

INSTRUMENTAÇÃO DE CONVERSOR CC-CA PARA ALIMENTAÇÃO DE CARGAS MONOFÁSICAS

Willian Rohrig¹, Daniela Iagher Dildey², Lucas Müller³, Tiago Dequigiovani⁴

¹²³⁴Instituto Federal Catarinense – Campus Luzerna

willian.rohrig@gmail.com, danieladildey@gmail.com, lucas.muller2599@gmail.com, tiago.dequigiovani@ifc.edu.br

Resumo: Nos últimos anos, o interesse na pesquisa em fontes de energia renováveis tem aumentado consideravelmente, devido à elevação no consumo mundial, aquecimento global e poluição, tornando-se de suma importância para o desenvolvimento no setor energético. Esse projeto apresenta o desenvolvimento de um conversor CC-CA projetado para alimentação de cargas monofásicas, com tensão de saída de 220V/60Hz e potência de até 1000 W; bem como a instrumentação necessária para leitura da tensão de saída. Este conversor é aplicado em barramentos de 400 V_{CC}, tensão padrão utilizada em sistemas com fontes de energia renováveis. A tensão de saída do conversor é senoidal, proporcionada através do chaveamento de um dos pares dos transistores com PWM senoidal em alta frequência e o outro par acionado com onda quadrada de 60 Hz. Para tanto é empregada uma topologia composta por uma estrutura em ponte completa, operando com uma lógica PWM com modulação senoidal, e um filtro LC na saída. São apresentados o estudo da topologia utilizada através das etapas de funcionamento, o cálculo dos componentes para o filtro LC, assim como simulações no software PSIM, utilizadas para validação dos componentes. A implementação e os resultados experimentais são apresentados para validação do funcionamento e projeto do conversor.

Palavras-Chave: Conversor CC-CA, Instrumentação, Barramento CC, Energias renováveis.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, o aproveitamento das energias renováveis está se tornando de suma importância para o desenvolvimento no setor energético. A energia fotovoltaica pode ser definida como a energia que é gerada a partir da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isso acontece devido a um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico (IMHOFF,2007).

Para a utilização da energia gerada pelas placas fotovoltaicas é necessário o uso de um inversor. Os inversores são dispositivos eletrônicos que fornecem energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (PINHO & GALDINO, 2014). Além de converter a tensão de contínua para alternada, esses equipamentos são capazes de ajustar a frequência do sinal de saída, e o nível de tensão gerada, possibilitando assim a conexão do sistema com a rede pública, de acordo com as normas estabelecidas pela ANEEL.

A instrumentação do projeto é muito importante, pois a observação dos parâmetros possibilita a averiguação dos resultados do processo, como a tensão de saída, verificando se os parâmetros, como nível de tensão e frequência estão corretos para conexão com a rede pública, assim como para a alimentação de uma carga monofásica.

Quando a carga conectada junto a saída do conversor varia, a tensão de saída é alterada de modo inversamente proporcional a essa variação de carga, dessa maneira, torna-se necessário o emprego da instrumentação para que essa variação seja contornada pelo controlador, e não haja variação no sinal de saída.

As seções seguintes apresentam a análise e projeto do conversor CC-CA (Corrente Contínua – Corrente Alternada), definição dos parâmetros, topologia utilizada, modulação, instrumentação, resultados de simulação e resultados experimentais obtidos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Definição e explicação da topologia utilizada para o conversor.

A topologia do conversor definida em ponte completa, de modo que a tensão E seja de 400 V. A tensão de saída do conversor represente o sinal de 200V senoidal. A Figura 1 ilustra a topologia do conversor.

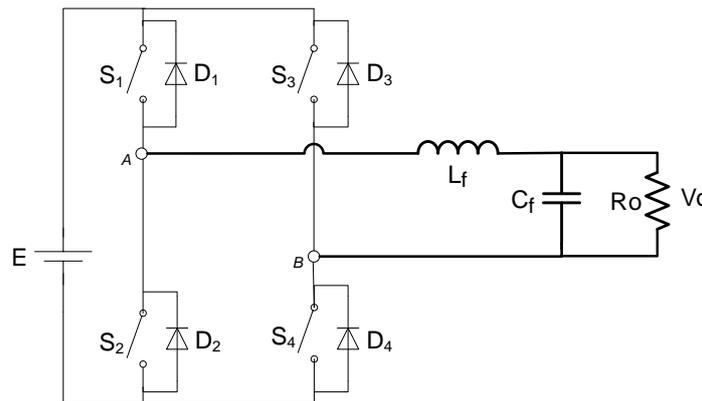


Figura 1 - Topologia utilizada – Ponte completa
Fonte: Próprio Autor

O conversor CC-CA consiste de dois braços compostos por um par de semicondutores comandados em antiparalelo com diodos de roda-livre. Essa estrutura é recomendada em topologias de altas potências, tendo em vista que ela apresenta os menores esforços de tensão e corrente nos semicondutores comutados. Essa característica se constitui numa das grandes vantagens dessa estrutura (MARTINS & BARBI, 2008). Para tornar o sinal presente após a passagem pelos dois braços, um filtro LC é adicionado, responsável por filtrar as componentes de alta frequência proveniente do chaveamento.

2.2. Etapas de funcionamento

Os semicondutores S_1 e S_2 são comutados por um sinal de onda quadrada de baixa frequência (60Hz) enquanto que os semicondutores S_3 e S_4 são comandados por um PWM (*Pulse Width Modulation*) de alta frequência (20kHz). Isso implica que, enquanto S_1 ou S_2 estiverem ativos S_3 e S_4 estarão sendo comutados, e conforme o funcionamento do CI utilizado como *driver*, os PWM's aplicados nos semicondutores são sempre complementares.

Na Figura 2 pode-se observar as etapas de operação 1, 2, 3 e 4. As etapas 1 e 2 ocorrem durante todo o semiciclo positivo da senóide, enquanto as etapas 3 e 4 ocorrem durante o semiciclo negativo, nas figuras 2(a), 2(b), 2(c) e 2(d), apresentam as etapas de funcionamento.

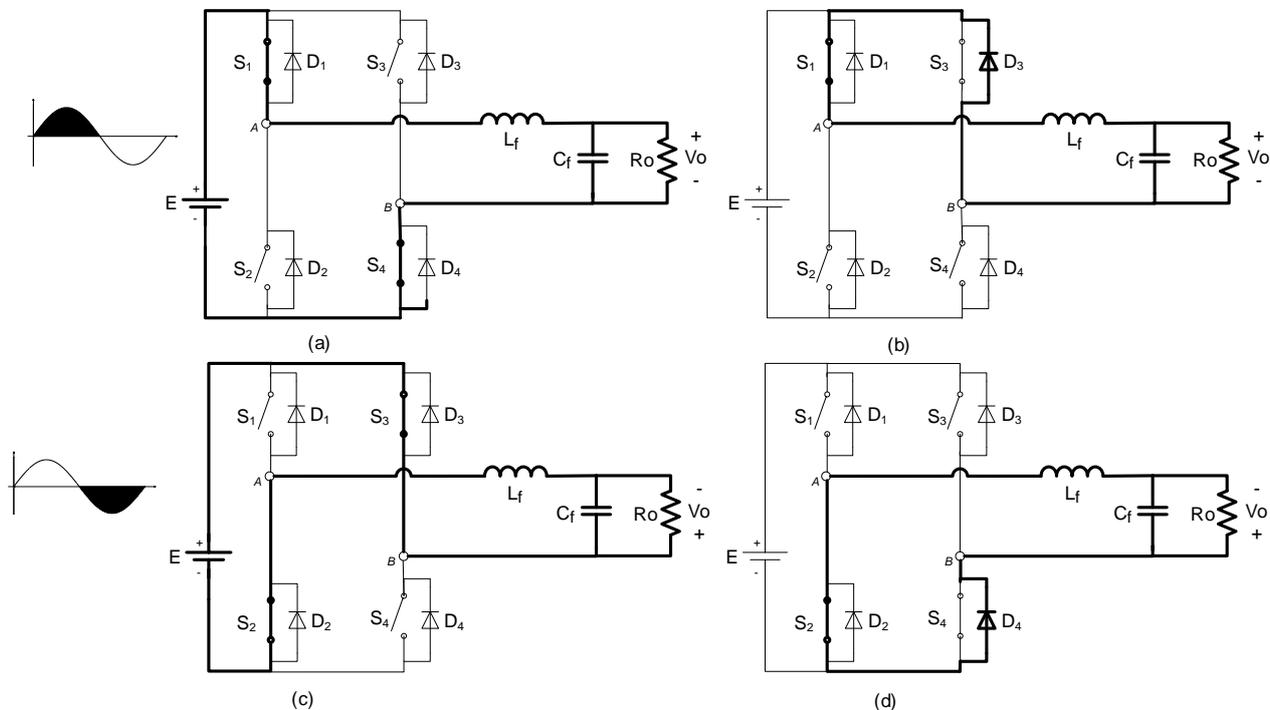


Figura 2 - Etapas de operação de cada semiciclo
Fonte: Próprio Autor

Etapa 1 - S_1 e S_4 conduzem a corrente de carga. A tensão na carga é de $+E$ e a corrente na carga cresce linearmente.

Etapa 2- S_1 continua acionada, mas a chave S_3 que possui o PWM complementar ao da S_4 é fechada e o diodo D_4 conduz a corrente que decresce linearmente.

Etapa 3- S_1 é bloqueada e a chave S_2 passa a conduzir junto a chave S_3 invertendo a tensão na carga, agora $-E$ e a corrente na carga cresce linearmente.

Etapa 4- S_2 continua acionada e como a chave S_4 é acionada o diodo D_4 passa a conduzir a corrente que decresce linearmente.

2.3. PWM senoidal

É possível reduzir, significativamente, o fator de distorção e as componentes harmônicas da tensão gerada por um inversor, utilizando-se a modulação PWM senoidal ao invés da modulação PWM linear. Esse tipo de modulação se baseia na comparação de uma onda moduladora de referência senoidal com uma onda portadora triangular. A intersecção dessas duas formas de onda estabelece a duração dos sinais de comando das chaves controladas (MARTINS & BARBI, 2008).

Para fazer o comando das chaves foi gerado um PWM senoidal, para tal foi definido o índice de modulação (m_i), responsável por adequar a tensão de entrada à da saída, como pode ser observado na Equação 1.

$$m_i = \frac{V_{op}}{V_{in}} = \frac{311}{400} = 0,77 \quad (1)$$

Cada semiciclo gerado através do PWM possui 167 razões cíclicas diferentes que são dadas através de uma tabela de valores de seno. Esse número 167 é encontrado a partir da escolha da alta frequência e sabendo que a frequência de saída deve ser de 60Hz. A Equação 2 retorna o número 333,3 que é o resultado para a senóide completa, a cada semiciclo são necessários 167 pontos.

$$n = \frac{20kHz}{60Hz} = 333 \quad (2)$$

2.4. Dimensionamento dos componentes

2.5.1. Transdutor de tensão

O transdutor de tensão utilizado é o LEM LV20-P. Seu funcionamento assemelha-se ao de um transformador de corrente, onde converte uma corrente de entrada, em uma corrente de saída 2,5 vezes a corrente de entrada. Assim, como há um resistor de medição em série na entrada, e outro na saída, o sinal de tensão conectado à entrada é convertido em corrente, e na saída do transdutor, a saída de corrente é convertida em tensão novamente. Com isso, os sinais de entrada são transmitidos para próxima etapa garantindo o isolamento elétrico entre cada parte do circuito e adequando os respectivos níveis de tensão. Este transdutor suporta a tensão de 500 V_{RMS} e 10 mA na sua entrada, e na saída, a corrente de 25 mA.

2.5.2. Projeto do filtro LC

O filtro LC passa-baixa é responsável por filtrar a componente de alta frequência proveniente do chaveamento dos transistores. Para cálculo dos componentes foram utilizados os dados da Tabela 1.

Tabela 1 Especificações Iniciais do Projeto

Tensão de barramento (E)	400 V
Tensão eficaz de saída (V_{RMS})	220 V
Potência de saída (P_o)	1 kW
Frequência de saída	60Hz
Frequência de chaveamento (f_s)	20kHz
ξ (ksi) coeficiente de amortecimento	0,707
Frequência de corte do filtro	20kHz/10 = 2kHz

Então a carga resistiva utilizada para assegurar a potência de saída pode ser dada pela Equação 3:

$$R_o = \frac{V_{op}^2 \cdot f_p}{2 \cdot P_o} = 48,4\Omega \quad (3)$$

Para o cálculo do indutor (L_f) e do capacitor (C_f), foram utilizadas as Equações 4 e 5.

$$C_f = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \xi \cdot f_c \cdot R_o} = 1,16\mu F \quad (4) \quad L_f = 4 \cdot R_o^2 \cdot \xi^2 \cdot C_f = 5,44mH \quad (5)$$

2.5.3. Semicondutores

Para a escolha dos transistores é necessário observar as especificações do mesmo, assim como a tensão deve ser superior a 400V e a corrente a 2 A. Para tais especificações e pela disponibilidade do mesmo, foi escolhido o modelo IRGP4063D

2.5.4. Driver

Para o gatilho dos semicondutores foram utilizados dois *drivers* IR2183, os quais recebem o sinal PWM, de baixa e de alta frequência, do microcontrolador e enviam o gatilho para os semicondutores. O circuito utilizado para esse acionamento foi o mesmo que o próprio fabricante dos *drivers* indica no *datasheet* do produto.

2.5. Instrumentação

A instrumentação é especificada de modo a transmitir ao controlador os dados de que ele necessita para fazer o controle, e respeitando as especificações de cada componente.

Em virtude de se ter uma variação muito grande de tensão entre o ponto onde é efetuada a leitura e onde é conectado com o controlador, uma ponte retificadora foi introduzida logo após o ponto de tomada do sinal. Essa ponte de diodos faz com que a tensão seja retificada, com isso a variação na amplitude do sinal de aproximadamente 620V seja reduzida para 311V, isso faz com que haja mais precisão na hora de se efetuar a medição, já que essa faixa de tensão é reduzida para 3,3V

suportados pelo controlador. Mesmo os diodos apresentando uma queda de tensão de 1.4V no total, o uso da ponte de diodos se mostra eficaz e vantajosa, quando ela reduz pela metade a variação na tensão na leitura, fazendo com que aumente a resolução na hora da leitura pelo controlador, onde este ainda pode compensar a queda de tensão devido aos diodos.

Após a ponte retificadora, o sinal passa por um resistor de medição. Este resistor tem o objetivo de criar uma diferença de potencial entre seus terminais e gerando assim uma corrente elétrica proporcional ao valor do sinal de tensão. O uso deste resistor é necessário em virtude do funcionamento do transdutor de tensão conectado logo após, por isso é importante que este resistor seja preciso, e não apresente muita variação. O circuito pode ser visualizado na Figura 3.

Os valores destes resistores são especificados pelo LV20-P. A corrente nominal da entrada dele é de 10mA, para isso, o resistor de medição conectado junto a entrada foi especificado em 27kΩ garantindo assim que quando o conversor estiver trabalhando em condições nominais, a corrente na entrada do transdutor seja um pouco menor que o seu valor nominal, conforme pode ser observado na Equação 6. Como a relação de transformação do transdutor é de 2,5, temos a corrente aplicada no resistor de saída na Equação 7.

$$i(A) = \frac{220 V}{27 k\Omega} = 8,14 mA \quad (6)$$

$$i(A) = 8,14mA * 2,5 = 20,37mA \quad (7)$$

Esse valor de corrente quando multiplicado pelo resistor de saída deve ter seu valor inferior a 3,3V, tensão máxima de operação do micro controlador utilizado. Para que quando a tensão de entrada estiver em 220 Vrms, a tensão lida pelo microcontrolador seja de 2,2 V, pode-se calcular o resistor necessário através da Equação 8.

$$R(\Omega) = \frac{2,2}{20,37} = 110\Omega \quad (8)$$

Um Amp-OP (Amplificador Operacional) foi utilizado para inverter o sinal do segundo resistor de medição e o enviado para o controlador. Como a saída do transdutor é em corrente, devido ao sentido que essa corrente percorre, o sinal de tensão convertido sobre o resistor de medição é negativo. Para a inversão do sinal, o Amp-Op foi utilizado com ganho unitário.

Após a passagem do sinal pelo Amp-Op, um filtro RC foi adicionado com o objetivo de tornar este sinal retificado em contínuo, com valor igual a tensão média deste sinal. Um resistor de 1,5kΩ e

um capacitor de $47\mu\text{F}$ foram adicionados. Com isso, o sinal passa a ser contínuo, facilitando na leitura realizada pelo controlador.

2.6. Diagrama de Implementação

Para implementação do projeto foi seguida o diagrama de implementação da Figura 3.

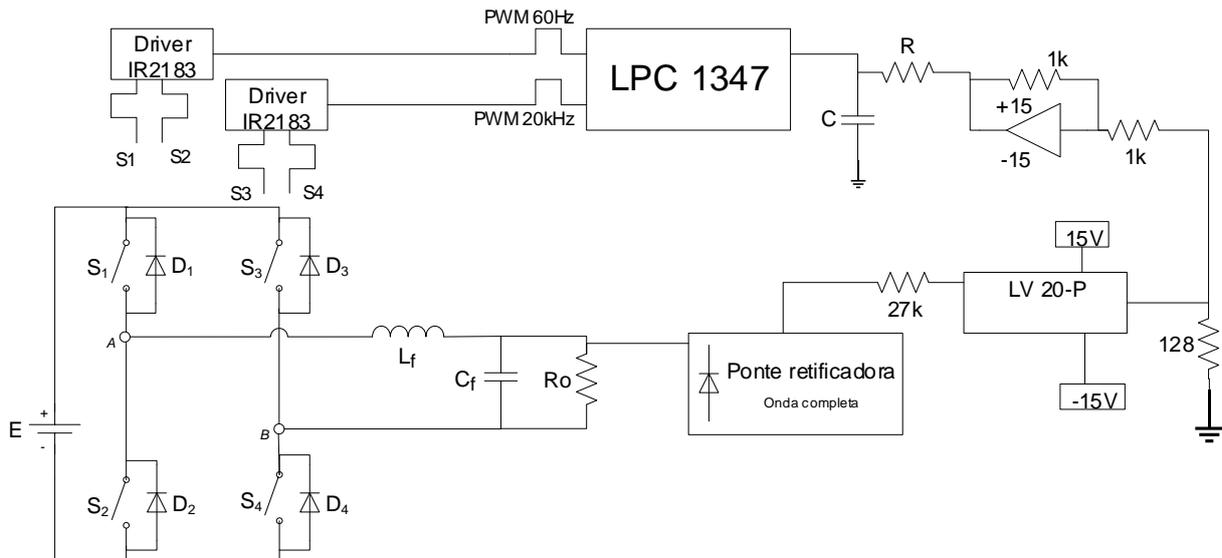


Figura 3 - Diagrama de implementação
Fonte: Próprio Autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a implementação prática, foram desenvolvidas duas placas com o auxílio do *software* Cadsoft Eagle. Uma para potência e filtro de saída e a outra para acionamentos e instrumentação.

A placa de potência é alimentada com a tensão de barramento CC de 400V, tendo também como entrada os sinais de gatilho. Os semicondutores estão conectados a um dissipador de calor. Esse dissipador é essencial para que os transistores não sejam danificados devido à alta temperatura.

A placa de comando por sua vez, é alimentada por uma fonte de tensão externa, que entrega a ela a tensão de -15V 0V e $+15\text{V}$. Esses valores de tensão são exigidos pelos transistores que recebem como sinal para gatilho na faixa de 10V à 20V , e pelo sensor de tensão LV20-P que tem como faixa de tensão para sua alimentação entre 12V à 15V , sendo necessário que se tenha seu respectivo valor negativo. Para o projeto, ele foi alimentado com a tensão de -15V e $+15\text{V}$. As faixas de tensão para o funcionamento dos dois componentes comentados acima são conforme recomendação do fabricante.

3.1. Resultados de simulação

As simulações computacionais foram realizadas com o auxílio do *software* PSIM, para que fosse possível a validação do projeto dos componentes, assim como a lógica utilizada para o acionamento dos transistores. As formas de onda observadas na simulação são importantes, para comprovar o funcionamento do circuito antes da implementação.

Na Figura 4 pode-se observar cada etapa do processo de instrumentação. No primeiro quadro temos o sinal de entrada na parte de instrumentação, sendo este à senóide gerada na saída do conversor. Ainda no mesmo quadro é mostrado o sinal após a ponte de diodos, que retifica o sinal que por ela passa. No segundo quadro temos o sinal V3 após a passagem pelo Amp-Op e o sinal V_med, sinal entregue pelo circuito de instrumentação ao μ C (microcontrolador).

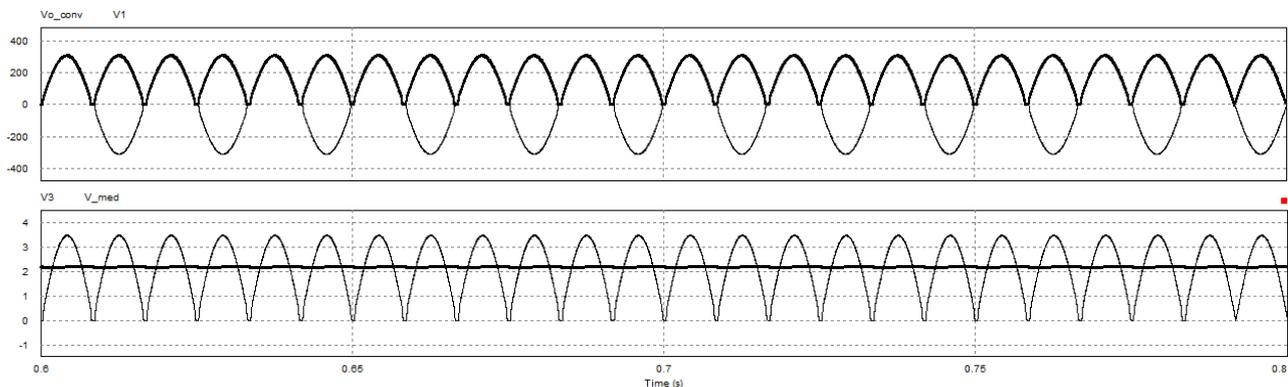


Figura 4 - Mudanças do sinal conforme etapas do processo
Fonte: Próprio Autor

3.2. Resultados experimentais

Para análise de resultados, foi aplicada uma tensão de 400V CC na entrada do conversor, que garante que a tensão de saída seja atingida, além de proporcionar uma eficiência maior, e o restante do sistema foi alimentado com as tensões -15V e +15V, assim como a instrumentação e o comando dos transistores. A carga considerada foi de 48 Ω , conforme potência nominal de 1kW.

A saída do conversor, assim como a entrada do microcontrolador para tal senóide podem ser observadas na Figura 5, CH1 e CH2, respectivamente. Na Figura 6 é possível observar a tensão de saída e a tensão antes do filtro RC.

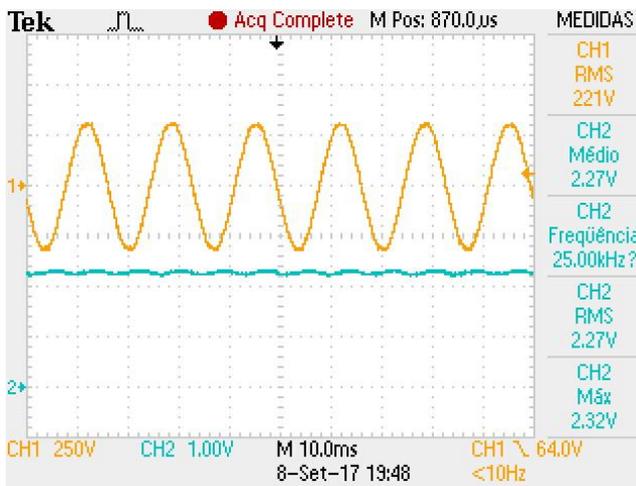


Figura 5 - Tensão de saída e entrada do μ C
Fonte: Próprio Autor

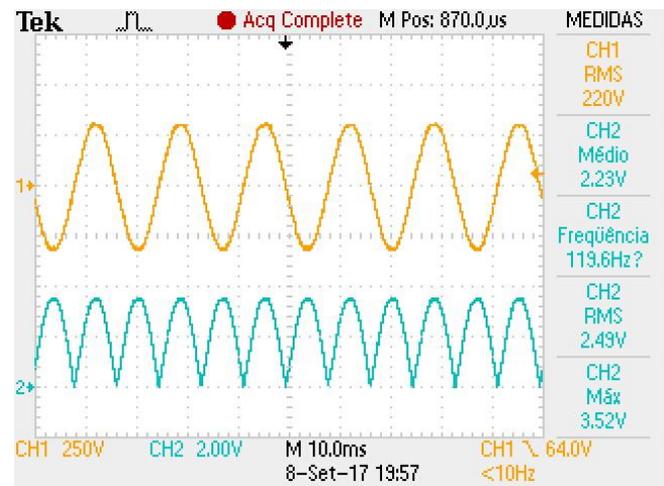


Figura 6 - Tensão de saída e tensão antes do filtro RC
Fonte: Próprio Autor

O PWM de alta frequência e a onda quadrada de frequência 60Hz que são aplicados nos transistores podem ser observados na Figura 7.

A tensão de saída do conversor, senóide de 60 Hz com valor eficaz de 220 Vrms e a tensão antes do filtro LC podem ser observadas na Figura 8.

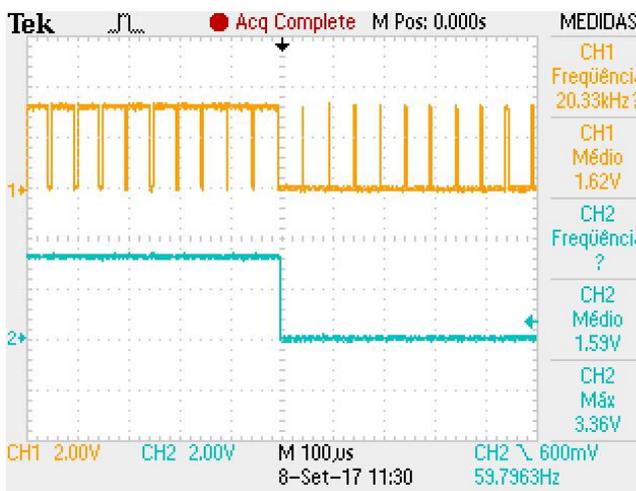


Figura 7 - PWM de alta frequência (20kHz) e de baixa (60Hz)
Fonte: Próprio Autor

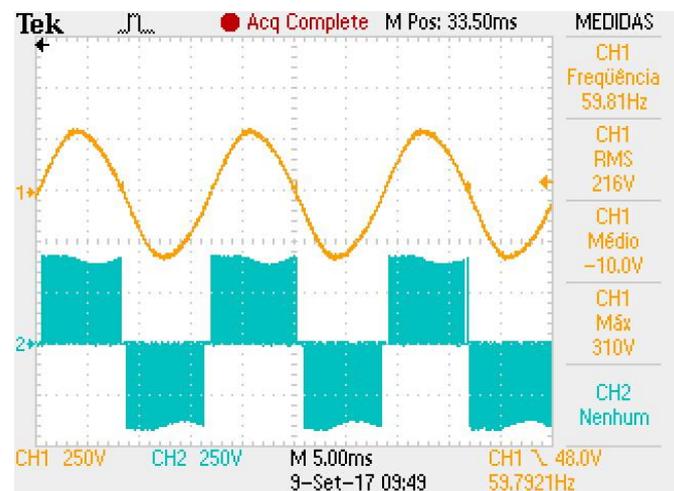


Figura 8 - Tensão de saída e tensão antes do filtro LC
Fonte: Próprio Autor

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo como um todo apresentou bons resultados, tanto na parte de comando e acionamento dos semicondutores através da programação, quanto na parte dos testes em alta potência.

O circuito proposto para realizar a instrumentação do conversor se mostrou eficiente e apresenta boa linearidade. O modo como o sinal é entregue ao microcontrolador faz com que seja

reduzido o esforço computacional para a leitura da tensão na saída do conversor e ainda suporte entradas de tensão mais elevadas sem acarretar em danos ao microcontrolador por excesso de tensão em seu terminal.

Dentre esses motivos, outro ponto positivo é o fato da entrada do circuito de instrumentação estar isolado em relação ao restante do circuito, trazendo assim segurança e reduzindo interferências externas. Deste modo, o circuito proposto se torna uma boa opção para ser implementado em conversores CC-CA, devido ao seu isolamento com o restante do circuito, linearidade e simplicidade na implementação.

As próximas etapas para o desenvolvimento do projeto são a implementação de um controle em malha fechada e elaboração de um laudo técnico, para que posteriormente o equipamento seja instalado em uma empresa da região.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal Catarinense (IFC) pela estrutura e apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos**

Autônomos. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007. 146 f.

PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

MARTINS, Denizar Cruz; BARBI, Ivo. **Introdução ao estudo dos conversores CC-CA.** 2. ed. Florianópolis: Ufsc, 2008. Cap. 2. p. 21-29 e Cap. 4. p. 331-346.