

Desenvolvimento de um inversor de frequência trifásico de baixa potência e para aplicações em sistemas de energia fotovoltaica isolados

Luis Gustavo Cavichioli

Matheus Perin

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um inversor de frequência trifásico de baixo custo para utilização em sistemas de energia fotovoltaica isolados. Este tipo de sistema se caracteriza por operar desconectado da rede elétrica convencional, sendo formado por módulos fotovoltaicos, baterias para armazenar a energia gerada, controladores de carga e um inversor de frequência. Além de serem muito utilizados em áreas remotas e rurais sem acesso à rede elétrica disponível em centros urbanos para alimentar aparelhos domésticos e dispositivos elétricos convencionais, outra importante aplicação de sistemas fotovoltaicos isolados é o acionamento de bombas de água em poços artesianos. Independentemente da aplicação, o inversor de frequência tem grande relevância nestes sistemas, pois é o dispositivo responsável por converter a energia elétrica de corrente contínua gerada pelos módulos solares em corrente alternada, tornando-a adequada para utilização na maioria dos dispositivos elétricos.

Palavras chave: inversores de frequência, energia fotovoltaica, sistemas isolados.

Introdução

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energias renováveis mais promissoras para a geração de eletricidade em todo o mundo. Com o crescente aumento da demanda por energia, a geração fotovoltaica tem se mostrado uma solução acessível e eficiente, com sistemas fotovoltaicos isolados da rede, também conhecidos como sistemas *off-grid*, ganhando destaque em regiões remotas e rurais onde a infraestrutura elétrica convencional é limitada ou inexistente. Neste tipo de sistema, os inversores de frequência trifásicos são componentes essenciais, pois são responsáveis pela conversão da energia CC (corrente contínua) fornecida pelo sistema de geração fotovoltaico para CA (corrente alternada), a qual é utilizada na maioria dos equipamentos domésticos ligados à rede elétrica.

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA) e da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a capacidade de geração fotovoltaica *off-grid* em todo o mundo aumentou quase cinco vezes entre 2012 e 2021, indo de 1,5 GW para 7,4 GW (IRENA, 2022), refletindo a crescente adoção de sistemas fotovoltaicos *off-grid*. Além disso, o mercado global de inversores de frequência trifásicos está em constante expansão, com previsão de crescimento de 7,6% ao ano até 2025, de acordo com um relatório apresentado por Research and Markets (2021).

Os inversores de frequência trifásicos apresentam vantagens em relação aos inversores monofásicos, tais como melhor estabilidade de tensão e frequência, menor distorção harmônica e maior eficiência energética (HART, 2011). Desta forma, ao longo dos últimos anos os inversores trifásicos vem sendo amplamente utilizados em diversos sistemas de geração de energia elétrica isolados, não limitados apenas aos sistemas de energia fotovoltaica (DARWISH et al., 2014; MANSOR et al., 2020; PRABHAKARAN et al., 2020). Segundo um estudo comparativo entre inversores monofásicos e trifásicos realizado por Saçlı et al. (2019), o uso de inversores de frequência trifásicos pode melhorar significativamente a qualidade da energia elétrica gerada pelos

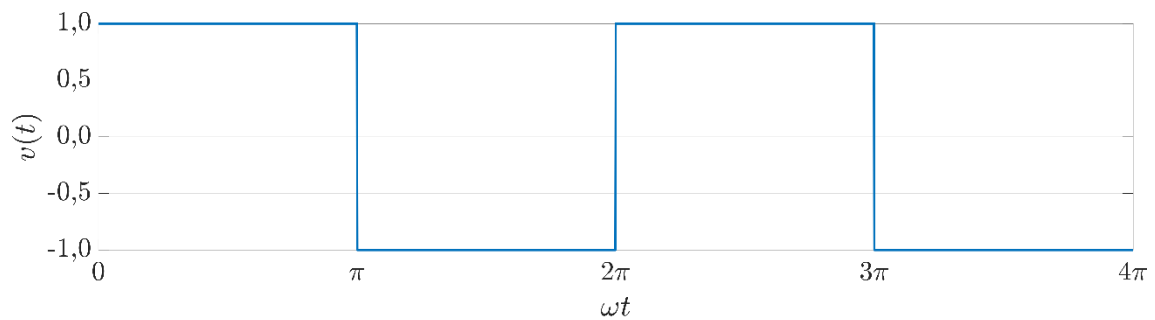
sistemas fotovoltaicos *off-grid*, reduzindo a oscilação de tensão e melhorando o fator de potência.

Maurya e Chauhan (2013) avaliaram o desempenho de um sistema fotovoltaico *off-grid* alimentado por um inversor de frequência trifásico multinível. Os resultados indicaram uma alta eficiência do sistema, com redução significativa nas perdas de energia e melhoria na qualidade da energia elétrica fornecida. Os autores destacaram a importância da seleção adequada de componentes e da otimização do projeto para garantir a eficiência e confiabilidade do sistema. Em um estudo posterior, Karanayi, Agelidis e Pou (2014) avaliaram o desempenho de inversores trifásicos conectados na rede, onde foi comparada a utilização de capacitores eletrolíticos e de filme de polipropileno nos inversores, sendo os melhores resultados obtidos com os primeiros. Outro aspecto importante no projeto de sistemas fotovoltaicos *off-grid* é a seleção adequada de baterias para armazenamento de energia. Em um estudo de comparação, Carroquino et al. (2021) avaliaram o desempenho de baterias de chumbo-ácido e baterias de íon-lítio em sistemas fotovoltaicos. Os resultados indicaram que a bateria mais adequada depende da aplicação; em sistemas *off-grid*, as baterias chumbo-ácidas são mais indicadas, enquanto as baterias de íon-lítio são mais vantajosas em termos de eficiência energética e vida útil em sistemas híbridos.

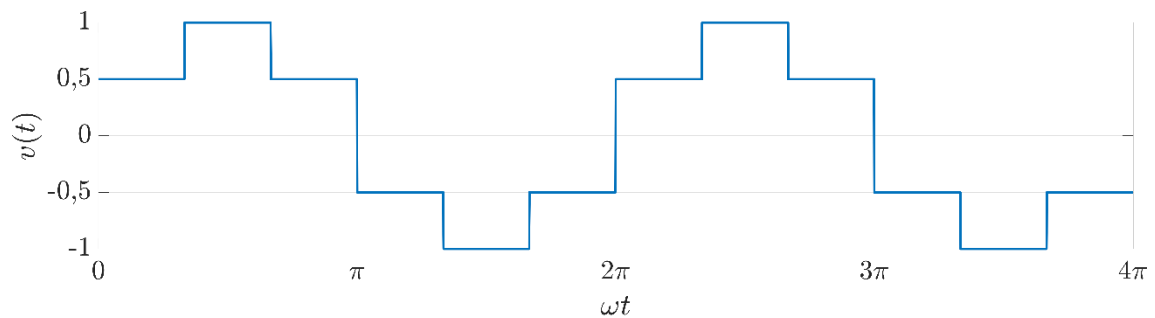
Os inversores trifásicos podem produzir diferentes formas de onda na saída, tais como onda quadrada, seis pulsos e PWM senoidal (AHMED, 2000). A Figura 1 ilustra estas formas de onda. A mais simples de produzir é a onda quadrada, que é gerada através de um chaveamento *on/off* da tensão de entrada e apresenta alto conteúdo harmônico e baixa qualidade de onda. A técnica de modulação de seis pulsos reduz o conteúdo harmônico, mas ainda apresenta distorção da forma de onda, o que pode levar a problemas de compatibilidade eletromagnética. Já a técnica de modulação PWM senoidal é amplamente utilizada em inversores trifásicos, devido à sua capacidade de gerar uma forma de onda senoidal com baixo conteúdo harmônico e alta qualidade de onda (ABDELHAKIM; BLAABJERG; MATTAVELLI, 2018). A escolha da forma de onda da saída do inversor dependerá do tipo de aplicação e dos requisitos do sistema de geração fotovoltaica, sendo importante escolher uma forma de onda

que minimize o conteúdo harmônico e a distorção da forma de onda para garantir um desempenho ideal do sistema. Existem ainda outras técnicas de modulação e formas de onda utilizadas em inversores trifásicos, como a modulação por deslocamento de fase (PSM) e a modulação por vetores de espaço (SVM), que podem oferecer melhorias adicionais na qualidade de onda da saída (WU et al., 2020; RAJLAXMI; BEHERA; PANDA, 2020).

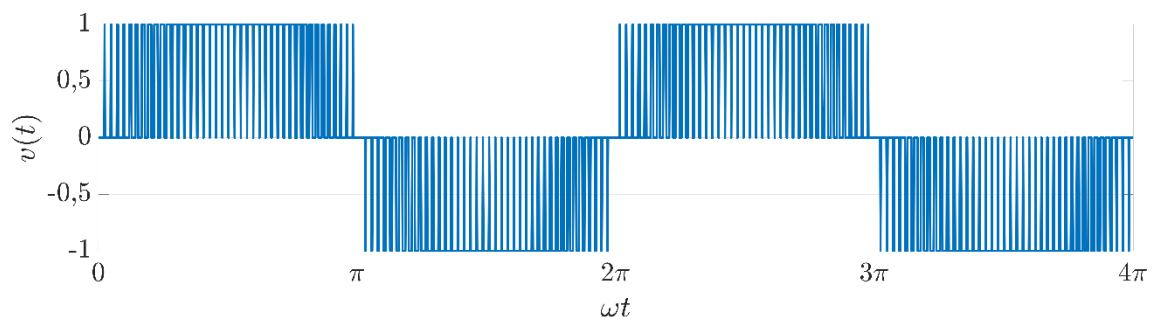
Figura 1 – Formas de onda típicas de inversores de frequência.



(a) onda quadrada



(b) seis pulsos



(c) pwm senoidal

Fonte: o próprio autor (2023).

Com base no exposto, este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto de um protótipo de inversor trifásico com modulação PWM senoidal para utilização em sistemas fotovoltaicos isolados, com foco na validação da topologia do circuito eletrônico e do algoritmo de controle. Serão discutidos os principais conceitos e aplicações de inversores de frequência trifásicos nesse tipo de sistema, com foco na alimentação de cargas elétricas remotas. Além disso, serão abordados os cuidados necessários na seleção de componentes e na construção do inversor, visando garantir sua eficiência e confiabilidade.

Materiais e métodos

O protótipo do inversor será projetado com base na pesquisa bibliográfica realizada, e envolverá a montagem e validação experimental do dispositivo, com foco na validação do circuito eletrônico que implementa o inversor e do *software* de controle.

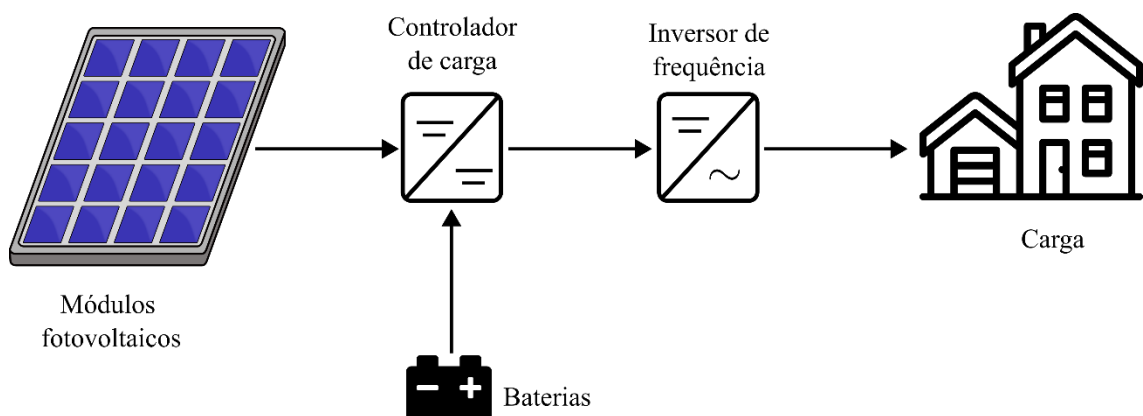
Para a montagem, serão necessários resistores, diodos, capacitores, circuitos integrados e transistores, os quais serão especificados nas próximas seções. O controle e acionamento do inversor é feito utilizando uma placa de desenvolvimento ESP32, que se trata de um dispositivo IoT (Internet das Coisas) que consiste de um microprocessador de baixa potência dual core *Tensilica Xtensa* 32-bit LX6 com suporte embutido à rede *WiFi*, *Bluetooth v4.2* e memória *flash* integrada. Dentre as principais características deste dispositivo, pode-se citar o baixo consumo de energia, alto desempenho de potência, robustez, versatilidade e confiabilidade.

Os testes e validação experimental do protótipo envolverão o acionamento de um motor de indução trifásico com potência de 1/4 cv com um alternador acoplado ao seu eixo operando como carga. Serão analisadas as formas de onda produzidas pelo inversor quanto à distorção harmônica total (DHT), ao desbalanço de tensão e aos ângulos entre as fases, de forma a verificar se as tensões de saída do protótipo atendem às principais normas técnicas quanto à qualidade da energia gerada.

Sistemas de energia fotovoltaica isolados

Um sistema de energia fotovoltaica isolado opera desconectado da rede elétrica convencional, sendo composto por um conjunto de módulos fotovoltaicos que convertem a energia do sol em eletricidade, baterias para armazenar a energia gerada pelos painéis solares, um controlador de carga para gerenciar a carga e descarga das baterias e um inversor para converter a energia em corrente contínua gerada pelos módulos solares em energia elétrica de corrente alternada. A Figura 2 mostra um arranjo típico de um sistema de energia fotovoltaica isolado. Adicionalmente, muitos sistemas isolados possuem também um conversor CC-CC elevador na entrada do inversor para aumentar a amplitude da tensão gerada pelos módulos solares até o valor necessário para a saída em CA, geralmente 127 V ou 220 V. Outra alternativa possível em sistemas de menor potência é a utilização de transformadores na saída do inversor, sem a necessidade da inclusão do conversor CC-CC na entrada.

Figura 2 - Esquematização de um sistema fotovoltaico de geração de energia isolado.

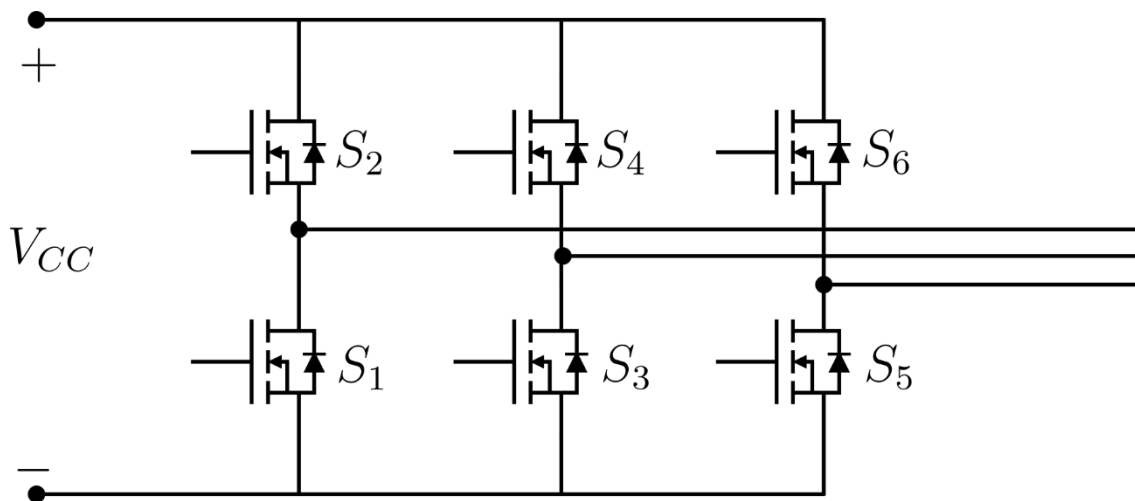


Fonte: o próprio autor (2023).

O inversor de frequência trifásico

O arranjo básico de um inversor de frequência trifásico é mostrado na Figura 2. Este inversor é formado por três braços em paralelo, sendo cada braço constituído por duas chaves em série, formando uma topologia de meia ponte. Conforme pode ser visto analisando a Figura 3, é necessário garantir que duas chaves de um mesmo braço nunca conduzam simultaneamente; caso esta situação ocorra, será formado um curto-circuito que fará uma corrente muito elevada circular pelo circuito, danificando o inversor e a carga acoplada a ele.

Figura 3 - Diagrama de um inversor trifásico.



Fonte: o próprio autor (2023).

Devido à possibilidade de utilização do inversor no acionamento de cargas indutivas tais como motores e compressores, é necessário que cada uma das chaves que compõe o inversor consiga operar em quatro quadrantes. Assim, todas as combinações possíveis entre tensões positivas e negativas e correntes positivas e negativas devem ser implementáveis pelas chaves, o que pode ser realizado utilizando MOSFETs (transistores de efeito de campo de metal-óxido-semicondutor) de potência. Além de possuírem diodos em antiparalelo já integrados em seu encapsulamento, estes dispositivos são amplamente

utilizados em inversores de frequência devido às suas características de alta velocidade de comutação e baixa resistência em estado ligado (AHMED, 2000).

Neste trabalho, optou-se pelo modelo IPP60R120C7 da empresa Infineon Technologies devido à possibilidade de operar com tensões entre o dreno e a fonte de até 650V e por fornecer correntes de dreno de até 31A de forma contínua e 66A de forma pulsada (INFINEON TECHNOLOGIES, 2015).

Acionamento das chaves do inversor

É amplamente conhecido que o estado “desligado” de um MOSFET NMOS é obtido quando uma tensão de zero volts ou menos é aplicada entre a porta (*gate*) e a fonte (*source*) do dispositivo, resultando em uma operação na região de corte com o transistor se comportando como um circuito aberto. O estado “ligado” ocorre quando uma tensão maior do que a tensão de *threshold* é aplicada entre os terminais de porta e fonte do dispositivo. Para o componente escolhido, a menor tensão que satura o MOSFET é 10 volts para correntes drenadas no nível exigido pelo inversor (INFINEON TECHNOLOGIES, 2015).

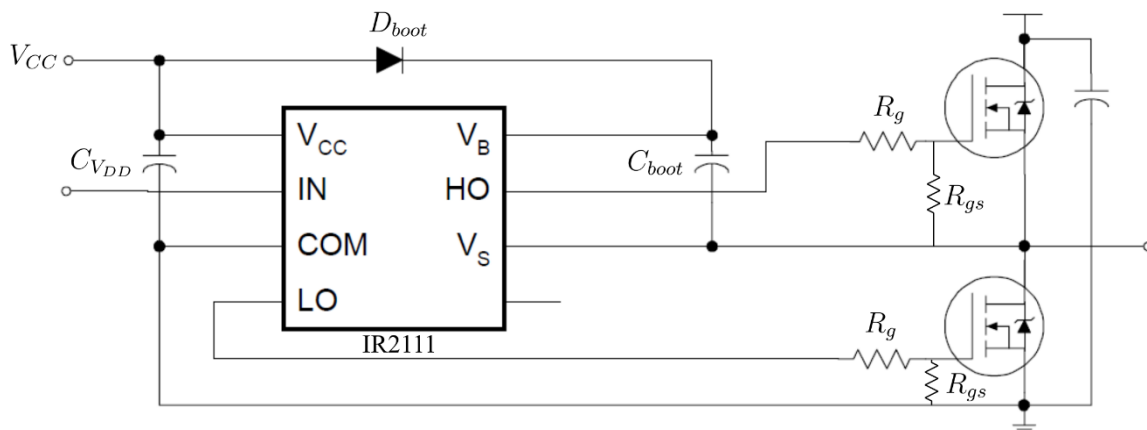
No caso dos MOSFETs S_1 , S_3 e S_5 mostrados na Figura 2, o acionamento é simples devido à fonte estar conectada ao terminal de terra do inversor, bastando aplicar a tensão necessária ao terminal da porta para saturar o dispositivo fazendo-o conduzir. Já no caso de S_2 , S_4 e S_6 , o fato do terminal de fonte destes dispositivos estar conectado à carga e ao dreno dos outros MOSFETs que compõem as pontes faz necessário o uso de outros dispositivos de acionamento para que a tensão aplicada entre os terminais de porta e fonte seja suficientemente alta para saturar estas chaves. Este dispositivo que aciona os MOSFETs é usualmente conhecido como *driver*.

Uma das alternativas possíveis é a utilização de *drivers* baseados em circuitos de *bootstrap*, cujas principais características são a simplicidade e o baixo custo (INFINEON TECHNOLOGIES, 2015). Neste trabalho, optou-se por esta alternativa através da utilização do circuito integrado IR2111 da empresa International Rectifier. Além de implementar a topologia do circuito de *bootstrap* com tensões de até 600V, o IR2111 também foi escolhido por fornecer os dois

sinais de acionamento da meia ponte em fase com um único sinal de entrada e já nos níveis adequados de tensão, além de um tempo morto de 650 ns (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2004), o qual se mostrou adequado nos testes realizados. Estas características simplificam a geração dos sinais de acionamento do inversor, tornando o *software* mais simples, e aumentam a robustez do sistema, garantindo via *hardware* que duas chaves de um mesmo braço nunca irão conduzir simultaneamente. A Figura 3 mostra a aplicação do IR2111 integrado a um braço do inversor.

A Figura 4 mostra que o circuito de acionamento de um braço do inversor também é composto por um diodo, um capacitor e um resistor conectado à porta de cada MOSFET. De acordo com Texas Instruments (2018a), o diodo D_{boot} deve possuir um tempo de recuperação reversa curto e suportar a tensão do barramento CC que alimenta os braços do inversor. Assim, optou-se pelo diodo FR107W da Jingdao Microelectronics, o qual possui tempo de recuperação reversa típico de 250ns e suporta tensões reversas de até 1000V (JINGDAO MICROELECTRONICS, 2016), sendo estas características adequadas para um inversor operando na frequência de chaveamento escolhida.

Figura 4 - Circuito de acionamento de um braço do inversor



Fonte: adaptado de International Rectifier (2004).

De acordo com Texas Instruments (2018a) a capacitância de C_{boot} deve ser capaz de fornecer toda a energia necessária para acionar o MOSFET

superior do braço sem perder mais de 10% de sua própria carga, de forma a suportar mudanças na capacitância da porta ocasionadas por flutuações da tensão CC e de temperatura, bem como para suportar ciclos perdidos que possam ocorrer em transientes de carga do inversor. Desta forma, o valor de C_{boot} deve ser determinado a partir da seguinte equação:

$$C_{boot} \geq 10C_g, \quad (1)$$

onde C_g é a capacitância da porta do MOSFET e é determinada a partir de:

$$C_g = \frac{Q_g}{V_{DD} - V_{Dboot}}. \quad (2)$$

Na última expressão, Q_g é a carga da porta do MOSFET, V_{DD} é a tensão do IR2111, a qual é aplicada entre os terminais da porta e da fonte dos MOSFETS, e V_{Dboot} é a tensão do diodo em condução. Considerando as Equações (1) e (2) e as informações fornecidas nos *datasheets* dos componentes utilizados, chegou-se ao valor de $C_{boot} \geq 98,16 \text{ nF}$. Ainda segundo Texas Instruments (2018a), o valor do capacitor C_{VDD} deve ser pelo menos dez vezes superior ao valor de C_{boot} , de forma que ele não seja completamente drenado durante o tempo de carga de C_{boot} . Adicionalmente, este valor garante uma variação máxima de 10% da tensão em C_{VDD} na pior situação de operação, que ocorre quando C_{boot} está sem carga e precisa ser completamente carregado.

O resistor conectado à porta dos MOSFETs, R_g , deve ser determinado a partir da especificação máxima de corrente do *driver* de acordo com a seguinte equação (INFINEON, 2015):

$$R_g = \frac{V_{DD}}{I_G} - R_{DSon}, \quad (3)$$

onde I_G é a corrente máxima de carga/descarga fornecida pelo driver e R_{DSon} é a resistência entre o dreno e a fonte do MOSFET quando o mesmo está ligado. Considerando as informações dos *datasheets* do IR2111 e do IPP60R120C7, o

valor obtido para R_g foi igual a $56,96\Omega$. Considerando que este é o valor mínimo a ser utilizado, definiu-se $R_g = 100\Omega$.

Por fim, embora não faça parte do driver de acionamento do braço do inversor, o resistor entre a porta e a fonte dos MOSFETS, R_{GS} , é necessário para a proteção do semicondutor quanto a disparos acidentais durante a inicialização do inversor e por elevado $\frac{dv}{dt}$ (TEXAS INSTRUMENTS, 2018b). Analisando diversos *datasheets* de drivers de MOSFETs, constatou-se que R_{GS} deve se situar entre $1k\Omega$ e $10k\Omega$, sendo que menores valores desse parâmetro aumentam a proteção contra disparo acidental, porém também aumentam as perdas. Desta forma, optou-se por um valor intermediário de $R_{GS} = 3,6k\Omega$.

Circuito eletrônico do inversor

Com base no exposto na seção anterior, foi desenvolvido o circuito eletrônico mostrado na Figura 5 para implementação do inversor trifásico.

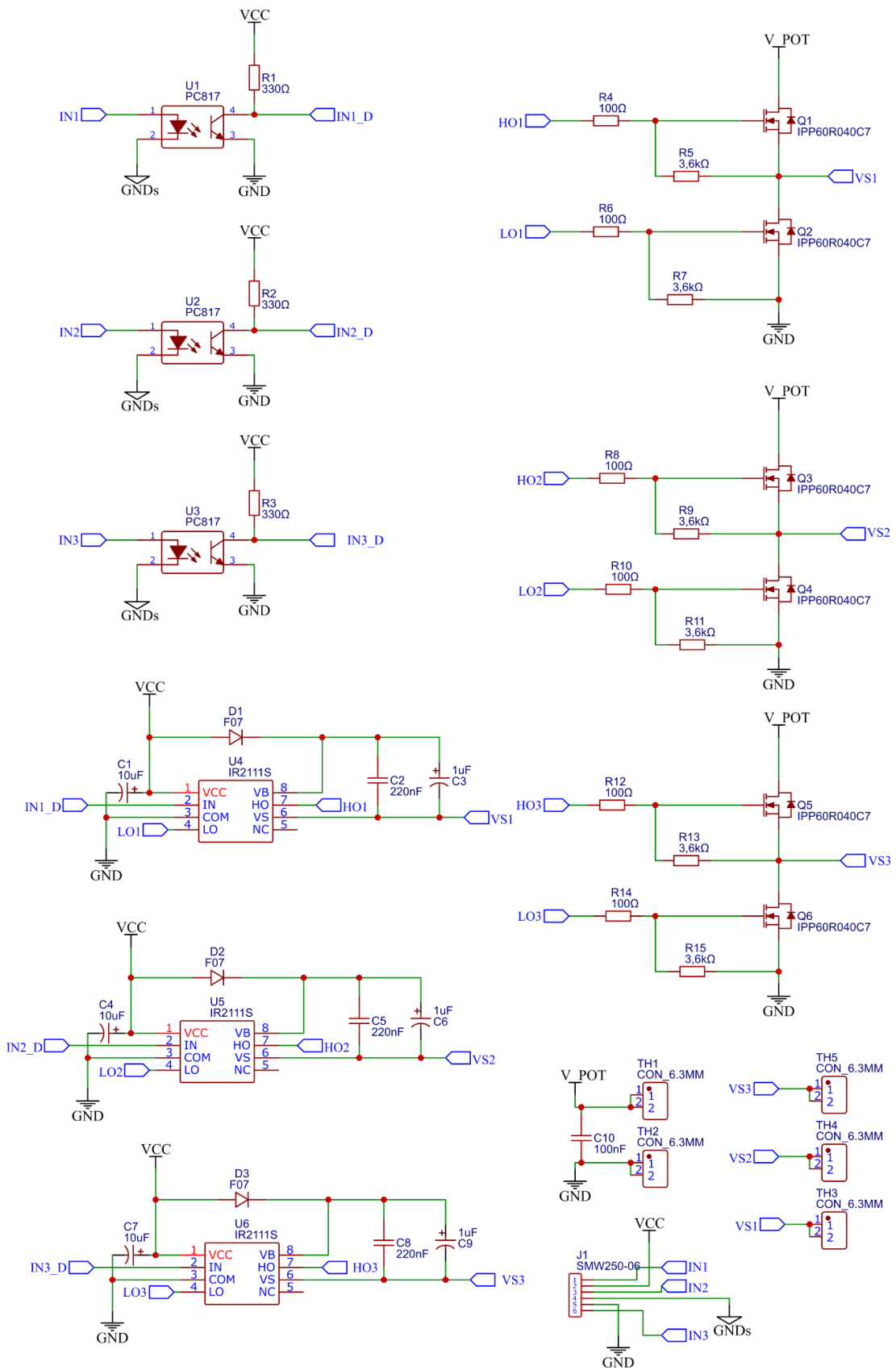
Além dos componentes necessários para a implementação dos *drivers* e dos próprios MOSFETs, o circuito eletrônico também utiliza opto acopladores PC817 para garantir a isolação galvânica entre o circuito de controle e o inversor.

Controle e acionamento do inversor

Conforme explicado, o controle e acionamento do inversor são feitos utilizando uma placa de desenvolvimento ESP32 utilizando PWM senoidal para o acionamento das chaves estáticas. Além disso, optou-se por uma frequência de PWM de 5 kHz com precisão de 10 *bits*. Como cada meia ponte do inversor é acionada por um *driver*, também foi necessário associar uma saída digital PWM do ESP32 a cada um destes *drivers*, sendo utilizados os pinos 2, 4 e 15.

Resumidamente, o algoritmo de controle do inversor foi desenvolvido de forma a utilizar uma tabela com valores da função seno previamente calculados para 252 instantes de tempo igualmente espaçados.

Figura 5 – Esquemático do inversor trifásico.

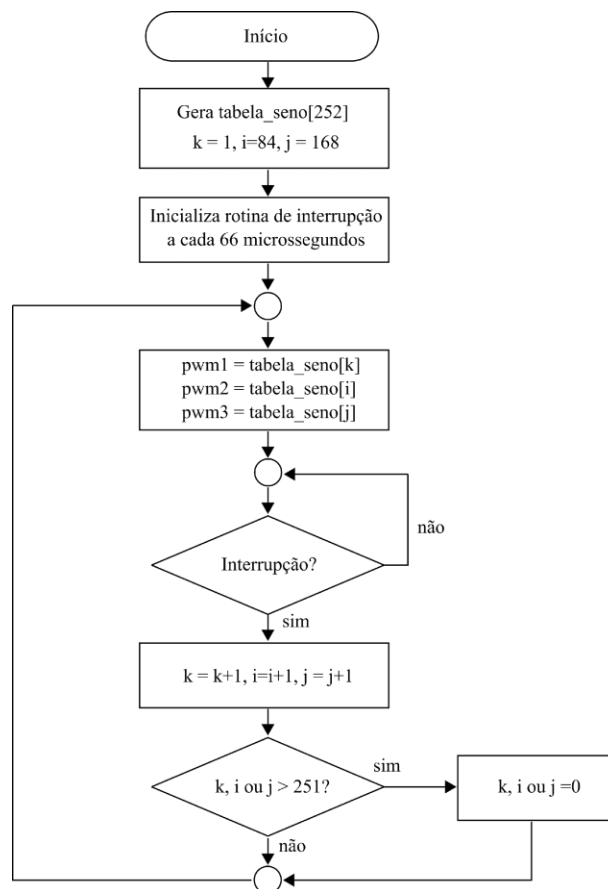


Fonte: o próprio autor (2023).

Inicialmente, a saída digital associada a cada *driver* é inicializada em uma posição da tabela de seno de forma a manter um ângulo de -120° entre os senos das fases 1 e 2 e -240° entre os senos das fases 1 e 3. Assim, associando a fase 1 ao pino 15, o mesmo é inicializado na posição 1 da tabela, enquanto o pino 4, associado à fase 2, é inicializado na posição 84 e o pino 2, associado à fase 3, é inicializado na posição 168. Uma interrupção por tempo ocorre a cada $66 \mu\text{s}$, sendo as posições de cada fase na tabela incrementadas em uma unidade. Este período de tempo foi escolhido pois faz a tabela do seno ser completamente percorrida em todos os seus 252 elementos a cada 16,66 ms, resultando em três senos com frequência de 60 Hz. A Figura 6 apresenta o fluxograma do algoritmo implementado.

O algoritmo mostrado no fluxograma da Figura 6 foi implementado no ambiente de desenvolvimento IDE Arduino, resultando no código mostrado na Figura 7.

Figura 6 – Fluxograma do algoritmo de controle do inversor.



Fonte: o próprio autor (2023).

Figura 7 – Código do algoritmo implementado no IDE Arduino.

```
hw_timer_t *Timer0_Cfg = NULL;

int table[] = {512,524,537,550,562,575,588,600,613,625,638,650,662,674,686,698,710,722,733,745,756,767,778,
789,800,810,820,830,840,850,859,869,878,886,895,903,911,919,927,934,941,948,954,961,967,972,978,983,988,992,
996,1000,1004,1007,1010,1013,1015,1017,1019,1020,1022,1022,1023,1023,1022,1022,1020,1019,1017,1015,1013,
1010,1007,1004,1000,996,992,988,983,978,972,967,961,954,948,941,934,927,919,911,903,895,886,878,869,859,850,
840,830,820,810,800,789,778,767,756,745,733,722,710,698,686,674,662,650,638,625,613,600,588,575,562,550,537,
524,512,499,486,473,461,448,435,423,410,398,385,373,361,349,337,325,313,301,290,278,267,256,245,234,223,213,
203,193,183,173,164,154,145,137,128,120,112,104,96,89,82,75,69,62,56,51,45,40,35,31,27,23,19,16,13,10,8,6,4,
3,1,1,0,0,0,1,1,3,4,6,8,10,13,16,19,23,27,31,35,40,45,51,56,62,69,75,82,89,96,104,112,120,128,137,145,154,164,
173,183,193,203,213,223,234,245,256,267,278,290,301,313,325,337,349,361,373,385,398,410,423,435,448,461,473,
486,499};

int k = 0, i=84, j=168;
float T = 66;

void Timer0_ISR()
{
    k=k+1;
    if (k == 252) {
        k = 0;
    }
    i=i+1;
    if (i == 252) {
        i = 0;
    }
    j=j+1;
    if (j == 252) {
        j = 0;
    }
}

void setup()
{
    pinMode(2, OUTPUT);
    pinMode(4, OUTPUT);
    pinMode(15, OUTPUT);
    ledcAttachPin(15, 0);//Atribuimos o pino 15 ao canal 0.
    ledcAttachPin(4, 1);//Atribuimos o pino 4 ao canal 1.
    ledcAttachPin(2, 2);//Atribuimos o pino 2 ao canal 2.
    ledcSetup(0, 5000, 10);
    ledcSetup(1, 5000, 10);
    ledcSetup(2, 5000, 10);
    Timer0_Cfg = timerBegin(0, 80, true);
    timerAttachInterrupt(Timer0_Cfg, &Timer0_ISR, true);
    timerAlarmWrite(Timer0_Cfg, T, true);
    timerAlarmEnable(Timer0_Cfg);
}

void loop()
{
    ledcWrite(0, (1023-table[k]));
    ledcWrite(1, (1023-table[i]));
    ledcWrite(2, (1023-table[j]));
}
```

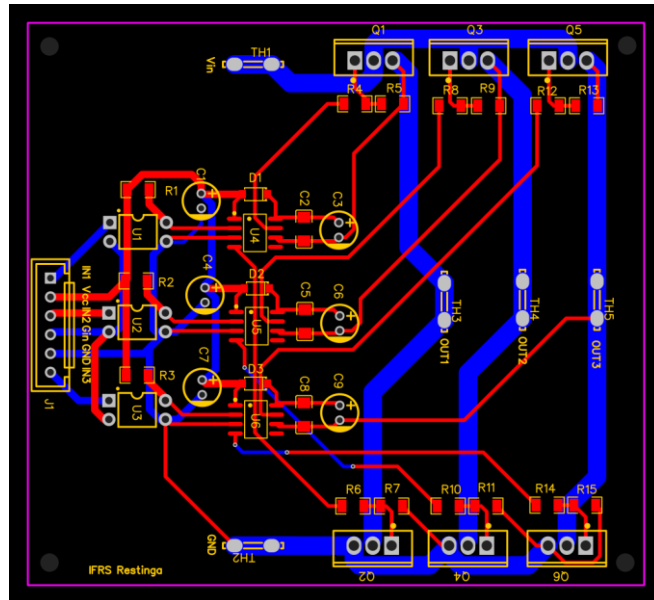
Fonte: o próprio autor (2023).

Protótipo

Considerando o circuito eletrônico mostrado na Figura 5, projetou-se uma placa de circuito impresso para o inversor utilizando o *software* EasyEDA,

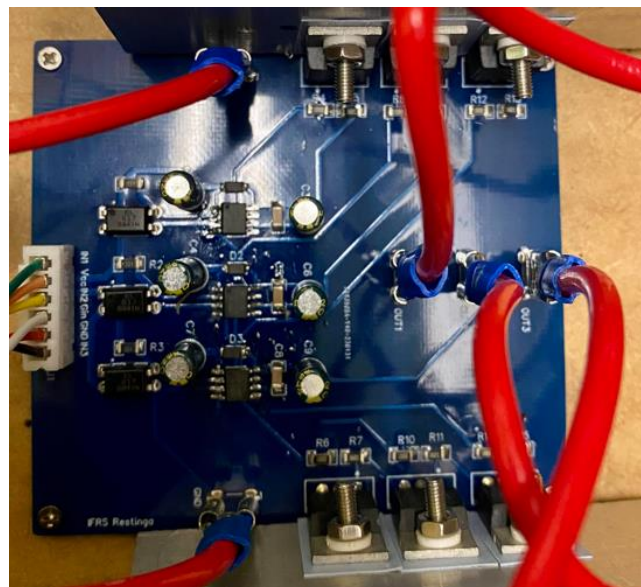
resultando na placa mostrada na Figura 8. Já a Figura 9 mostra a placa fabricada com todos os componentes soldados.

Figura 8 – Placa de circuito impressa do inversor trifásico.



Fonte: o próprio autor (2023).

Figura 9 – Protótipo do inversor trifásico.



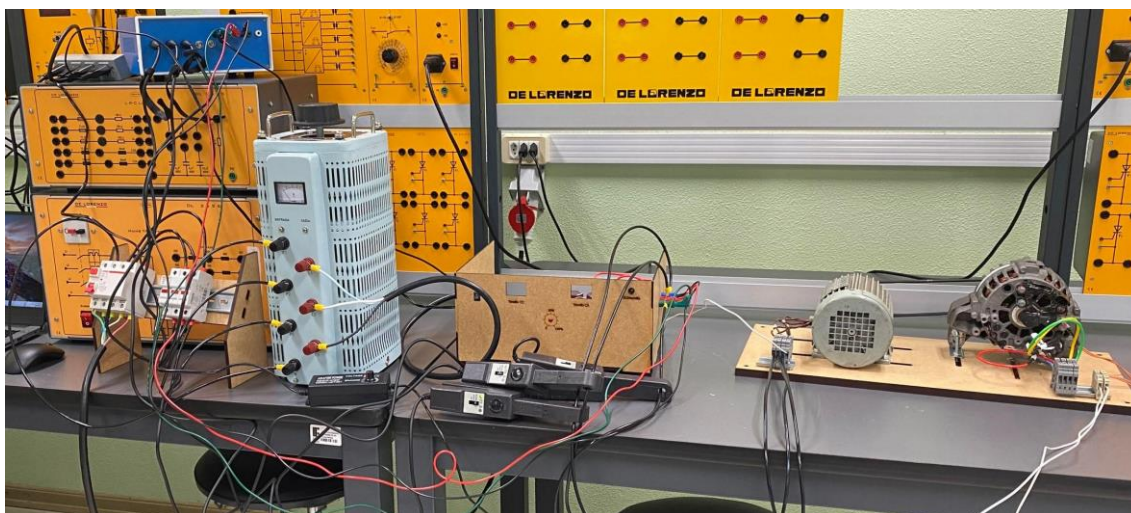
Fonte: o próprio autor (2023).

Testes e validação experimental

A validação do protótipo desenvolvido envolveu o acionamento de um motor de indução trifásico de 220V, 4 polos, 60 Hz e potência de 1/4 cv. As formas de onda das tensões e correntes utilizadas nesta análise foram adquiridas utilizando uma placa de aquisição de dados USB-6212 da *National Instruments*. A Figura 10 ilustra a plataforma experimental utilizada no ensaio. Além do inversor e do motor de indução acoplado a um alternador operando como carga, também foi utilizado um *variac* trifásico em conjunto com uma ponte retificadora trifásica e um banco de capacitores para gerar a tensão CC necessária para o inversor. Nos ensaios realizados, utilizou-se uma tensão CC de aproximadamente 320 volts.

Ressalta-se que como o principal objetivo deste trabalho é validar o circuito eletrônico e o *software* de controle e acionamento do inversor, não foi realizado um estudo detalhado das perdas nem do rendimento, sendo esta análise sugerida para trabalhos futuros. Adicionalmente, por questões de segurança e por limitações dos equipamentos disponíveis no laboratório, não foram testadas tensões de fase superiores a 130 volts eficazes.

Figura 10 – Plataforma experimental utilizada no ensaio.



Fonte: o próprio autor (2023).

Tabela 1 – Resultados quanto à qualidade das tensões geradas.

critério	valor	limite da norma
Distorção harmônica total	5,97%	8% (IEEE Std 519-2022)
Desbalanço de tensão	1,29%	2,5% (IEEE Std. 45-2002)
Ângulo entre as fases 1 e 2	-120,28°	-
Ângulo entre as fases 1 e 3	-241,18°	-
Ângulo entre as fases 2 e 3	-120,90°	-

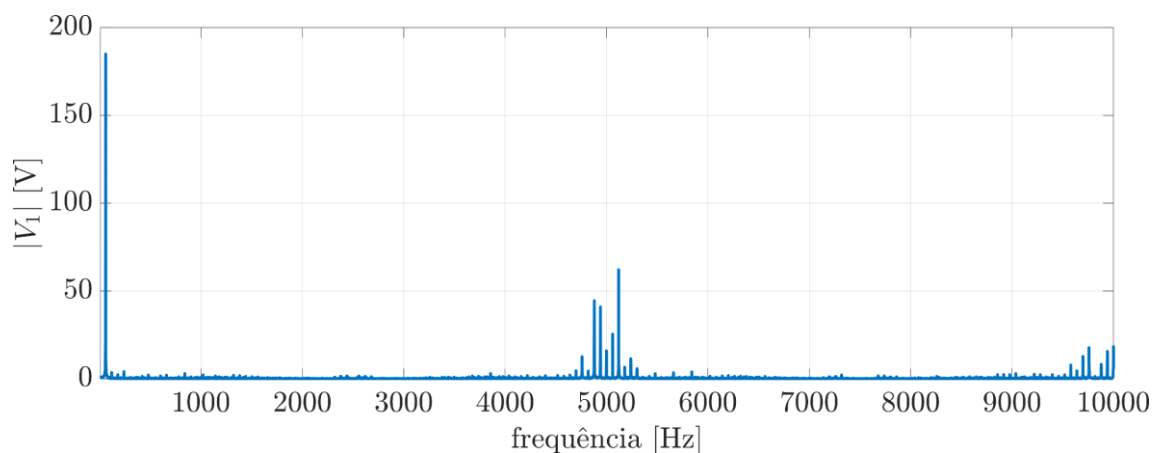
Fonte: o próprio autor (2023).

A averiguação da qualidade das tensões geradas pelo inversor se deu através da análise da Distorção Harmônica Total, do desbalanço de tensão e do ângulo entre as fases. Estes resultados são mostrados na Tabela 1. A Distorção Harmônica Total (DHT) foi calculada de acordo com a norma IEEE Std 519-2022 (IEEE, 2022), onde a DHT é calculada para os 50 primeiros componentes harmônicos a partir da equação que segue.

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (4)$$

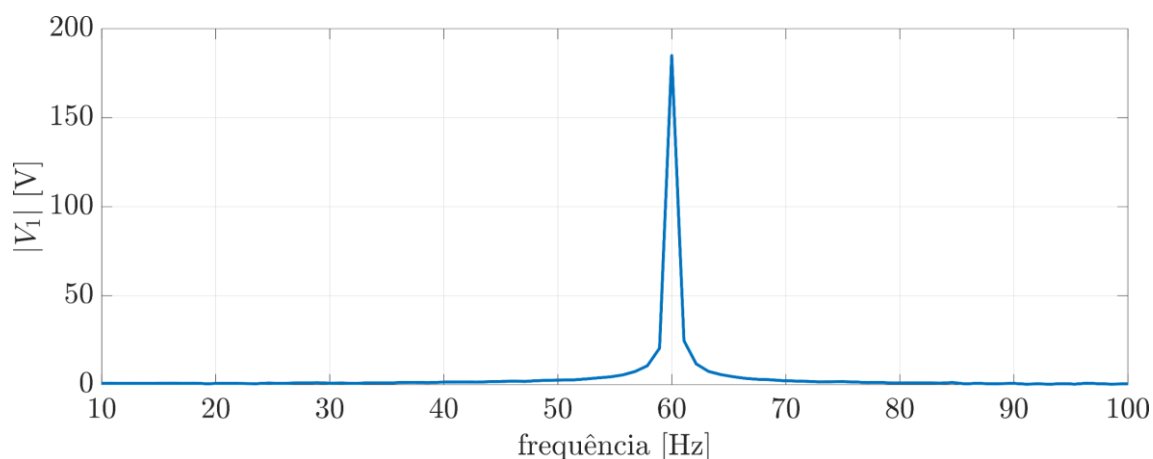
Na última expressão, h é o componente harmônico, h_{max} é o componente harmônico máximo ao qual se deseja calcular a DHT, V_h é o valor eficaz do componente harmônico h da tensão e V_1 é o valor eficaz do componente fundamental da tensão. De acordo com a norma IEEE Std 519-2022, deve-se calcular a DHT até $h_{max} = 50$ e, para tensões abaixo de 1 kV, ela deve ficar abaixo de 8%. Analisando a segunda linha da Tabela 1, conclui-se que este requisito foi atingido, pois a média aritmética da DHT obtida entre as três fases foi de 5,97%. A Figura 11 mostra o espectro da tensão da fase 1, onde nota-se que o conteúdo harmônico do sinal se concentra na componente fundamental e nas componentes próximas da frequência do PWM. Já a Figura 12 mostra a ampliação do espectro da tensão da fase 1, onde nota-se que a frequência da componente fundamental é 60 Hz, conforme desejado.

Figura 11- Espectro da tensão da fase 1



Fonte: o próprio autor (2023).

Figura 12- Ampliação do espectro da tensão da fase 1.

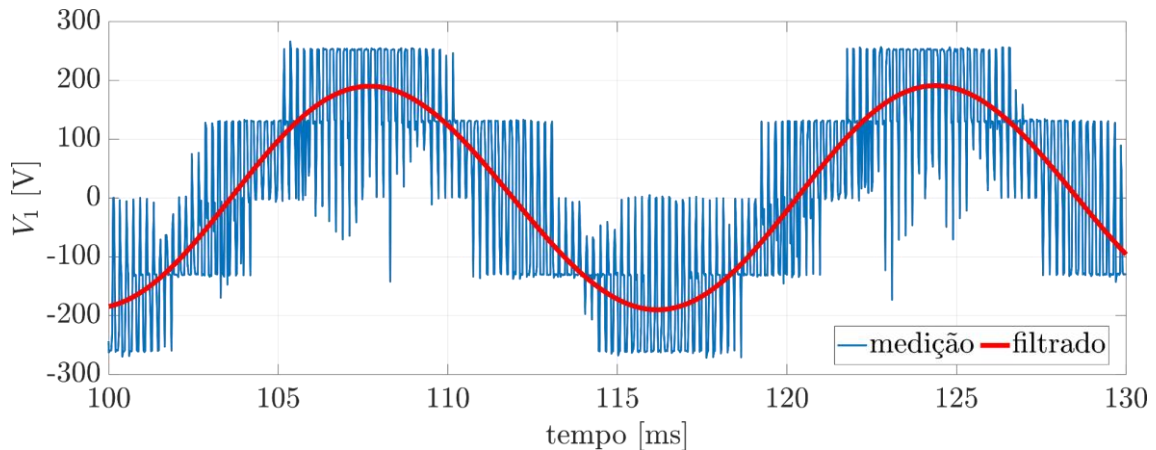


Fonte: o próprio autor (2023).

A Figura 13 apresenta a forma de onda medida da tensão da fase 1, V_1 , juntamente com a forma de onda filtrada utilizando um filtro IIR passa-baixas de ordem 10 e frequência de corte de 120 Hz. Na Figura 14 são mostradas as formas de onda filtradas das tensões das três fases, onde nota-se que há um pequeno desbalanço nestas tensões. Não obstante, conforme constatado na terceira linha da Tabela 1, o desbalanço é de apenas 1,29%, o que está abaixo do limite máximo de 2,5% estipulado pela norma IEEE Std. 45-2002 (IEEE, 2002). Adicionalmente, as três últimas linhas da Tabela 1 mostram que o ângulo

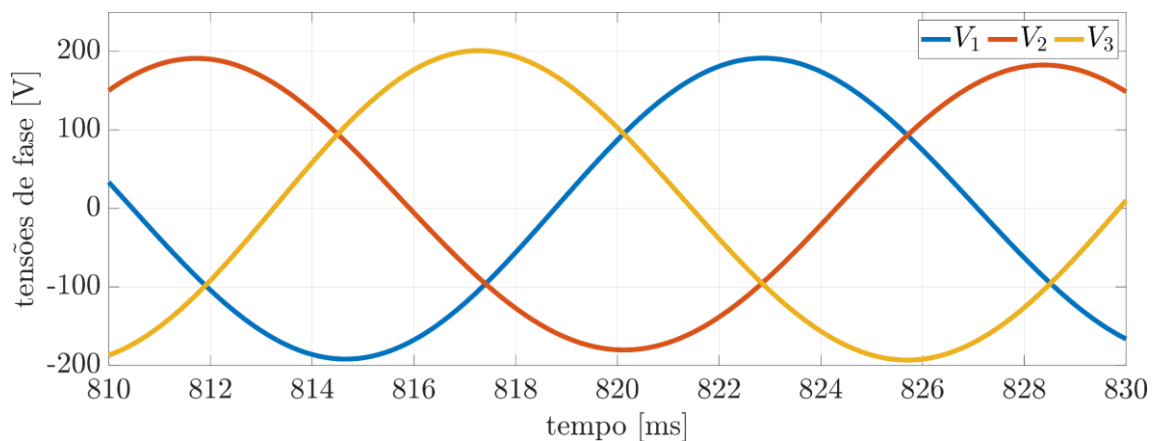
entre as fases apresentou valores satisfatórios, sendo a maior divergência de apenas $1,18^\circ$, observada entre as fases 1 e 3. Assim, pode-se concluir que o protótipo desenvolvido atende aos requisitos mínimos de qualidade das tensões geradas, provando-se próprio para utilização em instalações elétricas isoladas.

Figura 13- Tensão da fase 1.



Fonte: o próprio autor (2023).

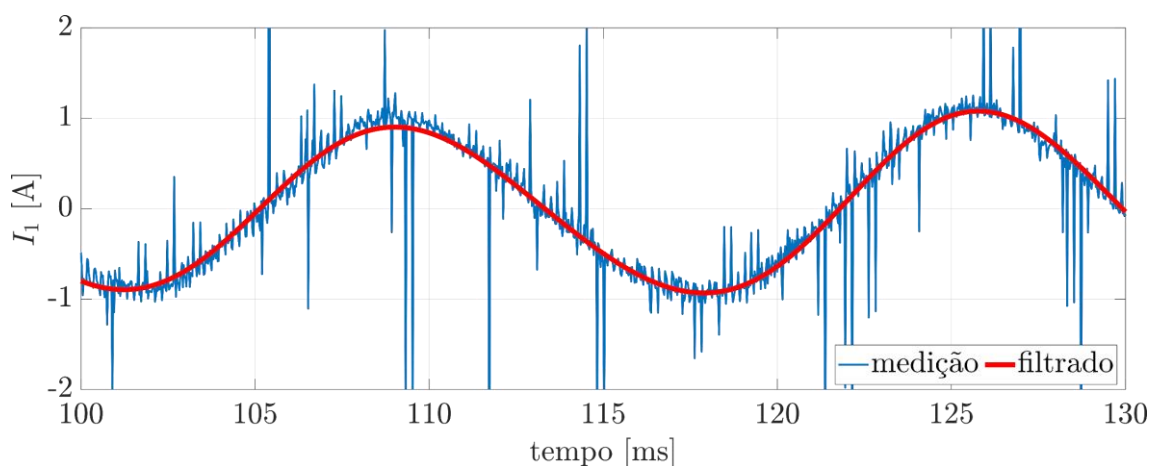
Figura 14- Tensões de fase filtradas.



Fonte: o próprio autor (2023).

Por fim, a Figura 15 mostra a corrente da fase 1 medida durante o ensaio juntamente com sua forma de onda filtrada. Com um fator de potência de 0,84, a potência fornecida ao motor durante o ensaio foi de 234,59W. Embora os MOSFETs escolhidos possuam especificação de potência bem superior a esta, devido a limitações de tensão e corrente dos equipamentos disponíveis para os ensaios e por questões de segurança, não foram testadas potências mais elevadas.

Figura 15 – Corrente da fase 1.



Fonte: o próprio autor (2023).

Conclusões

Este trabalho apresentou o projeto de um protótipo de um inversor trifásico para uso em sistemas de energia fotovoltaica isolados, com foco na validação da topologia do circuito eletrônico e do software de controle e acionamento do inversor. A validação experimental do protótipo foi realizada utilizando um motor de indução com potência nominal de 1/4 cv, tendo sido analisada a qualidade das tensões geradas pelo inversor. Em termos gerais, pode-se concluir que o protótipo é capaz de produzir tensões que atendem aos requisitos de qualidade de normas internacionais, apresentando Distorção Harmônica Total de 5,97%, abaixo do limite de 8% da norma IEEE Std 519-2022, e desbalanço de tensão de apenas 1,29%, abaixo do limite de 2,5% dado pela norma IEEE Std. 45-2002. Assim, pode-se concluir que o inversor projetado não apenas é próprio para utilização em instalações elétricas isoladas, como também poderia ser utilizado em sistemas conectados à rede e híbridos, pois produz tensões com qualidade suficiente para tanto.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a realização de análise térmica e de perdas do inversor, visando o desenvolvimento de um novo protótipo capaz de utilizar toda a capacidade de potência dos semicondutores

que compõem o dispositivo, além da avaliação do funcionamento do inversor acionando cargas desequilibradas. Sugere-se também o desenvolvimento de um novo algoritmo de controle do inversor para que seja possível conectá-lo à rede elétrica e utilizá-lo em sistemas híbridos e em sistemas conectados à rede elétrica.

Referências

AHMED, Ashfaq. *Eletrônica de Potência*. 1. ed. Pearson, 2000

ABDELHAKIM, A. BLAABJERG, F. MATTAVELLI, P. "Modulation Schemes of the Three-Phase Impedance Source Inverters—Part I: Classification and Review," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6309-6320, Aug. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2793255.

CARROQUINO, J. ESCRICHE-MARTÍNEZ, C. VALIÑO, L. DUFO-LÓPEZ, R. Comparison of Economic Performance of Lead-Acid and Li-Ion Batteries in Standalone Photovoltaic Energy Systems. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3587. <https://doi.org/10.3390/app11083587>

DARWISH, A. HOLLIDAY, D. AHMED, S. MASSOUD, A. M. WILLIAMS, B. W. A Single-Stage Three-Phase Inverter Based on Cuk Converters for PV Applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 797-807, Dec. 2014, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2313185.

HART, Daniel W. *Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos*. 1 ED. McGraw Hill - Artmed, 2011

IEEE. Definitions of Voltage Unbalance. *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22. 2002.

IEEE. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014)*. 2022.

INFINEON TECHNOLOGIES. Folha de dados do IPP60R040C7. 2015. Disponível em <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPP60R040C7-DS-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4624cb7f111014d479ac7c56893>.

INFINEON TECHNOLOGIES. Gate resistor for power devices. Application Note. 2015. Disponível em <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-EiceDRIVER-Gate_resistor_for_power_devices-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462518ffd8501523ee694b74f18>.

INTERNATIONAL RECTIFIER. Folha de dados do IR2111. 2004. Disponível em <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2111-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c810e51682>.

IRENA. Off-grid renewable energy solutions: Global and regional status trends. 2022. Disponível em <<https://www.irena.org/Publications/2022/Dec/Off-grid-renewable-energy-statistics-2022>>

JINGDAO MICROELECTRONICS. Folha de dados do FR107W. 2016. Disponível em <https://doc.hotking.com/pdf/319/C123909_1501836216743866149.pdf>.

KARANAYIL, B. AGELIDIS, V. G. POU, J. Performance evaluation of three-phase grid-connected photovoltaic inverters using electrolytic or polypropylene film capacitors. IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 5, no. 4, pp. 1297–1306, Oct. 2014.

MANSOR, M. A. HASAN, K. OTHMAN, M. M. NOOR, S. Z. MUSIRIN, I. Construction and Performance Investigation of Three-Phase Solar PV and Battery Energy Storage System Integrated UPQC. IEEE Access, vol. 8, pp. 103511-103538, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2997056.

MAURYA, A. K. CHAUHAN, Y. K. Performance of isolated generating system with multilevel inverter using photovoltaic source. 2013 Annual International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy, Kanjirapally, India, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/AICERA-ICMiCR.2013.6576004.

PRABHAKARAN, K. K. KARTHIKEYAN, A. VARSHA, S. PERUMAL, B. V. MISHRA, S. Standalone Single Stage PV-Fed Reduced Switch Inverter Based PMSM for Water Pumping Application. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 6, pp. 6526-6535, Nov.-Dec. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3023870.

RAJLAXMI, E. BEHERA, S. PANDA, S. K. Comparison of Inverter Control by SPWM and SVPWM Method in Standalone PV System. 2020 IEEE International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC), Gunupur Odisha, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/iSSSC50941.2020.9358912.

RESEARCH AND MARKETS. Global Three-Phase Inverters Market (2021 to 2025) - by Type, End-user, and Geography. 2021. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5315431/global-three-phase-inverters-market-2021-to-2025>

SAÇLIA, M. AYANA, SILSÜPÜRA, O.M. TÜRKAYA, B.E. Power quality comparison of single-phase and three-phase inverter topologies for renewable energy systems. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, vol. 8, no. 2, March 2019: pp. 174-183. Doi: 10.12720/sgce.8.2.174-183

TEXAS INSTRUMENTS. Bootstrap Circuitry Selection for Half-Bridge Configurations. Application Report. 2018a. Disponível em <<https://www.ti.com/lit/an/slva887/slva887.pdf>>.

TEXAS INSTRUMENTS. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. Application Report. 2018b. Disponível em <<https://www.ti.com/lit/ml/slva618a/slva618a.pdf?ts=1682433221032>>.

WU, X. XIONG, C. YANG, S. YANG, H. FENG, X. A Simplified Space Vector Pulsewidth Modulation Scheme for Three-Phase Cascaded H-Bridge Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 4, pp. 4192-4204, April 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2934821.