo de dois conversores boost quadrático com comutação suave monochaveados para aplicação de rastreamento de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.** Tese de doutorado apresentado no programa de pós-graduação da Universidade Federal de Uberlândia-UFU. Fevereiro, 2016.
- [7] Ferreira, R. S., Carrijo, D. R., Guimarães, S.C. **Montagem de um conversor boost quadrático para alimentação de uma lâmpada led.** Artigo publicado na VIII CEEL da Universidade Federal de Uberlândia-UFU. Outubro de 2010.