

USO DE CONVERSORES MULTIPULSOS NA COGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

LUCAS L. BRIGHENTI, ALESSANDRO L. BATSCHAUER, LUIS G. KREMER, MARCELLO MEZAROBA

Núcleo de Processamento de Energia Elétrica – nPEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Rua Paulo Malschitzki s/n, CEP 89219-710, Joinville, Santa Catarina

E-mails: lucasbrighenti@msn.com, alessandrobatschauer@gmail.com,
lgkremer@hotmail.com, marcello.mezaroba@udesc.br

Abstract— One alternative for the processing of energy acquired by photovoltaic panels is the use of phase-controlled inverters associated with multi-pulse autotransformers, which is nothing more than a dual system for multipulse rectifiers. This converter has advantages related to robustness, low maintenance, reliability and low cost. Another important feature is that the use of transformers with specific displacement reduces the quantity of harmonic current injected into the grid. This article will present this converter and proposes the use of Maximum Power Point Tracking (MPPT) acting on the average input voltage of the inverter, using the trigger angle to vary the average voltage of the converter and keep it operating at the maximum power point of the PV panels

Keywords— Autotransformer, Phase-controlled inverters, Photovoltaic cogeneration, SCR, Y-differential connection.

Resumo— Uma alternativa para o processamento da energia elétrica obtida através de painéis fotovoltaicos é o uso de inversores não autônomos associados a autotransformadores multipulsos, que nada mais é que um sistema dual aos retificadores multipulsos. As vantagens deste conversor estão relacionadas à robustez, baixa manutenção, confiabilidade e baixo custo. Outra característica importante, é que a utilização de transformadores com as defasagens específicas reduzem a quantidade de harmônicos de corrente injetados na rede elétrica. Este artigo apresentará este conversor e propõe a atuação do MPPT na tensão média de entrada dos inversores, utilizando o ângulo de disparo dos tiristores para variar a tensão média do conversor e mantê-lo operando no ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos.

Palavras-chave— Autotransformador, Inversores não autônomos, Cogeração fotovoltaica, SCR, Conexão Y-diferencial

1 Introdução

Este trabalho propõe o uso de conversores multipulsos que utiliza autotransformadores com conexões diferenciais associados a inversores não autônomos para a cogeração fotovoltaica. Em (Wasynczuk, 1989) e (Sarwar & Jamil Asghar, 2010) são apresentadas topologias de conversores multipulsos com transformadores isolados. O uso de autotransformadores tem como principal objetivo reduzir o custo e aumentar a eficiência do sistema. O diagrama geral é apresentado na Figura 1.

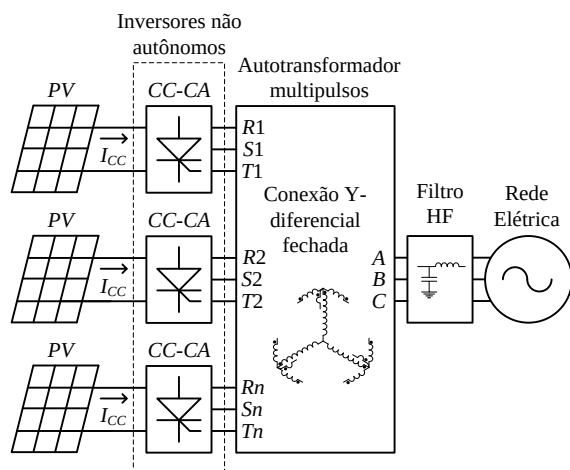


Figura 1 - Esquema geral do sistema proposto.

Já são conhecidos na literatura, (Paice, 1996) e (Wu, 2006), retificadores passivos que apresentam fator de potência unitário com baixa ondulação na tensão de saída. Estes retificadores são chamados de conversores multipulsos. Topologias não isoladas com a utilização de autotransformador com conexões diferenciais podem ser vistas em (Seixas & Barbi, 1999) e (Fernandes, et al., 2011).

Um retificador em ponte de Graetz é conhecido como retificador de 6 pulsos que, com uma corrente constante e sem ondulações na saída CC, os harmônicos pares e múltiplos de 3 serão eliminados naturalmente devido a simetria da forma de onda desta corrente. Utilizando tiristores ao invés de diodos, é possível fazer este conversor operar nos quatro quadrantes. Com ângulos de disparo maiores que 90° ele opera como inversor não autônomo. Um conversor de 6 pulsos usado na aplicação fotovoltaica é apresentado em (Kempe & Schonwandt, 1996).

É possível reduzir ainda mais a quantidade de harmônicos injetados na rede, fazendo associações retificadoras de 6 pulsos, desta forma, os harmônicos da corrente da rede serão apenas os de ordem $k.n \pm 1$, onde n é o número de pulsos do conversor e k um número inteiro positivo. São necessários $n/6$ retificadores, que devem ser conectados a subsistemas trifásicos defasados em $360^\circ/n$. De forma dual ao retificador multipulsos, propõe-se o uso de inversores não autônomos no lugar de retificadores, fazendo com que se possa injetar corrente na rede.

Com um ângulo de disparo de 180° , o fator de potência é próximo da unidade devido à componente da fundamental da corrente estar em fase com a tensão. Nesta condição, o ponto de conexão dos painéis

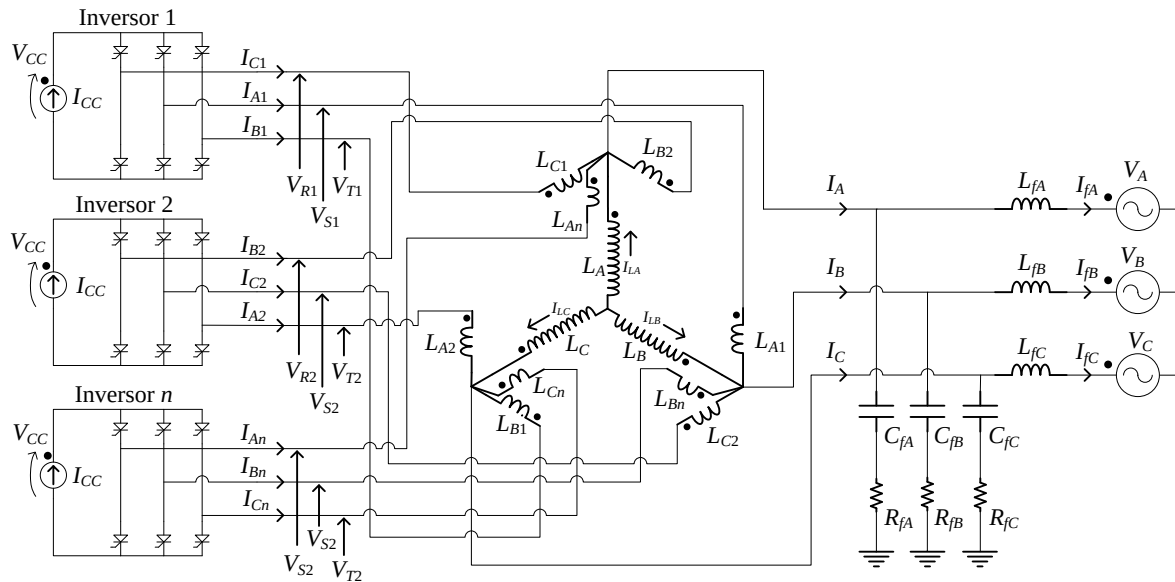


Figura 2 - Inversores não autônomos associados a um autotransformador de 18 pulsos com conexão Y-diferencial fechada.

fotovoltaicos apresenta uma baixa ondulação de tensão, 13,4% sem a necessidade de adição de capacitores devido a retificação trifásica de 6 pulsos do inversor não autônomo. O deslocamento entre tensão e corrente é equivalente ao ângulo de disparo, que por sua vez, afeta diretamente na tensão média retificada, desta forma, é possível utilizar técnicas de MPPT para controlar a potência fornecida pelos painéis através da variação da tensão média sobre estes.

A motivação de se utilizar este conversor é conseguir um sistema robusto, de baixo custo, de alta confiabilidade, fácil manutenção e baixa THD na corrente injetada na rede, além de fazer o rastreamento da máxima potência fornecida pelos painéis. O seu propósito é ser instalado em locais remotos e desabitados, com disponibilidade de terras de baixo custo onde se consiga uma elevada irradiação e não se necessite de manutenção frequente.

O inversor não autônomo é uma tecnologia consolidada, robusta e de baixo custo que já é utilizada em linhas de transmissão HVDC há décadas. Os transformadores são equipamentos robustos e confiáveis, porém possuem um volume elevado, desta forma, a fim de reduzir o volume, será utilizado um sistema não isolado composto por um autotransformador com conexões diferenciais.

Será apresentado um estudo sobre um conversor de 18 pulsos utilizando 3 inversores não autônomos associados a um autotransformador com conexão Y-diferencial fechada para gerar as defasagens necessárias, como é mostrado na Figura 1 e Figura 2.

Esta topologia apresenta um fator de potência teórico de 0,995 (com ângulo de disparo de 180°) e uma THD na corrente de 10,05%. Outra grande vantagem desta topologia são as conexões diferenciais, que reduzem a potência total processada pelo autotransformador a 21,88% da potência total processada pelos inversores (Seixas & Barbi, 1999), fazendo

com que o volume e o peso do transformador possam ser substancialmente reduzidos, aumentando a eficiência e diminuindo o custo deste conversor.

Neste trabalho é feita a análise teórica do funcionamento do conversor, a implementação do algoritmo de MPPT com o método Perturba e Observa e apresentado os resultados experimentais obtidos a partir de um protótipo desenvolvido no laboratório. Ao final são apresentadas as conclusões.

2 Inversor não autônomo

O inversor não autônomo é composto por uma ponte de Graetz a tiristores e circuitos auxiliares para fazer o sincronismo com a rede. A corrente contínua de entrada é sempre positiva e depende da capacidade do painel ou banco de painéis conectados. A tensão de entrada depende da amplitude da tensão da rede e do ângulo de disparo. A Figura 3 apresenta a tensão contínua de entrada para ângulos de disparo de 120° e 180°.

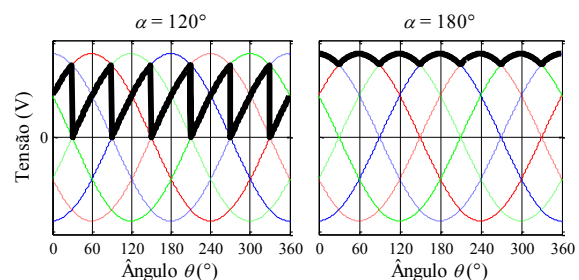


Figura 3 – Formas de onda da tensão de entrada do inversor não autônomo para ângulo de 120° (à esquerda) e 180° (à direita).

O ângulo de 120° é a condição mínima para que o conversor opere como um inversor sem apresentar

tensão instantânea negativa. A tensão média de entrada do inversor é:

$$V_{CC} = -(V_R/V_A)(3\sqrt{6}V_A/\pi)\cos(\alpha) \quad (1)$$

A Figura 4 apresenta a tensão e a corrente de saída na fase R do inversor.

Com ângulos de disparo menores que 180°, a potência reativa consumida é capacitiva.

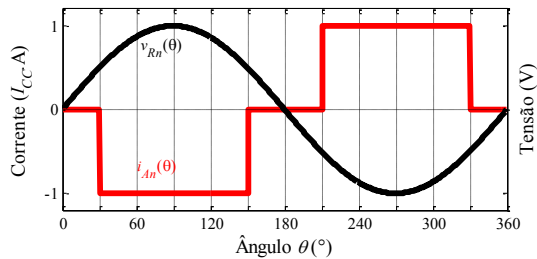


Figura 4 – Tensão e corrente de saída da fase R do inversor não autônomo.

3 Autotransformador de 18 pulsos

O autotransformador é utilizado para gerar os 3 subsistemas trifásicos defasados em 20° cada, necessários para obter um conversor de 18 pulsos. O autotransformador com conexão Y-diferencial fechada foi escolhido por apresentar uma tensão mais baixa que a tensão da rede de alimentação, tornando-se uma escolha atrativa para sistemas fotovoltaicos.

As defasagens de tensão de 20° são criadas pela combinação das amplitudes dos vetores de tensão existentes nos enrolamentos do autotransformador. O diagrama fasorial é mostrado na Figura 5. Os subsistemas estão defasados em -20°, 0° e +20° em relação à tensão da rede.

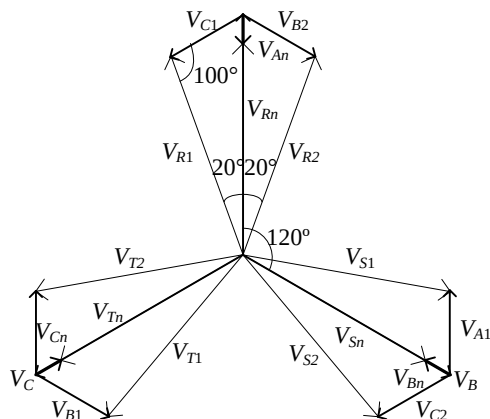


Figura 5 – Diagrama fasorial das tensões do autotransformador multipulsos.

O número de espiras para os enrolamentos secundários são obtidos através de relações trigonométricas

mostradas na Tabela 1, onde são apresentadas as relações de transformação do autotransformador para uma das fases, esta análise é válida para as demais.

Tabela 1. Relação de espiras e tensão para a fase A

V_{A1}, V_{A2}	$V_A \cdot \sin(20^\circ)/\sin(100^\circ)$	$0,3473V_A$
V_{An}	$V_A - V_{Rn}$	$0,1206V_A$
V_{R1}, V_{R2}, V_{Rn}	$V_A \cdot \sin(60^\circ)/\sin(100^\circ)$	$0,8794V_A$
N_{20°	V_A/V_{A1}	2,8794
N_{0°	V_A/V_{An}	8,2819

As tensões das fases R dos subsistemas estão apresentadas na Figura 6.

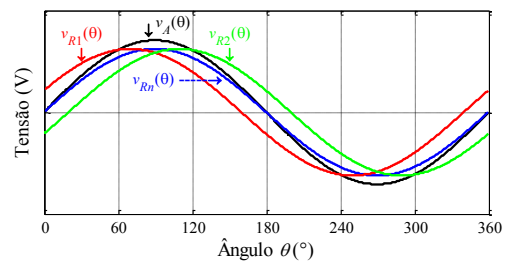


Figura 6 - Tensões da fase R dos subsistemas gerados pelo autotransformador

A corrente nos enrolamentos secundários é a própria corrente que sai do inversor (Figura 4).

A corrente do primário é composta pela soma das correntes referidas do secundário, representadas em (2), (3), (4).

$$i_{LA}(t) = [i_{A1}(t) + i_{A2}(t)]/N_{20^\circ} - i_{An}(t)/N_{0^\circ} \quad (2)$$

$$i_{LB}(t) = [i_{B1}(t) + i_{B2}(t)]/N_{20^\circ} - i_{Bn}(t)/N_{0^\circ} \quad (3)$$

$$i_{LC}(t) = [i_{C1}(t) + i_{C2}(t)]/N_{20^\circ} - i_{Cn}(t)/N_{0^\circ} \quad (4)$$

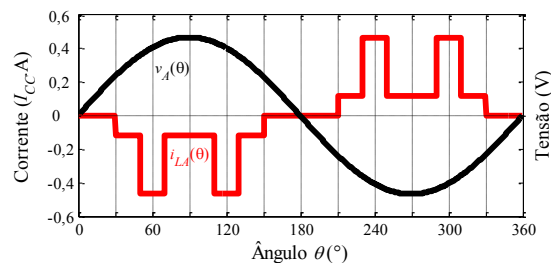


Figura 7 - Tensão e corrente no enrolamento L_A do autotransformador

A corrente injetada da rede é formada pela soma das correntes que entram nos nós conectados à rede, como pode ser visto na Figura 2.

$$i_A(t) = i_{LA}(t) + i_{C1}(t) + i_{B2}(t) + i_{An}(t) \quad (5)$$

$$i_B(t) = i_{LB}(t) + i_{A1}(t) + i_{C2}(t) + i_{Bn}(t) \quad (6)$$

$$i_c(t) = i_{LC}(t) + i_{B1}(t) + i_{A2}(t) + i_{Cn}(t) \quad (7)$$

A Figura 8 apresenta a tensão e a corrente injetada na fase A da rede. Esta corrente apresenta um formato quase senoidal com baixa distorção harmônica.

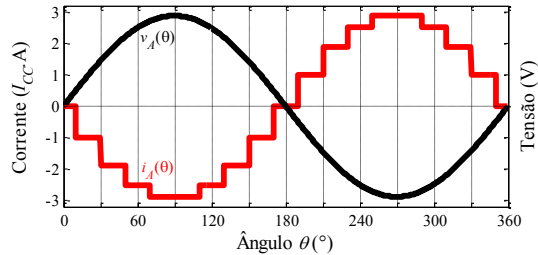


Figura 8 - Tensão e corrente fornecida para a fase A da rede de alimentação

A forma de onda da corrente I_A pode ser decomposta em séries de Fourier (Brighenti, et al., 2013). Assim, a expressão para a corrente é:

$$i_{An}(\theta) = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4I_{CC}}{k\pi} \cos\left(\frac{k\pi}{6}\right) \sin[k \cdot (\theta + \alpha)] \quad (8)$$

$$i_A(\theta) = I_{CC} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{2}{N_{20^\circ}} \cos\left(k \cdot \frac{100}{180} \pi\right) - \frac{1}{N_{9^\circ}} + 2 \cos\left(k \cdot \frac{20}{180} \pi\right) + 1 \right] \cdot \frac{4}{k\pi} \cos\left(k \cdot \frac{30}{180} \pi\right) \cdot \sin[k \cdot (\theta + \alpha)] \quad (9)$$

A distorção harmônica total da corrente de saída é de 10,05% e o ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão é o próprio ângulo de disparo α .

O fator de potência é:

$$FP = 0,995 \cdot \cos(\alpha) \quad (10)$$

O fator de potência para um ângulo de disparo de 120° é de 0,497 e a tensão média é 50% da tensão nominal.

(Seixas & Barbi, 1999) mostra que a potência processada pelo autotransformador é 21,88% da potência nominal de entrada do conversor.

4 Painéis fotovoltaicos

Esta seção apresenta a avaliação do comportamento característico dos painéis fotovoltaicos. As curvas apresentadas são do modelo SW130 do fabricante Solarword.

A Figura 9 e a Figura 10 mostram as curvas de potência versus tensão em diferentes condições de temperatura e irradiação, a obtenção do modelo é apresentado em (Villalva, et al., 2009).

Como foi visto nos itens anteriores, o inversor não autônomo impõe uma tensão em função do ângulo de disparo. Portanto o rastreamento de máxima potência do conversor (MPPT) deve atuar no ângulo de dispa-

ro, de forma que a tensão do conversor é ajustada para trabalhar em um ponto de máxima potência. Como o conversor proposto apresenta limites de operação (120° a 180°), será feita a análise dos valores de tensão do painel para diversas condições de irradiação e temperatura. Estes valores serão comparados com a tensão V_{CC} normalizada do conversor (Figura 11).

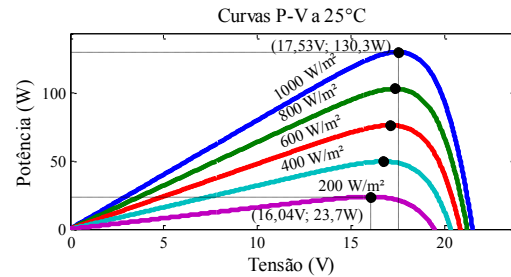


Figura 9 - Curvas P-V para diferentes condições de irradiação a 25°C

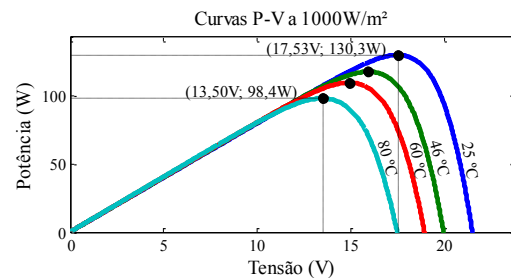


Figura 10 - Curvas P-V para diferentes condições de temperatura para 1000 W/m^2 de irradiação

A Figura 9 mostra que a variação na tensão é pequena para variações na irradiação. Para uma irradiação de 200 W/m^2 , a tensão do ponto de máxima potência é 16,04 V, para 1000 W/m^2 é 17,53 V, isto corresponde a uma variação de 8,5%.

A Figura 10 mostra que mudanças na temperatura dos painéis implicam em maiores variações de tensão. Em 80°C a tensão de saída é 13,50 V. Que corresponde a uma variação de 23% em relação a 25°C .

A Tabela 2 apresenta a tensão de saída de um painel para algumas condições de irradiação e temperatura.

Tabela 2 – Tensões dos painéis em função da temperatura e irradiação

Irradiação (W/m^2)	Tensão (V) 25°C	Tensão (V) 46°C	Tensão (V) 80°C
1000	17,54	15,97	13,51
800	17,38	15,79	13,30
600	17,14	15,54	13,01
200	16,05	14,37	11,71

A Tabela 3 apresenta as tensões normalizadas em relação ao melhor caso (25°C a 1000W/m^2). Nesta tabela é possível observar que no pior caso apresentado, a tensão do painel é de 66,76%, que corresponde a uma variação de 33,24%.

Tabela 3 - Tensões normalizadas em função da temperatura e irradiação

Irradiação (W/m ²)	Tensão (%) 25 °C	Tensão (%) 46 °C	Tensão (%) 80 °C
1000	100,00	91,05	77,02
800	99,09	90,02	75,83
600	97,72	88,60	74,17
200	91,51	81,93	66,76

Dependendo da tensão da rede e do modelo do painel, é necessário colocar painéis em série para compatibilizar os níveis de tensão dos painéis com os níveis do inversor.

Para o inversor funcionar, o ângulo de disparo deve ser menor que 180°, para que os tiristores estejam diretamente polarizados. Neste caso foi escolhido 175° para obter a tensão no melhor caso de operação do painel. O pior caso que corresponde a 66,76% ocorrerá com um ângulo de disparo de 132°.

A Figura 11 apresenta as curvas da tensão normalizada do conversor.

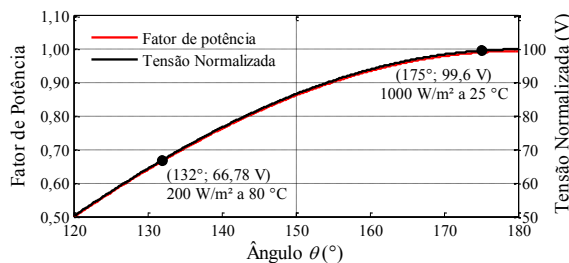


Figura 11 - Tensão V_{CC} e fator de potência em função do ângulo de disparo α .

Comparando os resultados da tabela com as formas de onda do conversor apresentadas na Figura 11, o fator de potência será de 0,669 para um ângulo de disparo de 132° e 0,996 para um ângulo de disparo de 175°. Dependendo o ponto de operação, ocorrerão decréscimos no fator de potência, no entanto, a energia injetada é capacitiva, o que pode ser útil para a rede elétrica, sabendo que este conversor trabalha durante o dia, onde a demanda desta energia é maior.

5 Rastreamento de ponto de máxima potência

Como se trata de uma aplicação na cogeração fotovoltaica é necessário que o conversor faça o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Em (Esram & Chapman, 2007) são apresentadas algumas técnicas de MPPT. O método Perturba e Observa ou *P&O* foi escolhido por ser o mais simples. Outras técnicas podem ser utilizadas normalmente. A Figura 12 apresenta o fluxograma do algoritmo implementado.

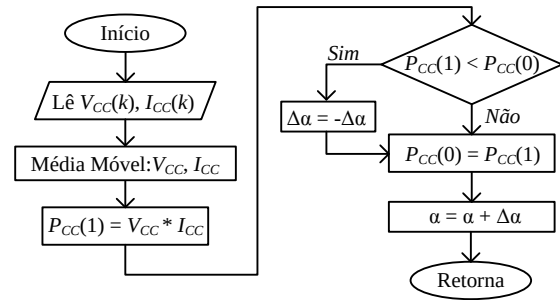


Figura 12 - Fluxograma do algoritmo método de MPPT Perturba e Observa

Devido à ondulação da tensão e da corrente, é necessário fazer o cálculo da média móvel dos parâmetros de entrada I_{CC} e V_{CC} lidos. O tempo mínimo para o cálculo da média móvel é de um ciclo de rede, portanto após cada perturbação, o algoritmo do MPPT deve aguardar a média estar calculada para tomar uma decisão.

6 Protótipo desenvolvido

Para a validação da análise matemática, um protótipo do conversor foi construído (Figura 13) de acordo com as especificações apresentadas na Tabela 4. O protótipo foi desenvolvido para processar 2340 W, que corresponde a seis painéis por inversor. Esta é a quantidade de painéis disponível no laboratório. Um emulador de painéis desenvolvido no laboratório foi utilizado, fornecendo uma potência máxima de 1389 W. A potência é reduzida devido à limitação do equipamento. A Tabela 4 apresenta as condições nominais do inversor. Os testes foram realizados com potência menor.

Tabela 4 – Especificações nominais do inversor

Tensão de fase da rede (RMS) (V_A)	51,1 V
Frequência da rede (f_{rede})	60 Hz
Número de painéis fotovoltaicos	18
Número de painéis conectados em série	6
Máxima potência para cada painel	130 W
Máxima potência fornecida para o sistema (P_{CC})	2340 W
Tensão nos painéis para 175° (V_{CC})	105,2 V
Corrente fornecida para cada inversor (I_{CC})	8,02 A

Para que a corrente injetada na rede atenda as normas de fornecimento de energia da IEEE 519-1992 (IEEE Std 519-1992, 1993). O projeto do filtro de alta frequência é apresentado em (Brighenti, et al., 2013).

Tabela 5 - Parâmetros do filtro de alta frequência

L_f	C_f	R_f
16 mH	10 μ F	7,5 Ω

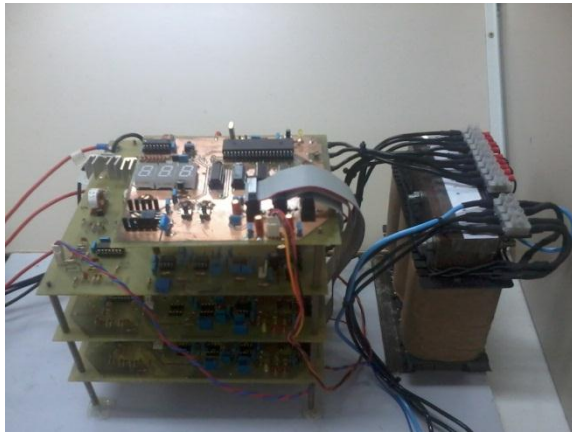


Figura 13 - Protótipo experimental

7 Resultados experimentais

Esta seção apresenta os resultados experimentais do protótipo implementado onde os painéis foram simulados por um emulador de painéis fotovoltaicos desenvolvido no laboratório. Inicialmente são apresentados os resultados em regime, sem a atuação do MPPT e sem variações nas condições de operação dos painéis e na sequência é apresentado o funcionamento do MPPT.

7.1 Resultados em Regime

Nesta subseção serão apresentados os resultados com o conversor operando em regime permanente.

A Figura 14 apresenta as tensões de fase V_{R1} , V_{Rn} e V_{R2} dos subsistemas gerados pelo autotransformador, mostrando que a defasagem entre eles é de aproximadamente 20° . Os valores eficazes são 44,2V; 46,3V e 46,4V respectivamente.

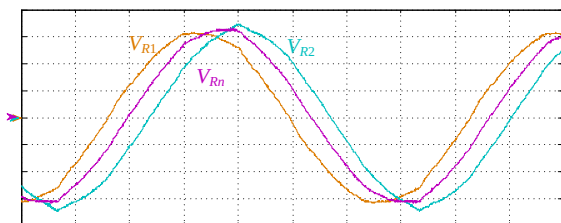


Figura 14 - Tensão na fase R dos subsistemas gerados pelo autotransformador (20V/div, 2,5ms/div)

A Figura 15 apresenta a tensão e a corrente de entrada do inversor 1. A corrente média de entrada neste inversor é de 4,44A e a tensão média para um ângulo de disparo de 165° é de 104V. Os valores de tensão e corrente dos demais inversores são apresentados na Tabela 7.

A tensão e a corrente da fase R do inversor 1 são mostrados na Figura 16.

A Figura 18 e Figura 19 mostram as correntes injetadas nas três fases da rede antes e depois da passagem pelo filtro respectivamente.

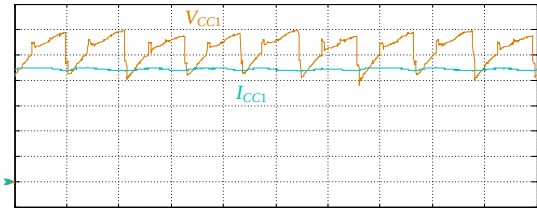


Figura 15 – Tensão e corrente na entrada do inversor 1 (1A/div, 20V/div, 2,5ms/div)

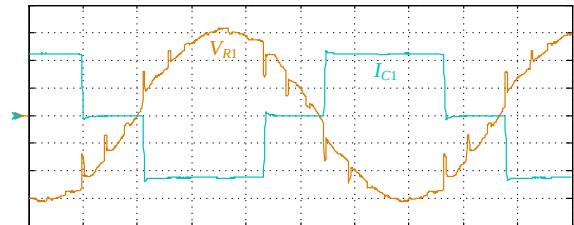


Figura 16 – Tensão e corrente na fase R do inversor 1. (20V/div, 2A/div, 2,5ms/div)

A Figura 17 apresenta a tensão e a corrente fornecida para a fase A da rede. Esta corrente possui uma THD de 9,03% obtido experimentalmente antes da passagem pelo filtro.

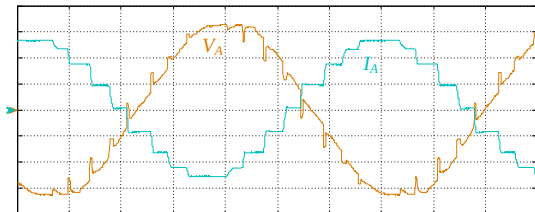


Figura 17 – Tensão e corrente de saída na fase A do autotransformador. (20V/div, 5A/div, 2,5ms/div)

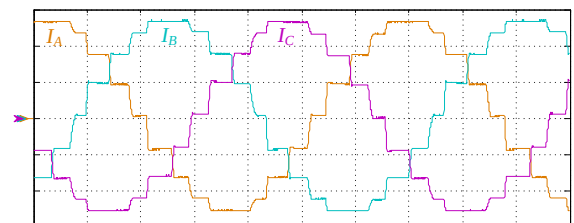


Figura 18 – Corrente das três fases de saída do conversor (5A/div, 2,5ms/div)

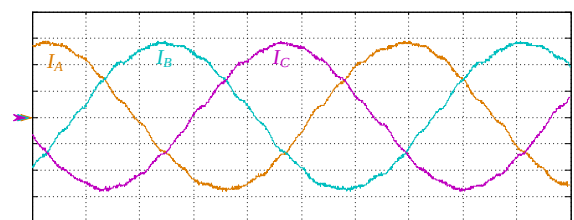


Figura 19 – Correntes injetadas nas três fases da rede após passagem pelo filtro (5A/div, 2,5ms/div)

A passagem pelo filtro atenua os harmônicos indesejáveis e faz com que o conversor atenda as exigências da IEEE 519-1992. A análise harmônica desta corrente é apresentada na seção seguinte.

Os resultados experimentais obtidos são apresentados na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 - Potência de saída para cada fase

Fase	Potência (P)	Potência Reativa (Q)	FP	Fase (α)
A	-442W	147VAR	-0,948	162,4°
B	-423W	135VAR	-0,953	163,2°
C	-413W	168VAR	-0,943	161,4°
Total	-1278W	428VAR	-	-
S _{Total}	1348VA			

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nas três fases de saída. A Tabela 7 mostra os valores de entrada nos inversores 1, 2 e n . A eficiência medida deste conversor é 97,04%.

Tabela 7 - Especificações de entrada para cada fase.

Inversor	V_{CC}	I_{CC}	P_{CC}
1	104V	4,44A	462W
2	106V	4,41A	467W
n	103V	4,47A	460W
Total	-	-	1389W

7.2 Funcionamento com o MPPT

Nesta subseção são apresentados testes mostrando o funcionamento do MPPT. São feitas 3 transições em diferentes condições de operação dos painéis de acordo com a Figura 20. A curva A apresenta 200W/m² a 80°C, a B 600W/m² a 80°C e a curva C 600W/m² a 25°C. A operação começa no ponto 1, após um tempo é feita a transição para o ponto 2 e na sequência para o ponto 3, finalizando no ponto 4.

Como se trata do método perturba e observa, a potência drenada do painel fica oscilando em torno do ponto de máxima potência. Como o objetivo de estudo é mostrar o conversor funcionando com MPPT e não o estudo do método, foi escolhido o método mais simples de ser implementado, sendo que outros métodos como IncCond, lógica Fuzzy, redes neurais, tensão ou corrente constante, entre outros podem ser utilizados.

A Figura 20 mostra o funcionamento do MPPT no inversor 1, o conversor busca o ponto de máxima potência atuando no ângulo de disparo. Na curva A, o rastreamento apresenta uma maior oscilação devido à baixa corrente, que prejudica a precisão da leitura do hardware desenvolvido.

O prejuízo para o fornecimento de energia é a redução do fator de potência em função do deslocamento entre tensão e corrente. Ao escolher os pontos de operação deve se levar em conta os comportamentos

mais recorrentes para que o prejuízo em relação à esta redução seja mínimo. Como se trata de fornecimento de potência reativa capacitiva, ela pode ser absorvida pela rede, funcionando também como um compensador de reativos.

O MPPT não pode atuar individualmente em cada inversor, pois isso gera uma defasagem diferente de 20° entre as correntes dos 3 subsistemas, prejudicando a qualidade da energia injetada. O ângulo deve ser o mesmo para os 3 inversores.

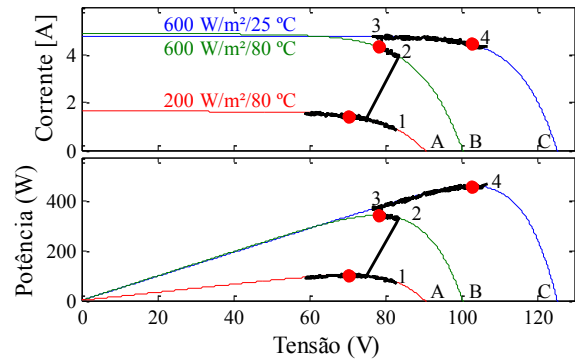


Figura 20 - Funcionamento do MPPT no inversor 1

Tabela 8 - Dados dos testes obtidos no inversor 1

Curva	I_{MPPT} (A)	V_{MPPT} (A)	α (°)	FP	P_{MPPT} (W)
A	1,44	70,2	165	0,660	101,2
B	4,36	78,0	136	0,733	340,4
C	4,46	102,8	131	0,966	458,1

8 Harmônicos

8.1 Condições Nominais

Em condições nominais, sem desequilíbrio, apenas os harmônicos de ordem $18k \pm 1$ não atendem os limites permitidos pela norma IEEE 519-1992. Este problema é resolvido com a colocação do filtro de alta frequência. A Figura 21 apresenta a comparação entre os harmônicos

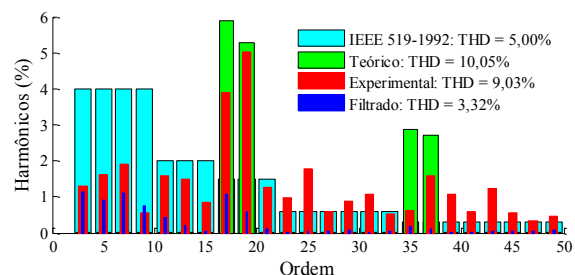


Figura 21 - Harmônicos na corrente injetada na rede

Os resultados experimentais apresentam harmônicos de ordens diferentes do devido a ondulação e desequilíbrio nas correntes de entrada. As reatâncias de dispersão do autotransformador e da rede fazem

com que a THD experimental seja menor que o valor teórico.

8.2 Condições de Desequilíbrio de I_{CC}

Em alguns instantes como sombreamento parcial de algum banco de painel pode ocorrer desequilíbrio nas correntes fornecidas pelos painéis. Um desequilíbrio faz com que harmônicos intermediários de ordem $6k \pm 1$ tenham suas amplitudes aumentadas, tendendo a ter o mesmo espectro harmônico de um conversor de 6 pulsos.

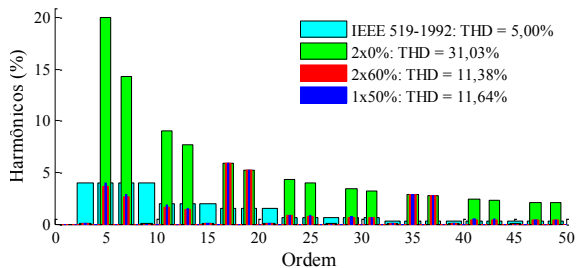


Figura 22 - Harmônicos em algumas condições de desequilíbrio

A Figura 22 apresenta as seguintes condições de desequilíbrio: Apenas um inversor funcionando; Um inversor fornecendo 100% e dois fornecendo 60% da corrente; 2 inversores fornecendo 100% e um 50% da corrente. O gráfico mostra que nas duas últimas condições, apenas os harmônicos de ordem $18k \pm 1$ não atendem a norma.

Apenas no caso onde apenas um inversor está fora de operação que as harmônicas de ordens diferentes de $18k \pm 1$ apresentam amplitudes fora da faixa permitida pela norma. Como no caso anterior, um filtro de alta frequência resolve este problema.

9 Conclusão

Este artigo apresenta uma alternativa para o processamento da energia gerada por painéis fotovoltaicos. O objetivo deste conversor é ser instalado em locais remotos, onde se consiga uma grande radiação solar durante o ano e não necessite de uma manutenção frequente, portanto as características buscadas neste são: baixo custo, robustez, confiabilidade, fácil manutenção, qualidade da energia entregue à rede e a capacidade de fazer o rastreamento da máxima potência fornecida pelos painéis.

O conversor é capaz de fazer o rastreamento de máxima potência atuando na tensão média dos painéis. O método Perturba e Observa foi escolhido para fazer o MPPT devido a sua simplicidade. A perturbação atua no ângulo de disparo que por sua vez altera a tensão média sobre o painel.

Foram analisados os efeitos de variações de irradiação e temperatura na tensão dos painéis, pois é na tensão que o conversor atua. As situações extremas analisadas foram 1000 W/m^2 a 25°C e 200 W/m^2 80°C . O conversor consegue operar nestas condições de tensão com uma variação do fator de potência de

0,996 a 0,652 respectivamente, injetando potência reativa capacitiva na rede elétrica.

Os resultados experimentais foram feitos com potência reduzida devido a limitações do emulador de painel fotovoltaico. A corrente injetada na rede apresenta baixa THD (9,03%) que atende à norma IEEE 519-1992 com a utilização um filtro passa baixa. O fator de potência dependerá da máxima potência fornecida pelo painel, porém a energia reativa é capacitiva, que pode ser absorvida pela rede. Apesar da perda no fator de potência, as vantagens com relação à robustez, baixo custo e alto rendimento (97,04% obtido experimentalmente), tornam este conversor uma alternativa viável para a cogeração fotovoltaica perante a proposta de processar potências elevadas a um custo reduzido em locais remotos e de difícil acesso.

Referências Bibliográficas

- IEEE Std 519-1992, 1993. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. s.l.:s.n.
- Brighenti, L. L., Kremer, L. G., Batschauer, A. L. & Mezaroba, M., 2013. Phase-Controlled Inverters Associated to a Multi-Pulse Autotransformer Applied to Photovoltaic Cogeneration. *Cobep*.
- Esrarn, T. & Chapman, P. L., 2007. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, June, 22(2), pp. 439-449.
- Fernandes, R. C., Oliveira, P. D. S. & Seixas, F. J. M. D., 2011. A Family of Autoconnected Transformers for 12- and 18-Pulse Converters - Generalization for Delta and Wye Topologies. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, July, 26(7), pp. 2065-2078.
- Kempe, A. & Schonwandt, U., 1996. *EMC of PV-plants with line-commutated inverters*. s.l., s.n., pp. 1343-1346.
- Paice, D. A., 1996. *Power Electronics Converter Harmonics: Multipulse Methods for Clean Power*. s.l.:Wiley-IEEE Press.
- Sarwar, A. & Jamil Asghar, M., 2010. *Multilevel converter topology for solar PV based grid-tie inverters*. s.l., s.n., pp. 501-506.
- Seixas, F. J. M. D. & Barbi, I., 1999. *A new 12 kW three-phase impulse high power factor AC-DC converter with regulated output voltage for rectifier units*. s.l., s.n., pp. 8 pp.-.
- Villalva, M., Gazoli, J. & Filho, E., 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, May, 24(5), pp. 1198-1208.
- Wasynczuk, O., 1989. Modeling and dynamic performance of a line-commutated photovoltaic inverter system. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Sep, 4(3), pp. 337-343.
- Wu, B., 2006. *High-Power Converters and AC Drives*. s.l.:s.n.