

ACIONAMENTO DE INVERSOR MULTILEVEL PARA APLICAÇÃO FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DE ALGORITMO DE MINIMIZAÇÃO DE THD

Ricardo dos Santos Pereira – ricardos.pereira77@gmail.com

Leonel Augusto Calliari Poltosi – lpoltosi@unisinos.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. O trabalho aborda as tecnologias de inversores que são empregadas em aplicações relacionadas à energia solar fotovoltaica. É apresentada uma topologia de inversor conhecido como Multilevel para ser aplicado a essa área de atuação. O trabalho traz as formas de modulação que são comumente utilizadas para essa topologia de inversores, sendo apresentadas duas famílias de modulações, que podem ser diferenciadas por usar a modulação por largura de pulso (PWM), ou por ser baseada em modulação em frequência fundamental. A principal análise que é levantada pelo trabalho é com relação à distorção harmônica que a onda de saída do inversor apresenta. Para a família de modulação baseada em frequência fundamental foi implementado um algoritmo que tem como objetivo minimizar a distorção harmônica total (THD) do inversor. O método de solução proposto para o sistema utiliza uma técnica de otimização denominada de Algoritmos Genéticos. Os resultados encontrados pelo algoritmo de otimização de THD são comparados com as modulações baseadas em PWM. Para a validação do conceito elaborado, foi desenvolvido um protótipo que utiliza a metodologia de otimização proposta. O protótipo apresentou resultados muito semelhantes com os encontrados nas simulações realizadas, validando o método implementado. A metodologia proposta, aplicada à mesma topologia de inversor, atingiu resultados de THD até 18% inferiores aos métodos de modulação baseados em PWM. Além de diminuir o THD, o método de modulação criado possibilita realizar o controle das harmônicas individuais da onda de saída do inversor.

Palavras-chave: Inversor Multilevel. Distorção Harmônica Total (THD). Energia Solar Fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade é a mais comum forma de utilização de energia pela civilização moderna, a qual promoveu uma forte dependência ao uso dessa forma de energia. No entanto, as tecnologias de geração de energia elétrica convencionais, principalmente as usinas termoeletricas, nucleares e as baseadas em combustível fóssil, possuem um alto custo de operação e um grande impacto ambiental. Além do mais, a extração de combustível fóssil tem se tornado cada vez mais difícil, aumentando os custos e, conseqüentemente, elevando o preço dos combustíveis. Por outro lado, a demanda de energia elétrica tem aumentado em todo o mundo. Em face desse cenário, grandes avanços tecnológicos na área de energias renováveis se iniciaram.

Dentre as fontes de energia renováveis, principalmente a implantação de microcentrais fotovoltaicas receberam fortes incentivos governamentais na forma de subsídios e financiamentos. O destaque da energia solar fotovoltaica ocorre em razão da grande queda no preço de seus componentes, sobretudo do próprio painel fotovoltaico. Cada vez mais as técnicas de fabricação vêm evoluindo a ponto de atingir um baixo custo de manufatura. Juntamente com a evolução dos painéis solares, os outros dispositivos que estabelecem um sistema fotovoltaico também vem sendo objetos de forte investimentos e pesquisas em muitas instituições e centros de pesquisa ao redor do mundo. Dentre os seus diversos usos, o que vem ganhando destaque no contexto nacional são os sistemas interligados à rede elétrica (*grid tie*).

No entanto a forma com que a energia é fornecida pelos geradores fotovoltaicos não é compatível com a maioria dos equipamentos convencionais, tanto domésticos e comerciais, quanto industriais utilizam. Sendo assim, para tornar essa energia de uma forma de consumo compatível do ponto de vista comercial, se faz necessária a conversão da energia contínua (c.c.), provinda dos geradores fotovoltaicos, em energia alternada (c.a.) para ser utilizada por aparelhos e equipamentos comuns. O responsável por realizar a conversão da energia elétrica de c.c. para c.a. são os chamados inversores fotovoltaicos.

Tendo em vista a grande importância que o inversor apresenta no sistema de geração de energia fotovoltaica, foram criadas normas brasileiras que regulamentam as características de funcionamento do inversor. Nesse contexto regulatório, no que diz respeito à avaliação de conformidade de equipamentos para energia fotovoltaica, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) publicou a portaria n° 004/2011 com o objetivo de estabelecer critérios e requisitos de conformidade para inversores fotovoltaicos.

Considerando o cenário de geração de energia de forma renovável, pretende-se contribuir com o avanço nos sistemas de energia fotovoltaica conectadas à rede (*grid tie*) e isoladas (*off grid*), buscando alternativas de desenvolvimento de um inversor *Multilevel* para aplicação solar. Além do mais são explorados métodos de chaveamento que minimize a Distorção

Harmônica Total (THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*) da onda de saída do inversor. Tendo em vista que o THD é um dos principais índices que caracterizam a qualidade da energia elétrica.

É importante reconhecer que a otimização do THD desenvolvida no trabalho somente trata do chaveamento com que o inversor trabalha. Normalmente se utilizam filtros para melhorar o desempenho de distorção harmônicas, porém o filtro representa um custo alto de produção e uma redução na eficiência do inversor. Dessa forma se faz pertinente o desenvolvimento de estudos que buscam outras alternativas para a redução de THD.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia elétrica é uma forma de energia que é proveniente de fontes, muitas vezes, escassas e finitas. Esse fato motiva e impulsiona a busca por tecnologias que utilizam fontes de energia abundantes e também as que reaproveitam energias que seriam descartadas. Isso favorece o uso de fontes de energia renováveis, como por exemplo a energia solar. A energia solar é dita como inesgotável, considerando-se a escala de existência do sol comparado a nossa civilização. Além disso é importante destacar o estado-da-arte dos sistemas de geração fotovoltaica, principalmente no que se refere a inversores fotovoltaicos.

2.1 Inversores

Os inversores para aplicação solar podem ser classificados em duas categorias, de acordo com a aplicação a qual ele será utilizado, podendo eles serem autônomos (*off grid*) e conectado à rede (*grid tie*). De acordo com Villalva e Gazoli (2012), em sistemas autônomos os inversores fornecem tensões elétricas alternada, preferencialmente na forma de onda de senoidal pura. No entanto, em sistemas conectados à rede elétrica, não são utilizados equipamentos que apenas convertem corrente contínua em alternada, mas sim conversores estáticos de potência que necessitam atender diversas funções para que o acoplamento com a rede elétrica seja possível e seguro. (Neto, 2012)

Neto (2012) cita ainda que o conceito de conversor estático de potência aplica-se melhor em equipamentos destinados a sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, porém o termo inversor é difundido e amplamente utilizado para designar os equipamentos que fazem o acoplamento entre o gerador fotovoltaico e a rede elétrica.

Existe uma grande gama de inversores destinados a energia fotovoltaica, sendo que eles podem ser classificados quanto seu tipo de comutação, topologia e isolamento galvânica. A maioria dos inversores disponíveis no mercado atualmente possuem a propriedade de serem autocomutados, ou seja, possuem a habilidade de realizar a comutação de suas chaves sem a presença do sinal da rede elétrica. No entanto, é importante salientar que os sistemas conectados à rede necessitam da presença do sinal da rede para sincronia e também por segurança do sistema o qual ele está instalado. Já no que diz respeito à isolamento galvânica, de acordo com Rampinelli *et al.* (2013), atualmente os inversores sem transformadores, conhecidos como *transformerless*, vem conquistando espaço no mercado, apresentando eficiências maiores do que os inversores que utilizam transformador. Além da eficiência, ao se falar em termos econômicos, eles também apresentam vantagem, pois dispensam o uso do transformador que é um item de custo elevado de produção. Porém a utilização de inversores sem transformador depende da regulamentação vigente de cada país onde se deseja instalar o equipamento.

De acordo com Reji *et al.* (2014), nos últimos anos a tecnologia de inversores *Multilevel* tem atraído a atenção em aplicações relacionadas a sistemas distribuídos de energia. Principalmente em inversores e conversores de potência. Através dessa topologia de inversor é possível obter uma onda de saída senoidal de excelente qualidade e com alta eficiência.

Os inversores *Multilevel* tornam possível a geração de energia elétrica em tensão elevada utilizando componentes de chaveamento de baixa tensão. Além disso, integra a vantagem de diminuir o stress dos elementos de comutação devido à redução da variação de tensão em um curto intervalo de tempo (efeito dv/dt) sobre os componentes. Isso aumenta a vida útil dos componentes e também permite a criação de inversores com elevada eficiência. (Filho, 2012).

O termo *Multilevel* foi introduzido por Nabae *et al.* (1981), onde foi desenvolvido uma topologia de inversores para aplicação em acionamento de motores c.a., no qual o objetivo era reduzir as harmônicas dos inversores e, conseqüentemente, as perdas geradas por elas. Com o avanço da tecnologia e o surgimento de novos campos de atuação, como a aplicação de inversores para sistemas fotovoltaicos, essa topologia pode ser aprimorada e utilizada de forma síncrona com a rede elétrica. Isso permite a criação de inversores, não só autônomos, mas como conectados à rede com excelente qualidade de energia e eficiência.

Os inversores *Multilevel* utilizam um número maior de elementos de comutação, o que faz com que a onda de saída seja formada com diversos degraus, fazendo com que a onda fique mais próxima de uma senóide, reduzindo o seu conteúdo harmônico. No entanto esse grande número de chaves eleva a complexidade da lógica de controle do inversor. (Rodríguez *et al.*, 2002). Zobia e Bansal (2011) destacam ainda que os inversores *Multilevel* apresentam perdas de comutação que são inferiores às outras topologias de inversores existentes. Eles ainda recomendam essa topologia de inversor de frequência para futuros estudos e pesquisas. De acordo com Filho (2012), as topologias de inversores *Multilevel* mais conhecidas e comumente utilizadas são as que utilizam diodo de grampeamento (Fig. 1(a)), capacitor flutuante (Fig. 1(b)), e por último, o inversor *Multilevel* em cascata (CHB, do inglês *Cascaded H-Bridge*) (Fig. 1(c)). A topologia de inversor *Multilevel* em cascata é baseada na conexão de pontes-H em série, conforme é apresentado na Fig. 1(c). A onda resultante na saída do inversor *Multilevel* é a soma das saídas de cada ponte-H que o inversor possui.

Segundo Zhang (2011) a estrutura de inversor *Multilevel* em cascata apresenta vantagens frente às outras topologias de inversores *Multilevel*. A primeira delas é a modularidade, em que cada fonte de DC alimenta uma ponte-H, o que torna fácil adicionar novos módulos ao sistema existente, sem ter que realizar grandes adequações na estrutura do inversor. Já Khomfoi e Tolbert (2007) destacam a desvantagem que essa topologia detém, sendo que ela exige que as tensões sejam isoladas, porém nem todas as aplicações dispõem de fontes isoladas para alimentar o inversor. Dentro dos campos de atuação que possibilitam o uso de diversas fontes isoladas está o de energia renovável e também aplicações que são baseadas em bancos de bateria.

A aplicação da topologia de inversor CHB em sistemas fotovoltaicos implica que o arranjo de painéis solares deve ser dividido de acordo com o número de níveis que o inversor possui. Cada divisão pode ser feita contendo um único painel solar ou até mesmo um arranjo de painéis. Isso requer uma maior quantidade de cabos na instalação se comparado aos inversores tradicionais. Isso ocorre, pois cada módulo do inversor deve possuir o seu arranjo de painéis, exigindo um cabeamento para cada módulo do inversor. Contudo, essa divisão do arranjo de painéis solares possibilita incorporar o sistema de seguimento de máxima potência para cada uma das divisões do arranjo de painéis solares, e não sobre o arranjo inteiro, tornando possível obter rendimentos maiores do arranjo de painéis solares.

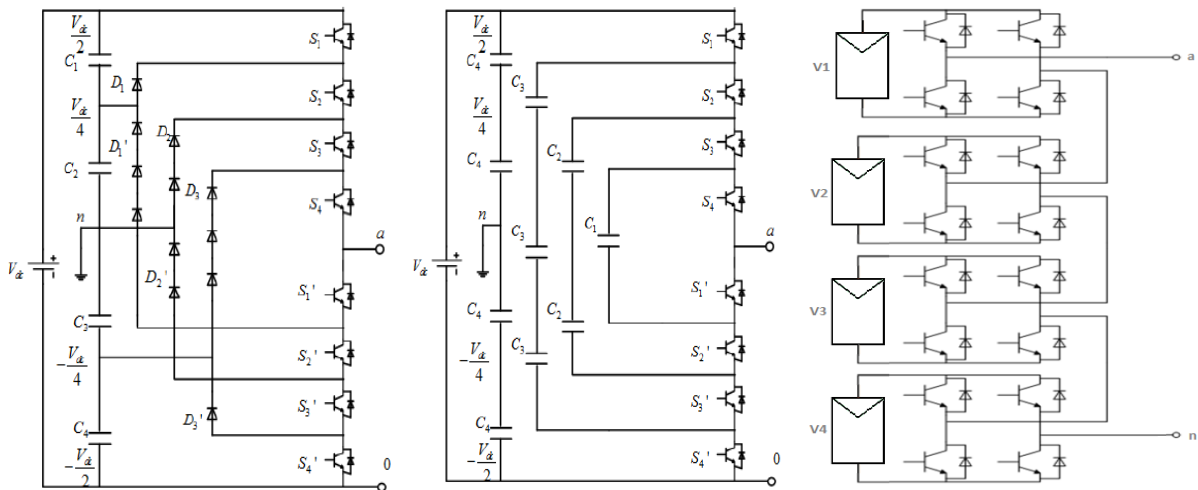


Figura 1- Inversor *Multilevel* Diodo de Grampeamento (a)- Capacitor Flutuante (b)- em cascata (CHB) (c)

2.2 Técnicas de modulação do inversor *Multilevel*

Segundo Prathiba e Renuga (2012) as técnicas de modulação de um inversor *Multilevel* podem ser divididas em duas categorias. Uma categoria de modulação está baseada em baixas frequências de chaveamento, chamadas de chaveamento em frequência fundamental. A outra categoria utiliza altas frequências de chaveamento e são baseadas na modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*). A Fig. 2 traz as principais técnicas de modulação aplicadas aos inversores *Multilevel* classificadas em suas devidas categorias.

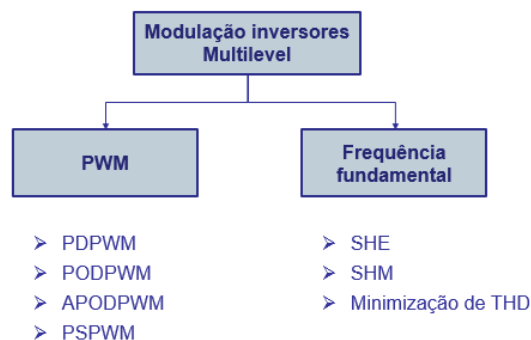


Figura 2- Classificação das modulações para inversores *Multilevel*

De forma geral, as modulações dos inversores *Multilevel* são mais complexas do que os populares inversores de dois níveis. Assim como pode ser utilizado nos inversores de dois níveis, a técnica de modulação sinusoidal por largura de pulso também é possível nos inversores *Multilevel*. No entanto, ao invés de existir somente uma portadora, como no inversor dois níveis, o inversor *Multilevel* utiliza um conceito de multiportadoras. Ou seja, para cada fonte de tensão isolada, ou para cada estágio do inversor, existem duas ondas portadoras.

De acordo com Khomfoi e Tolbert (2007), a forma mais popular e mais simples de implementar o controle de um inversor *Multilevel* é utilizar várias ondas triangulares, chamadas de portadoras, e um sinal de referência senoidal. Essa tecnologia de modulação possui diversas variações, que se diferem quanto à disposição das portadoras e também quanto

ao formato da onda de referência. Já as técnicas baseadas na modulação em frequência fundamental são caracterizadas por possuírem frequências de chaveamento de baixa magnitude, o que resulta na diminuição das perdas de chaveamento dos elementos de comutação do inversor. (Rodriguez et al., 2002).

As modulações em frequência fundamental se baseiam em um conceito abordado por Ahmadi Khatir (2012), em que idealmente cada nível de tensão do inversor tolera ser acionado em qualquer instante. No entanto o ângulo elétrico com que cada nível é acionado está diretamente relacionado com a distorção harmônica da onda produzida. Isso demonstra a importância da correta definição dos ângulos de chaveamento para que a onda de saída do inversor possua a menor distorção harmônica possível. Por um lado, é essencial a correta definição dos ângulos de chaveamento para uma melhor qualidade da onda de saída, mas por outro lado, é extremamente complexo determinar esses de forma a atender as condições de operação do inversor minimizando a distorção harmônica.

Com o auxílio da Transformada de Fourier é possível descrever a onda de saída de um inversor *Multilevel* através de uma expressão matemática. De acordo com Debnath e Ray (2012), essa análise de expansão por série de Fourier da onda de saída do inversor pode ser realizada considerando a simetria entre um quarto de onda. Dessa forma se garante que as harmônicas pares da onda de saída sejam nulas. A expansão em série de Fourier para a onda de saída do inversor é dada pela Eq. (1):

$$V(\omega t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,7,\dots} [V_{cc1} \cos(n\theta_1) \pm V_{cc2} \cos(n\theta_2) \pm \dots \pm V_{cck} \cos(n\theta_M)] \frac{\sin(n\omega t)}{n} \quad (1)$$

Onde n é a ordem da harmônica; M é a quantidade de ângulos de chaveamento; θM é o ângulo de chaveamento de número M ; k é a quantidade de módulos de potência; V_{cck} é a tensão de alimentação (V) do módulo de potência k ; ω é a frequência angular fundamental da saída do inversor. Deve-se ponderar que para cada módulo de potência é possível ter mais de um ângulo de chaveamento, sendo esse número definido pelo projeto. As técnicas de modulação em frequência fundamental possuem um benefício de controlar a amplitude de cada harmônica, através da determinação dos ângulos de chaveamento. Para isso deve-se encontrar uma solução contendo os ângulos de chaveamento que atendam aos critérios de tensão desejada na saída do inversor e os limites pretendidos para cada harmônica individual. No entanto, quanto maior o número de níveis do inversor, maior a complexidade de solução do sistema. Da mesma forma, quanto maior a quantidade de ângulos, maior o número de harmônicas de que podem ser controladas, porém isso impacta em uma maior dificuldade da definição de cada um desses ângulos. Nesses casos encontrar uma solução que satisfaça todas as condições e equações do sistema se torna extremamente difícil. (Ahmadi Khatir, 2012).

Para garantir o formato da onda de saída e também a simetria dela, é necessário assegurar que os ângulos de chaveamento satisfaçam a condição descrita pela Eq. (2). Essa condição deve ser respeitada sobre qualquer circunstância, pois é a partir desse ordenamento que se dá a correta construção da onda. A Fig. 3 apresenta a forma de onda resultante na saída de um inversor *Multilevel* de 11 níveis e também mostra os ângulos de chaveamento de cada nível.

$$\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \dots < \theta_M < \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

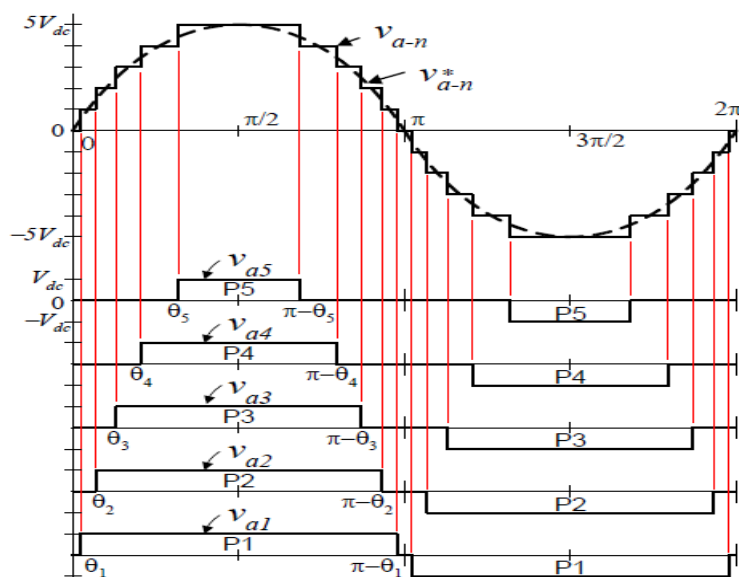


Figura 3 –Tensão de saída de um inversor *Multilevel* de 11 níveis com os ângulos de chaveamento de cada nível.

3. METODOLOGIA

A topologia de inversor desenvolvida é o inversor *Multilevel* em cascata de 9 níveis. Para isso o inversor deverá ser composto por 4 módulos fotovoltaicos conectados cada um a uma ponte-H, que são interconectados em série, conforme

mostra a Fig. 1(c). Os modelos dos sistemas apresentados nas diferentes modulações exploradas resultam em modelos matemáticos que são caracterizados por serem não lineares e transcendentais, além de poderem possuir múltiplas soluções ou até mesmo nenhuma. Essa peculiaridade do sistema limita os métodos possíveis para a solução desse problema. Sendo assim, será implementado um método não determinístico para resolver o sistema e encontrar os ângulos de chaveamento do inversor. O método utilizado para a resolução desse sistema é o Algoritmo Genético. Para validar a metodologia proposta foi elaborado um protótipo de inversor *Multilevel* de 9 níveis para pôr em prática o teste de conceito desenvolvido. Para realizar o controle do inversor foi utilizado um microcontrolador.

3.1 Modelo de Onda em Frequência Fundamental

A modulação em frequência fundamental necessita com que seja realizado o modelo do sinal de saída de acordo com a características do inversor que será utilizado. O inversor que está sendo proposto possui 9 níveis, sendo composto por 4 fontes de tensão. Sendo assim, será construído um modelo no qual cada quarto de onda é formado por 14 ângulos de chaveamento, divididos de acordo com a Tab. 1. A forma de onda esperada para essa configuração pode ser visualizada na Fig. 4.

Tabela 1 – divisão dos ângulos de chaveamento

Nível	Número ângulos de chaveamentos
1	1
2	3
3	3
4	7

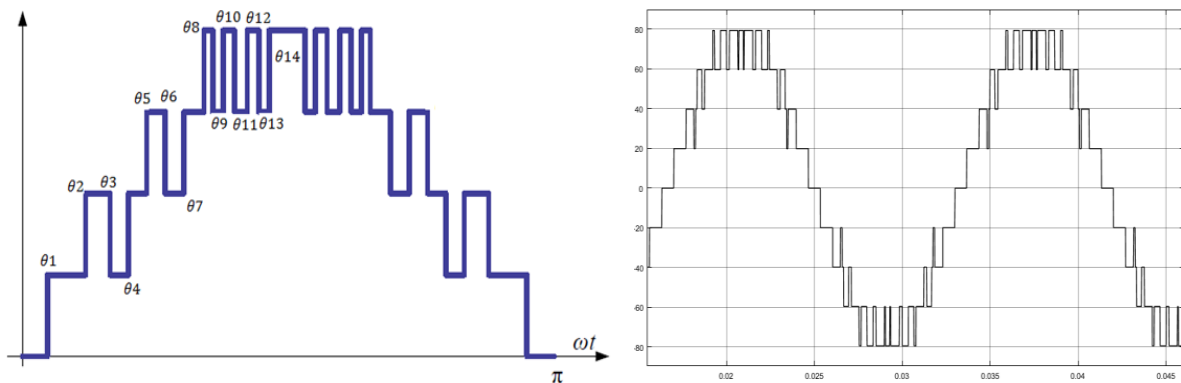


Figura 4 – Modelo da onda de saída da modulação em frequência fundamental

Com base na Eq. (1), a tensão de saída do inversor, referente ao modelo de onda criado, é representado pela Eq. (3).

$$V_f^{RMS} = \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{4}{n\pi\sqrt{2}} [V_{cc1} \cos(n\theta_1) + V_{cc2} \cos(n\theta_2) - V_{cc2} \cos(n\theta_3) + V_{cc2} \cos(n\theta_4) + V_{cc3} \cos(n\theta_5) - V_{cc3} \cos(n\theta_6) + V_{cc3} \cos(n\theta_7) + V_{cc4} \cos(n\theta_8) - V_{cc4} \cos(n\theta_9) + V_{cc4} \cos(n\theta_{10}) - V_{cc4} \cos(n\theta_{11}) + V_{cc4} \cos(n\theta_{12}) - V_{cc4} \cos(n\theta_{13}) + V_{cc4} \cos(n\theta_{14})] \right\} \quad (3)$$

Eliminação Seletiva de Harmônicas (SHE). A técnica de Eliminação Seletiva de Harmônicas se baseia no conceito de otimizar os ângulos os quais cada nível é acionado de forma a eliminar as frequências harmônicas indesejadas, minimizando o THD da onda de saída do inversor. Como pode ser verificado pela Eq. (3), o sinal de saída do inversor é composto por infinitas componentes harmônicas da frequência fundamental, sendo que, evidentemente, não é possível eliminar todas elas. A técnica de eliminação seletiva de harmônicas propõe a eliminação de algumas dessas harmônicas. O que determina o número de harmônicas a serem eliminadas é a quantidade de chaveamentos que a onda de saída irá apresentar. O chaveamento proposto possui um total de 14 ângulos, logo, de acordo com o estudo apresentado por Zhang (2011), pode-se eliminar até 13 componentes harmônicas. As harmônicas escolhidas para serem eliminadas foram as 13 primeiras harmônicas ímpares.

Mitigação Seletiva de Harmônicas (SHM). A Mitigação Seletiva de Harmônicas tem seu conceito muito parecido com a modulação SHE. No entanto a SHM se baseia na ideia de que não é necessário eliminar totalmente a amplitude de uma determinada harmônica. Essa técnica introduz a abstração de que é suficiente fazer com que o nível da amplitude de

uma harmônica seja reduzido até um nível aceitável. Geralmente esses níveis limites de amplitude são determinados em função das normas específicas de qualidade de energia elétrica que o inversor é empregado. (Napolés et al., 2009).

Portanto, a diferença no modelo matemático da modulação por Mitigação Seletiva de Harmônicas com relação à Eliminação Seletiva de Harmônicas encontra-se somente nas restrições. Antes as harmônicas selecionadas eram zeradas e na modulação SHM elas permanecem abaixo de um valor desejado. Como a aplicação a qual está sendo concebida o inversor é para aplicação fotovoltaica, a distorção harmônica da onda de saída do inversor deve estar em acordo com a NBR16149 (ABNT, 2013), onde são estabelecidos limites máximos de harmônicos individuais para a onda de saída do inversor. Como as restrições dessa modulação são mais amplas, é factível incorporar mais termos na função objetivo de resolução do problema.

Minimização de THD. Já na modulação conhecida por minimização de THD é utilizada a mesma modelagem utilizada nas modulações SHM e SHE. Ela também busca um mesmo objetivo, que é encontrar os ângulos de chaveamento dos níveis que constroem a onda de saída, de forma a minimizar o THD da onda de saída. Mas as restrições que são empregadas na Minimização do THD são muito menores. Isso, porque não são impostas limitações com relação a amplitude das harmônicas individuais. Somente se busca encontrar o menor THD, sem levar em consideração as magnitudes individuais das harmônicas. (Dahidah et al., 2015). Para essa modulação as condições que devem ser obedecidas são a tensão desejada na saída do inversor e também o ordenamento dos ângulos de chaveamento.

3.2 Desenvolvimento do Protótipo

Para a implementação do protótipo foi utilizado um microcontrolador para gerar os sinais de acionamento do inversor. O dispositivo empregado para realizar o esse controle foi a placa de desenvolvimento C2000 Piccolo LAUNCHXL-F28069M fabricada pela Texas Instruments, sendo baseado no controlador DSP TMS320F28069. O inversor proposto é composto por quatro Ponte-H. Todos os módulos de ponte-H serão acionados por um mesmo microcontrolador, no entanto as fontes de cada um dos módulos são isoladas. Em função disso, a interface entre os drivers de acionamento e o controlador também devem ser isoladas. A Fig. 5(a) mostra o diagrama de funcional do inversor e do microcontrolador.

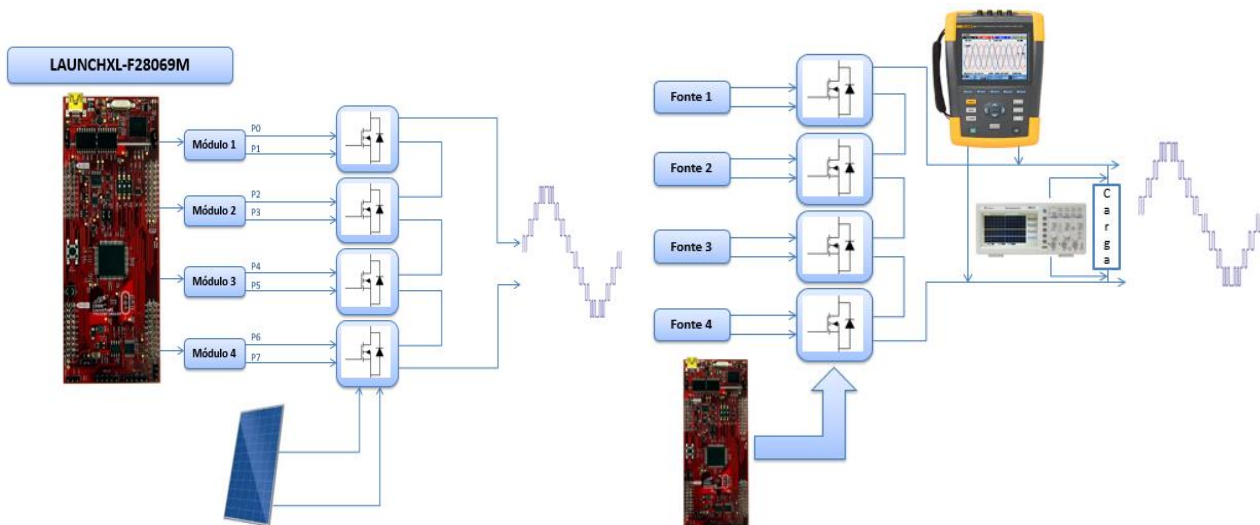


Figura 5 – (a) Diagrama funcional do inversor e do microcontrolador (b) Topologia de testes do inversor.

O teste com o protótipo experimental foi realizado em bancada, sendo que foram utilizadas fontes lineares para alimentar o inversor. Ao total foram utilizados 4 canais de fontes isoladas, sendo possível ajustar o nível de tensão de cada uma delas de forma independente. A topologia utilizada para os testes do inversor é ilustrada pela Fig. 5(b). Para a medição dos níveis de distorção harmônica que a onda de saída do inversor apresenta foi utilizado um analisador de energia da marca FLUKE, modelo 435. Esse é um instrumento de medição dedicado para medição de qualidade de energia elétrica.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

As análises e interpretações dos resultados obtidos no projeto foram realizados com a utilização do protótipo desenvolvido de forma a avaliar o funcionamento da metodologia proposta e validar as modulações estudadas. Esses resultados são comparados entre os diferentes métodos de modulação estudados.

4.1 Modulação PWM Senoidal

A seguir são apresentados os resultados obtidos através de simulação das modulações baseadas em PWM senoidal do inversor. As simulações foram executadas software PSIM. Para uma análise mais consistente das simulações, foi efetuada uma mudança no diagrama apresentado na Fig. 1(a), substituindo os painéis solares por fontes de alimentação com um nível de tensão de 20V cada. Essa mudança teve como objetivo manter as tensões de alimentação constantes enquanto está sendo avaliado o inversor. Cada tipo de modulação em PWM possui características que variam basicamente com a forma de geração dos sinais PWM. O índice de modulação empregado em todas as simulações foi de 0,95. A frequência utilizada para o acionamento do PWM foi de 1800Hz para todas as modulações. A Tab. 2 apresenta um comparativo entre cada uma das modulações PWM elaboradas.

Tabela 2 – THD de cada Modulação PWM

Modulação	PDPWM	PODPWM	APODPWM	PSPWM
THD (%)	15,73	15,08	16,00	15,64
Tensão (V_{RMS})	54,37	54,53	54,43	54,39

4.1 Modulação em Frequência Fundamental

A seguir são apresentadas as soluções para os problemas de otimização de THD para cada uma das técnicas de minimização de THD que foram exploradas na seção 3.1. Para isso foi elaborado um método de otimização que soluciona o problema através do Algoritmo Genético. Assim como para a modulação PWM, para uma análise mais consistente dos resultados, foi efetuada uma mudança no diagrama apresentado na Fig. 1(c), substituindo os painéis solares por fontes de alimentação com um nível de tensão de 20V cada.

Eliminação Seletiva de Harmônicas (SHE). Para a solução do problema de modulação por Eliminação Seletiva de Harmônicas, foi empregado o Algoritmo Genético de forma a manter a tensão de saída em $55V_{RMS}$ e ao mesmo tempo anulando por completo as primeiras harmônicas ímpares da onda.

Na simulação a tensão de saída medida foi de $54,9V_{RMS}$ e o valor de THD obtido foi de 15,4%. No entanto para ser possível realizar um comparativo entre os resultados práticos e teóricos, também foi calculado o valor de THD, tendo em vista o truncamento da máxima ordem de frequência harmônica na 50ª ordem. Esse truncamento é realizado em função de que o analisador de energia utilizado nas medições não considera frequências maiores do que a quinquagésima ordem harmônica da frequência fundamental. Para esse caso o THD tem o valor de 12,49%. Ao medir os valores de distorções harmônicas apresentados pelo protótipo do inversor foi encontrado o valor de THD de 12,4%. O gráfico apresentado pela Fig. 7 mostra o espectro de frequência da onda de saída tanto da simulação quanto do resultado prático. O valor de tensão medido foi de $55,1V_{RMS}$.

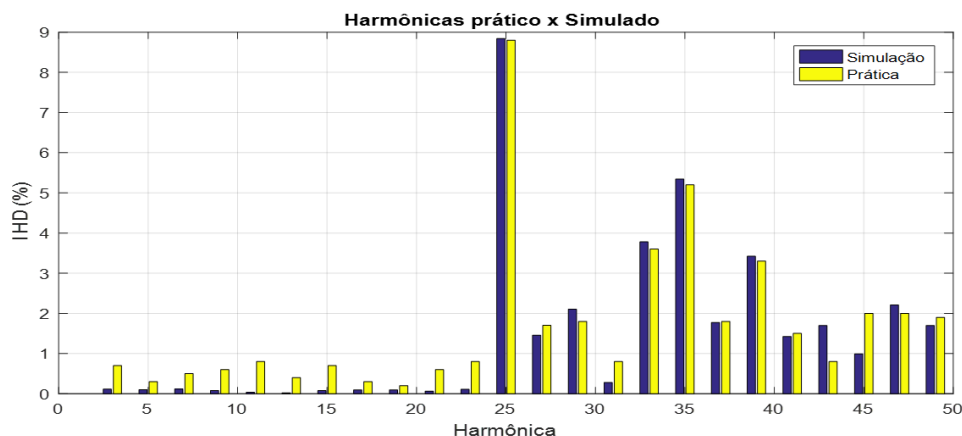


Figura 7 – Espectro de frequência da modulação SHE

Mitigação Seletiva de Harmônicas (SHM). O THD obtido em simulação na saída do inversor foi de 12,94%, sendo que a tensão apresentou um valor de $54,7V_{RMS}$. Levando em conta o truncamento da máxima frequência harmônica na 50ª ordem, o valor de THD foi de 8,72%. A Fig. 8 ilustra o gráfico que apresenta o espectro de frequência das ondas de saída do inversor medidas e simuladas. A tensão de saída obtida de forma experimental foi de $54,8V_{RMS}$. O valor de distorção harmônica total medido experimentalmente resultou em um valor de 8,8%, que é um valor próximo ao encontrado nas simulações ao levar em consideração as 50 primeiras harmônicas. Observando as harmônicas individuais percebe-se a semelhança entre os valores práticos e teóricos. Contudo algumas harmônicas possuem uma discrepância considerável, principalmente as de menor intensidade.

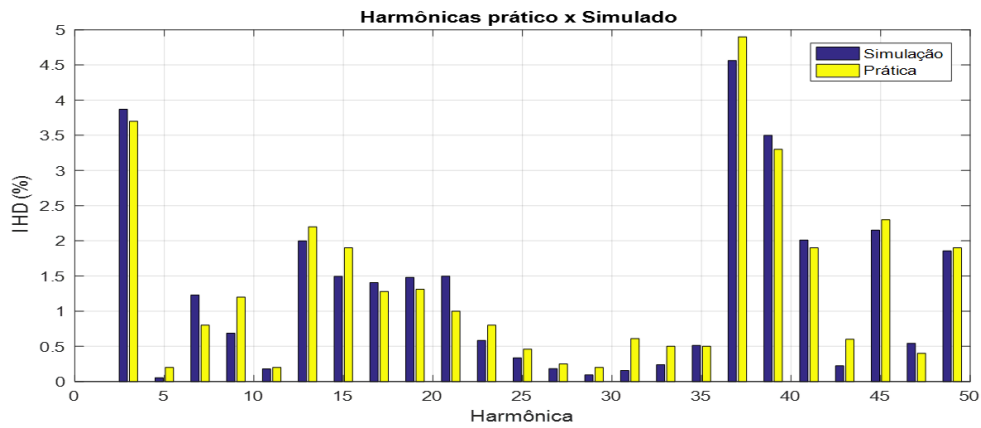


Figura 8 – Espectro de frequência da modulação SHM

Minimização de THD. A tensão de saída do inversor durante as simulação apresentou um valor de $54,85V_{RMS}$. Já durante os experimentos práticos o nível de tensão eficaz permaneceu em $55,3V_{RMS}$. No que se refere a distorção harmônica total, o valor obtido em simulação foi de 12,4%, quando considerado infinitas componentes harmônicas. Ao limitar em quinquagésima ordem harmônica da frequência fundamental, o valor de THD encontrado foi de 7,43%. Medindo o THD que o protótipo apresentou, o valor informado pelo analisador de energia elétrica foi 7,5%. A Fig. 9 mostra o espectro de frequência da onda de saída para os testes práticos e teóricos. Para essa modulação especificamente, verifica-se uma diferença mais acentuada nas amplitudes harmônicas ao comparar o resultado prático e simulado. Mesmo assim o valor de distorção harmônica total obtido na prática foi muito próximo ao encontrado nas simulações

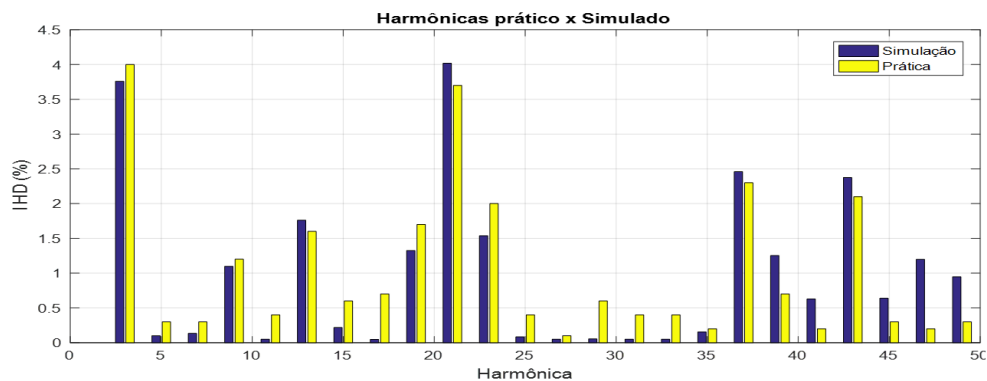


Figura 9 – Espectro de frequência da modulação minimização de THD

4.2 Análise das Modulações Implementadas

Foram avaliadas um total de 7 diferentes modulações destinadas ao acionamento de inversores *Multilevel*. Sendo que quatro delas são baseadas em acionamento através de PWM. Outras três modulações foram apresentadas incorporando uma técnica de otimização para que seja reduzido o THD do inversor. Para o caso de um inversor *Multilevel* na configuração em cascata de 9 níveis, as modulações baseadas em frequência fundamental, que integram a técnica de otimização, demonstraram ser mais eficientes ao se tratar da distorção harmônica. A Tab. 3 apresenta os resultados de THD que foram encontrados para cada uma das modulações abordadas.

Tabela 3 – THD de cada Modulação

Modulação	PDPWM	PODPWM	APODPWM	PSPWM	SHE	SHM	Min
THD (%)	15,73	15,08	16,00	15,64	15,4	12,94	12,4

Avaliando os resultados encontrados percebe-se que até mesmo as modulações SHE e SHM, que apresentam restrições quanto as harmônicas individuais, apresentaram valores de THD inferiores às modulações PWM. Dessa forma verifica-se que o emprego de otimização sobre a modulação do inversor é eficaz na redução do THD. A modulação que apresentou o menor valor de THD foi a modulação Minimização de THD. Empregando o método que foi elaborado, contendo um total de 14 ângulos de chaveamento, o THD de saída do inversor apresentou um valor de 12,4%.

4.3 Efeito da Variação das Tensões de Entrada

Ao ser utilizado módulos fotovoltaicos para alimentar o inversor podem ocorrer distúrbios na magnitude da tensão de alimentação de cada módulo do inversor. Isso pode influenciar diretamente, não só a distorção harmônica, mas também o valor de tensão que está sendo entregue em sua saída. Além disso, as variações podem ocorrer de forma diferente em cada uma das divisões do arranjo de painéis solares. Como forma de avaliar o efeito dessa variação de tensão foi realizada uma simulação em que uma das fontes sofre alteração em sua magnitude de $20V_{CC}$ para $15V_{CC}$. A fonte escolhida foi a de número 2. A modulação utilizada para essa análise é a minimização de THD.

Ao ser reduzido o valor da tensão do módulo 2, o THD resultante foi elevado de 12,4% para 13,3%. Além disso, a medida que sofreu maior alteração foi a tensão de saída. A tensão de saída desejada era $55V_{RMS}$, no entanto a tensão obtida sofreu uma redução e resultou em um valor de $50,8V_{RMS}$. O modelo aplicado para a solução do problema de otimização do THD da onda de saída do inversor *Multilevel* prevê o caso em que as tensões utilizadas sejam diferentes. Portanto uma nova solução foi obtida para o novo cenário em que uma das fontes tenha sofrido uma variação de tensão.

O valor de tensão encontrado com os novos ângulos de chaveamento foi de $54,85V_{RMS}$. Valor esse próximo ao valor desejado de $55V_{RMS}$. Com relação à distorção harmônica, obteve-se um valor inferior ao que foi observado anteriormente. Para esse caso específico, o valor de THD foi ainda menor que o encontrado no cenário em que todas possuíam a mesma magnitude de $20V_{CC}$. O THD encontrado é de 10,99%. A Fig. 10 apresenta o espectro de frequência e a forma de onda de saída do inversor para o caso em que a tensão do módulo 2 sofre variação.

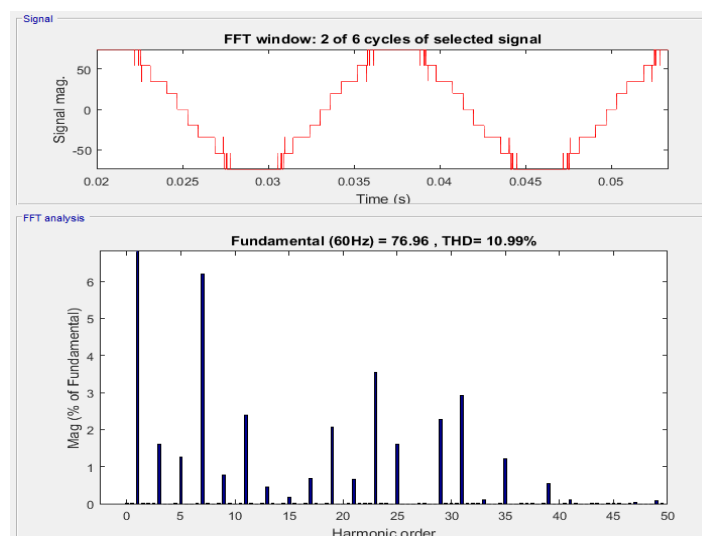


Figura 10 – Espectro de frequência da modulação minimização de THD para variação de tensão do módulo 2

5. CONCLUSÃO

Foram investigadas as diferentes topologias com que um inversor *Multilevel* pode ser construído, implementando-o na prática através de um protótipo experimental, que utiliza o conceito de inversor em cascata. O teste de conceito desenvolvido mostrou que é possível implementar ferramentas de solução de problemas de otimização até mesmo para inversores, tendo como principal objetivo minimizar a distorção harmônica que o inversor apresenta. Sendo possível comparar o desempenho dos métodos tradicionais de modulação aplicados aos inversores *Multilevel* com os métodos de otimização que podem ser aplicados ao seu acionamento. Analisando os resultados encontrados, é possível perceber que o algoritmo de otimização não só apresenta menores índices de distorção harmônica total, mas também permite controlar a magnitude das harmônicas individuais. Podendo ser uma característica importante dependendo da aplicação que o método está sendo utilizado.

As restrições que são impostas para as modulações SHE e SHM fazem com que o valor de THD sejam maiores, 15,4% e 12,94%, respectivamente. No entanto, elas introduzem um novo recurso, que possibilitam controlar de forma eficiente uma boa quantidade de harmônicas individuais. Esse recurso pode ser ajustado de acordo com o projeto com que o inversor será empregado, sendo possível eliminar e/ou controlar as harmônicas em função das especificação e características do projeto.

Com o objetivo de validar a técnica de otimização implementada, foi elaborado um protótipo de inversor *Multilevel* em cascata. Através do protótipo foi posto em prática as modulações e técnicas de otimização desenvolvidas e pode-se comprovar o funcionamento e eficiência do algoritmo. Os valores obtidos em simulações se aproximam dos valores encontrados no protótipo, o que valida o protótipo desenvolvido e a metodologia aplicada para a solução do problema de otimização elaborado para otimizar o THD de inversores *Multilevel*.

O inversor construído não atingiu o valor de THD estabelecido nas normas regulamentadoras. No entanto isso está relacionado com uma limitação imposta pela topologia de inversor utilizada. Como o inversor apresenta 9 níveis não é possível atingir o critério de THD máximo. Para isso se faz necessário uma quantidade maior de níveis ou então a inserção

de filtros na saída do inversor. Mesmo não atingindo o valor de THD, através da modulação SHM foi possível atender aos limites de distorção harmônica individual que são apresentadas pelas normas. Comprovando e validando o desempenho da metodologia desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 16149 - Sistemas fotovoltaicos (FV)–Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. São Paulo–SP, Brasil: 12 p. 2013a.
- Ahmadi Khatir, D. A Universal Selective Harmonics Elimination Method for High Power Inverters. 2012. The Ohio State University
- Dahidah, M. S. A.; Konstantinou, G.; Agelidis, V. G. A Review of Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM: Formulations, Solving Algorithms, Implementation and Applications. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 30, n. 8, p. 4091-4106, 2015. ISSN 0885-8993.
- Debnath, S.; RAY, R. N. Harmonic elimination in multilevel inverter using GA and PSO: A comparison. Electrical, Electronics and Computer Science (SCECS), 2012 IEEE Students' Conference on, 2012, IEEE. p.1-5.
- Filho, F. J. T. Real-Time Selective Harmonic Minimization for Multilevel Inverters Using Genetic Algorithm and Artificial Neural Network Angle Generation. 2012. Disponível em: <http://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2397&context=utk_graddiss>. Acesso em: 11/07/2016.
- Instruments, T. TMS320F2806x Piccolo™ Microcontrollers. 2016.
- Khomfoi, S.; Tolbert, L. M. Multilevel power converters. Power electronics handbook, p. 451-482, 2007.
- Nabae, A.; Takahashi, I.; Akagi, H. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. IEEE Transactions on Industry Applications, v. IA-17, n. 5, p. 518-523, 1981. ISSN 0093-9994.
- Napoles, J. et al. Selective harmonic mitigation technique for multilevel cascaded H-bridge converters. 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009, 3-5 Nov. 2009. p.806-811.
- Neto, A. F. D. C. P. Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2012. Universidade de São Paulo
- Pinho, J. T.; Galdino, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.
- Rampinelli, G. A. et al. Descrição e Análise de Inversores Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos Description and Analysis of Inverters Used in Photovoltaic Systems. Revista Ciências Exatas e Naturais, v. 15, n. 1, 2013.
- Reji, B.; Arun, S.; Benny, A. Solar powered multilevel simplified inverter. 2014, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 24-26 July 2014. p.302-309.
- Rodriguez, J.; Lai, J.-S.; Peng, F. Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on industrial electronics, v. 49, n. 4, p. 724-738, 2002. ISSN 0278-0046.
- Villalva, M. G.; Gazoli, J. R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. ERICA, 2012. ISBN 9788536504162.
- Zhang, X. Control Strategy of cascaded H-bridge multilevel inverter with PV system as separate dc source. 2011.
- Zobaa, A. F.; Bansal, R. C. Handbook of renewable energy technology. World Scientific, 2011. ISBN 981428906X.

MULTILEVEL INVERTER OPERATION FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATION BY THD OPTIMIZATION ALGORITHM

Abstract. *This work presents the inverters technologies that are being used in applications related to renewable energy, such as photovoltaic energy. Then it is proposed an inverter topology known as Multilevel Inverter to be applied with renewable energy. It is explained how modulation techniques are commonly used for those kinds of inverters. Two families of modulations are presented. Each one can be discerned by using Pulse Width Modulation (PWM) or by operating with fundamental frequency modulation. The Total Harmonic Distortion (THD) analysis of the inverter output waveform is the main evaluation applied in the work. The firing angles of the inverter are defined such that the fundamental voltage is constant and the THD is minimized. The proposed solution method for the system uses an optimization technique called Genetic Algorithm. The obtained results by the THD optimization algorithm are compared with PWM based modulations. A prototype was developed using the presented optimization methodology. This prototype was used to validate the proposed idea. The results proved the effectiveness of the elaborated algorithm. The presented methodology achieved THD results up to 18% lower than the PWM based modulation methods. Furthermore, the method allows to control the individual harmonics of the inverter output waveform.*

Key words: *Multilevel Inverter. Total Harmonic Distortion (THD). Photovoltaic Energy.*