

Micro-inversor Monofásico com Link CA Ressonante para Aplicação em Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid

Rogério da Silva* Moisés Ferber** Diego Greff***

* Instituto Federal de Santa Catarina, SC,
(e-mail:rogerio.silva@ifsc.edu.br).

** GREEN - Grupo de Energias Renováveis, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, (e-mail:moises.ferber@ufsc.br)

*** GREEN - Grupo de Energias Renováveis, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, (e-mail:diego.greff@ufsc.br)

Abstract: This article presents a micro-inverter topology with resonant AC link, presenting benefits in relation to inverters with DC link such as: size, harmonics in the output current, converter life, manufacturing cost and maintenance cost. The micro-inverter consists of a CC-CA converter that powers a resonant LC filter at high frequency, and a AC-AC converter that controls voltage and low frequency for the load. Initially, the power of the micro-inverter was defined to supply the necessary energy of a motor pump 1/3 CV, 220 V, 60 Hz. In the simulation results are presented the main forms of voltage and current wave of the resonant AC link, and in the load, as well as the benefit of ZVS switching obtained by the modulation technique employed. The results were obtained for a photovoltaic input of 34.4V/13.8A and as a load a motor pump of 1/3HP, 220V, 60Hz. Evidenced through simulations that the topology meets the expectations of the application, in a differentiated way. The efficiency analysis of the micro-inverter under study was performed. Initially, the power of the microinverter was defined to supply the necessary energy of the motor pump.

Resumo: Este artigo apresenta uma topologia de micro-inversor com link CA ressonante, apresentando benefícios em relação aos inversores com link CC como: tamanho, harmônicas na corrente de saída, vida útil do conversor, custo de fabricação e manutenção. O micro-inversor consiste de conversor CC-CA que alimenta um filtro LC ressonante em alta frequência, e um conversor CA-CA que controla a tensão e baixa frequência para a carga. Inicialmente definiu-se a potência do micro-inversor, para suprir a energia necessária de uma motobomba de 1/3CV, 220V, 60Hz. Neste artigo são apresentados as etapas e detalhes de operação dos conversores, a técnica de modulação, e os resultados obtidos por simulação em PSIM. Nos resultados de simulação são apresentadas as principais formas de onda de tensão e corrente do link CA ressonante, e na carga, bem como o benefício da comutação ZVS obtida pela técnica de modulação empregada. Os resultados foram obtidos para uma entrada fotovoltaica de 34,4V/13,8A e como carga uma motobomba de 1/3CV, 220V, 60Hz. Evidenciado através das simulações que a topologia atende as expectativas da aplicação, de uma forma diferenciada. Realizado a análise de rendimento do micro-inversor em estudo. Inicialmente definiu-se a potência do micro-inversor, para suprir a energia necessária da motobomba.

Keywords: AC Link; Micro-Inverter; Fotovoltaicos; Renewable Energy; ZVS.

Palavras-chaves: Link CA; Micro-inversor; Fotovoltaico, Energia Renovável; ZVS.

1. INTRODUÇÃO

As fontes de energias não renováveis, como combustíveis fósseis são limitados e poluentes. De acordo com Sawin et al. (2018), a taxa de crescimento do consumo das fontes de energias renováveis ao final de 2017 ao longo dos últimos 10 anos, excluindo a fonte de energia biomassa, atingiu a 5,4%, a energia biomassa é de 0,2%, enquanto as fontes de energias não renováveis como as fósseis e nucleares alcançaram um crescimento de 1,6%.

A capacidade das fontes de energias renováveis globais ao final de 2017 atingiram 2.195GW e responderam a 26,5% da energia global. Esse percentual está dividido nas seguintes fontes de energias: 16,4% hidrelétricas, 5,6% eólica, 2,2% biomassa, 1,9% fotovoltaica (PV) e 0,4% são oceânica, CSP e geotérmica Sawin et al. (2018).

Os investimentos quanto as fontes das energias renováveis foram de 280 bilhões de USD em 2017. Onde, 160,8 bilhões de USD foram destinados à energia PV, em segundo lugar com 107 bilhões de USD foi a energia eólica e a diferença

foi para outras fontes de energias renováveis Sawin et al. (2018).

Comparando os investimentos de 2017 com 2016, apresentou um aumento de 18% no investimento voltados a energia PV, enquanto na eólica que está em segundo lugar apresentou uma redução de 12%, quanto as demais fontes das energias renováveis também apresentaram redução nos investimentos Sawin et al. (2018).

Quanto à tendência global voltado as formas de energias renováveis, as energias PV e eólica são as que apontam os maiores crescimentos entre 2007 e 2017 Sawin et al. (2018).

Ao final de 2017, o Brasil aumentou sua capacidade de abastecimento da energia PV em 0,9 GW, atingindo 1,1GW acumulado, o que corresponde a 1% da capacidade global da energia Sawin et al. (2018).

Um componente importante nos conversores estáticos em geral são os semicondutores, pois são responsáveis por grande parte das perdas nos conversores e por consequência impactam diretamente no rendimento do conversor.

Conforme De Doncker et al. (2010), o rendimento máximo com diferentes tecnologias apontaram que, o uso da tecnologia Sic-Jfet no conversor chega a atingir 98,8% e com o Si-IGBT 97,2%. Estes resultados são obtidos sobre uma condição de 350 V_{CC} , embora a melhor condição se dá num sistema trifásico, onde se mantém um fluxo de energia contínuo no link CC para a rede. Assim como, ao se aumentar a amplitude da tensão do link CC o rendimento é reduzido.

Conforme De Doncker et al. (2010), sugere-se substituir os atuais IGBT's utilizados nos conversores eletrônicos por semicondutores tipo SiC-JFET, bem como, relata sobre a construção de conversores PV que já utilizam essa tecnologia e apresentam um rendimento máximo de 99%.

O conversor CC-CA-CA da pesquisa de Amirabadi et al. (2013, 2014) apresenta uma topologia ousada em comparação com as topologias convencionais do mercado. Elimina o link CC, sendo que esse link é responsável por: armazenamento da energia de forma intermediária; por grande parte da redução da vida útil dos conversores; pelo aumento do custo de fabricação e manutenção. Assim como, pelo aumento do volume do conversor.

A topologia com link CA de Amirabadi et al. (2013, 2014), utilizada no micro-inversor do estudo visa trazer inúmeros benefícios: redução do tamanho; redução das harmônicas na corrente de saída; aumento da vida útil do conversor; redução do custo de fabricação e manutenção. Como desvantagem da proposta em estudo, uma maior complexidade de implementação de controle na topologia do estudo.

O micro-inversor monofásico com link CA para o sistema PV tipo "off-grid", visa fornecer energia renovável de forma autônoma, para uma motobomba de uma cisterna, cujas características elétricas básicas são 220 V, 60 Hz e 1/3 CV.

2. TOPOLOGIA DO MICRO-INVERSOR E FUNCIONAMENTO

A Figura 1 apresenta a topologia do micro-inversor em estudo CC-CA-CA, através dessa figura é possível constatar

que há dois conversores na topologia do estudo, o primeiro conversor é um CC-CA responsável pela conversão da fonte de energia CC pela fonte de energia CA de alta frequência. Isso é realizado através das chaves S_0, S_1, S_2 e S_3 com a carga do circuito ressonante LC (circuito tanque). O circuito tanque é a principal carga desse conversor, é formado por um capacitor e um indutor em paralelo. O segundo conversor CA-CA, cicloconversor, com propósito de converter a tensão de entrada CA de alta frequência obtida no circuito tanque para uma outra tensão de saída CA de baixa frequência.

Neste estudo o micro-inversor tem como propósito converter a fonte de tensão CC para uma fonte de tensão eficaz de 220V com frequência de 60 Hz. Conforme Amirabadi et al. (2013, 2014); Dousoky and Abu-Rub (2014), as principais características dessa topologia são:

- Redução de peso e volume - Por não requerer o armazenamento de energia através do banco de capacitores, geralmente utilizado nas topologias dos conversores com link CC, bem como, ao utilizar a topologia com link CA em alta frequência, demandará uma menor indutância e capacitância;
- Redução das perdas nas chaves - Com o circuito ressonante do link CA e uma adequada modulação das chaves é possível a utilização da comutação suave ZVS "Zero Volts Switching", evitando o aumento excessivo da corrente de pico no momento da comutação, reduzindo as perdas de energia em 70% a 80% Harb et al. (2013); ao se utilizar a técnica de comutação ZVS e ZCS "Zero Current Switching". Na topologia em estudo está sendo utilizado a técnica ZVS, os IGBT's podem trabalhar numa frequência de comutação acima de 200 kHz Perin and Bascope (1997).
- Redução da harmônica na corrente de saída - Através da utilização do link ressonante CA e adequada modulação das chaves com a técnica ZVS;
- Boa dinâmica ao aumentar ou diminuir a tensão de saída - Com base nas simulações se constata uma boa dinâmica do conversor ao seguir a tensão de referência, validando que essa topologia é boa para uso em sistemas "off-grid" e "on-grid";
- Desacoplamento de potência (não galvânico) entre a entrada e saída do conversor - Intervalo sem condução entre os momentos de condução, dependendo do modo de operação dos conversores.

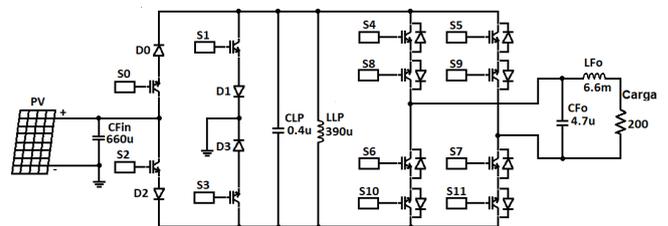


Figura 1. Topologia do Micro-Inversor.

A Figura 2 apresenta o modelo do controle em uma representação como atuador, responsável pela topologia em estudo. Assim como, o diagrama da máquina de estado finito (FSM), elaborado com base nas referências Lee and Seshia (2017); Dousoky and Abu-Rub (2014).

O controle se baseia nos pré-requisitos das transições e na mudança dos estados de forma sequencial. Esses pré-requisitos são baseados na funcionalidade da topologia do conversor e na técnica de comutação ZVS.

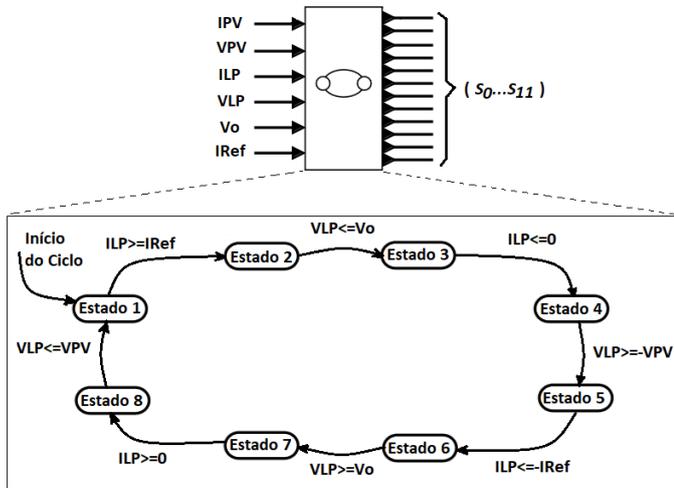


Figura 2. Representação do FSM como um atuador do Micro-inversor.

Quanto ao ciclo do fluxo de energia da topologia em estudo. De acordo com Amirabadi et al. (2013) o comportamento da carga e descarga do fluxo de energia pode ser representado de acordo com a Figura 3.

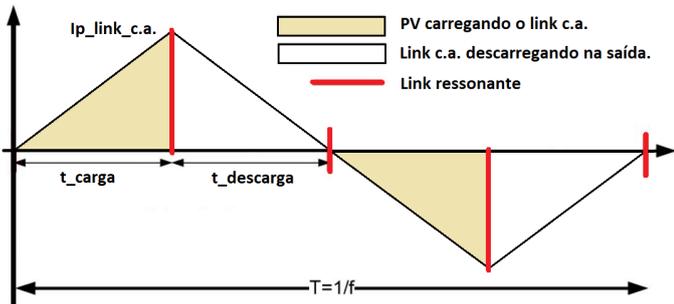


Figura 3. Comportamento do fluxo de energia da carga/descarga do link CA.

Conforme é mostrado na Figura 3, o ciclo de operação do micro-inversor em estudo é dividido em 8 estados, no qual: quatro estados são de transferência de energia e quatro estados são ressonantes.

Estado 1 (Carga do link CA): No momento da energização do circuito tanque LC ocorre a carga do indutor através de sua magnetização, neste estado a energização ocorre quando as chaves S_0 e S_3 passam a conduzir e podem ser visualizadas através da Figura 4. Essas chaves são comandadas a conduzir de forma antecipada, quando há uma tensão reversa sobre a tensão dreno e source V_{DS} das chaves, isso é possível por se tratar de um circuito com link CA.

Através dessa estratégia, quando a tensão V_{DS} chegar próximo a tensão nula no sentido a tensão direta sobre a chave, as mesmas passam a conduzir, gerando uma menor corrente de pico, ou seja, igualando-se a corrente inicial residual do circuito LC no momento de condução.

Conseqüentemente, não há um aumento expressivo da corrente de pico sobre as chaves, comum nos circuitos com link CC, mas sim um crescimento da corrente dada as características do circuito LC até atingir a corrente desejada I_{Ref} .

Quando a corrente atingir I_{Ref} as chaves S_0 e S_3 são comandadas a não conduzir, no momento da desenergização do circuito LC aproveita-se as características do capacitor C_{LP} do circuito ressonante na forma de fonte de tensão, minimizando as perdas no momento do desligamento das chaves.

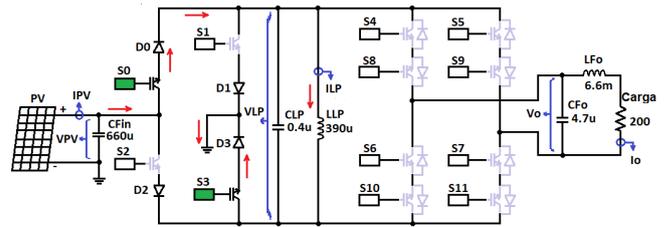


Figura 4. Estado 1 - Carga no link CA Positivo.

Estado 2 (Ressonância parcial): Nesse estado as chaves deixam de conduzir e a energia do circuito ressonante LC passa a entrar em ressonância conforme apresentado na Figura 5, inicialmente o sentido da amplitude da tensão V_{LP} segue o sentido do semiciclo negativo, o fim do estado 2 leva em consideração a relação da tensão V_{LP} ser menor ou igual a tensão V_o , que podem originar duas ações diferentes: a primeira condição é se há necessidade de incremento de V_o , o fim do estado 2 ocorre quando a tensão do link CA passa por zero volt na direção negativa da ressonância; a segunda condição é se há necessidade de decrementar a tensão V_o , o fim do estado 2 ocorre quando a tensão do link CA exceder a tensão máxima da tensão desejada em condições normais, nesse caso 311 V, pois, o valor da tensão eficaz é 220 V.

Importante, mesmo que haja uma mudança de estado de 2 para 3 o circuito continuará em ressonância até que a tensão do link CA iguale a tensão de saída no estado 3, permitindo a comutação suave ZVS.

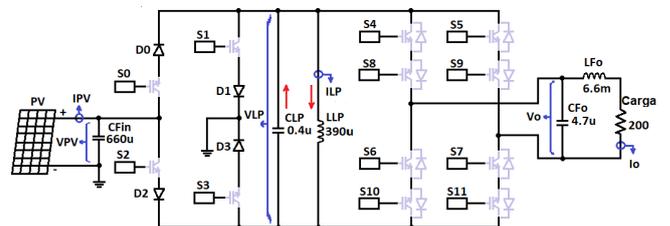


Figura 5. Estados 2, 4, 6 e 8 - Ressonância no link CA.

Estado 3 (Descarga ou regeneração do link CA): No estado de descarga do link CA para energização da carga na saída por V_o ocorre sobre uma das quatro possibilidades:

Situação 1, necessidade do incremento da tensão de saída V_o no semiciclo positivo, ocorre quando as chaves S_9 e S_{10} passam a conduzir e podem ser visualizadas através da Figura 6(a).

Situação 2, necessidade do incremento da tensão de saída V_o no semiciclo negativo, ocorre quando as chaves S_8 e

S_{11} passam a conduzir e podem ser visualizadas através da Figura 6(b).

Situação 3, necessidade do decremento da tensão de saída V_o no semiciclo positivo, ocorre quando as chaves S_5 e S_6 passam a conduzir e podem ser visualizadas através da Figura 7(a).

Situação 4, necessidade do decremento da tensão de saída V_o no semiciclo negativo, ocorre quando as chaves S_4 e S_7 passam a conduzir e podem ser visualizadas através da Figura 7(b).

Importante, sempre que as chaves são comandadas a conduzir ON , o momento inicial desse comando ocorre com antecedência a condução, como mencionado no estado 1, ainda com a tensão reversa sobre V_{DS} nas chaves, respeitando a necessidade do fluxo da energia entre as tensões do link CA V_{LP} e da saída V_o próximo a tensão nula ao aplicar a comutação ZVS, quando a tensão V_o alcançar o objetivo previsto na tensão de referência V_{Ref} as respectivas chaves são comandadas a deixar de conduzir OFF , nesse momento o capacitor C_{Fo} responsável pelo filtro de saída auxiliará na minimização das perdas no desligamento.

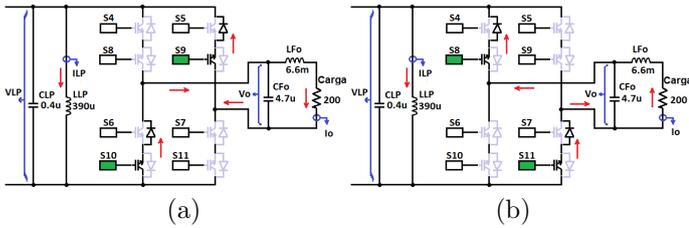


Figura 6. Estado 3 - Incremento: (a) Tensão de Saída Positivo, (b) Tensão de Saída Negativo.

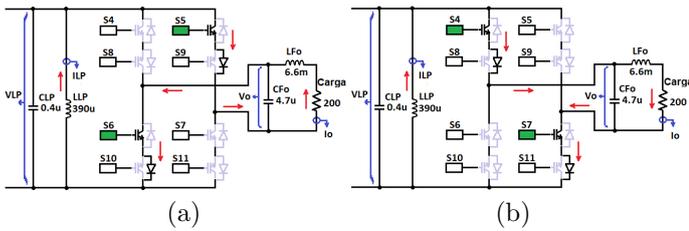


Figura 7. Estado 3 - Decremento: (a) Tensão de Saída Positivo, (b) Tensão de Saída Negativo.

Estado 4 (Ressonância parcial): Nesse estado, o comportamento do circuito é semelhante ao estado 2, todas as chaves são comandadas a deixar de conduzir conforme é apresentado na Figura 5, quanto ao fluxo de energia no link CA, volta a entrar em ressonância a partir do ponto se encontrava no final do estado 3, como e apresentado na Figura 12, até que a tensão do link CA V_{LP} seja igual a tensão da entrada V_{PV} .

Importante, antes que a tensão V_{LP} se iguale a tensão V_{PV} as chaves S_1 e S_2 devem ser comandadas a conduzir ON com antecedência, ainda com a tensão reversa V_{DS} sobre as chaves para possibilitar a comutação ZVS.

Estados 5 a 8 : São semelhantes aos estados 1 a 4, a diferença está no sentido do fluxo da corrente no link CA.

Devido a alternância do fluxo de corrente no link CA, há duas chaves por braço do conversor CC-CA (ponte H unidirecional) responsáveis pela carga do link CA, ou seja, a cada mudança de sentido do fluxo de corrente há duas chaves comandadas a conduzir, responsáveis pela carga do circuito LC mesmo com a inversão do fluxo da corrente no link CA, como é apresentado através da Figura 8.

Quanto ao conversor CA-CA, responsável pela descarga ou regeneração do link CA, cada braço tem quatro chaves, para possibilitar os fluxos possíveis de energia entre o link CA e a carga na saída, pois, com o segundo conversor é possível energizar a carga na saída (descarregando o link CA) sempre que houver necessidade de incremento da tensão de saída V_o ou regenerar a energia excedente na carga para o link CA (carregando o link CA), sempre que haja necessidade de decremento da tensão da saída V_o .

Semelhante ao conversor CC-CA, o conversor CA-CA também funciona com outros pares de chaves, nesse caso, em virtude das diferentes possibilidades de fluxo de energia há necessidade de quatro pares de chaves (ponte H bidirecional).

O fluxo de energia do estado 5 pode ser visualizado através da Figura 8.

Nos estados 6 e 8 seguem o mesmo princípio dos estados 2 e 4 e são representados através da Figura 5.

Quanto ao estado 7, semelhante ao estado 3, há quatro possibilidades de fluxo de energia e são apresentados através das Figuras 9(a), 9(b), 10(a), 10(b).

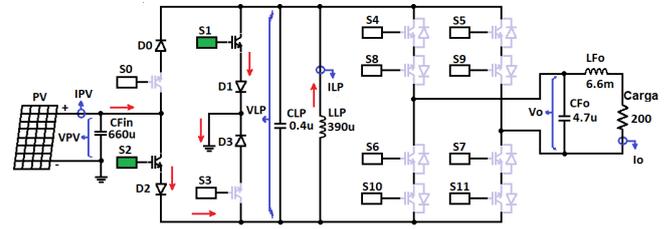


Figura 8. Estado 5 - Carga no link CA Negativo.

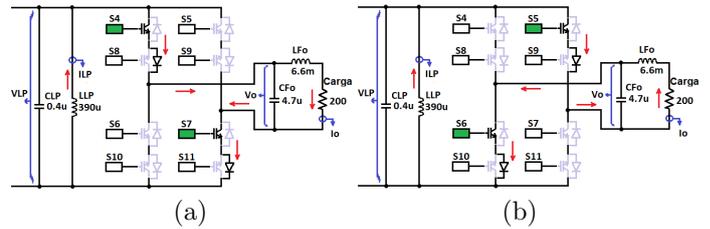


Figura 9. Estado 7 - Incremento: (a) Tensão de Saída Positivo, (b) Tensão de Saída Negativo.

3. TÉCNICA DE CONTROLE

Na Figura 2 é apresentado a representação do controle FSM responsável pelo funcionamento do conversor na simulação.

Para obtenção desse controle elabora-se um algoritmo na linguagem C, para realizar a leitura das entradas analógicas (sensores V_{PV} , V_{LP} , I_{LP} ,...), para rodar o algoritmo de controle e atuar comandando as chaves (S_0 ,

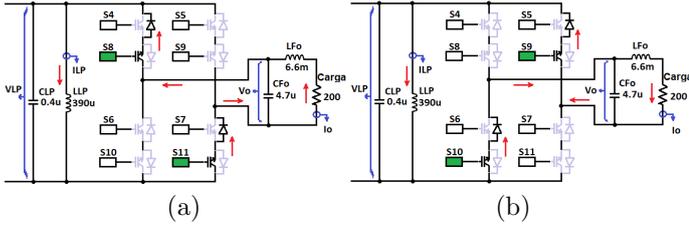


Figura 10. Estado 7 - Decremento: (a) Tensão de Saída Positivo, (b) Tensão de Saída Negativo.

$S_1, S_2...$) a conduzir *ON* ou a deixar de conduzir *OFF* na forma digital.

Na topologia apresentada, não é possível aplicar a modulação de comutação das chaves por PWM, bastante usual nos conversores CC-CA buck-boost.

A não aplicação da modulação PWM na topologia com link CA é devido a premissa da proposta quanto a aplicação da comutação suave ZVS das chaves, possibilitando a redução das perdas por comutação das chaves e pela redução das harmônicas.

Tendo em vista que a proposta estudada se baseia num micro-inversor a ser aplicado num sistema “off-grid”, há necessidade de uma tensão de referência V_{Ref} , esta tensão é fornecida a partir de uma função senoidal numérica com frequência e amplitude desejadas, para que a tensão de saída seja adequada a desejada.

A tensão de referência V_{Ref} não aparece na topologia do estudo, pois, se trata de uma variável interna do algoritmo. Uma segunda variável interna é a corrente de referência I_{Ref} , este parâmetro tem uma grande influência na amplitude do fluxo de energia a ser armazenado no link CA.

Conforme Dousoky and Abu-Rub (2014); Amirabadi et al. (2014), utilizaram a técnica de controle MPPT. Nessa proposta, não é aplicado o controle MPPT, foi optado por aplicar um controle mais simples, fornecendo a variável I_{Ref} dinâmica, a forma de onda triangular da variável I_{Ref} se dá em virtude de uma maior demanda de energia no pico da tensão de saída V_o , para uma característica de carga linear.

Definida as considerações mencionadas sobre I_{Ref} , a mesma é fornecida com base no valor nominal da corrente do Módulo PV (I_{PV}) multiplicado por um ganho dinâmico.

O range do ganho utilizado na simulação é entre um e dois, a variação do ganho se dá numa forma de onda triangular numérica, pois se trata de uma variável interna, onde o “off-set” é um e o fim de escala é dois, a frequência da forma de onda I_{Ref} é duas vezes a frequência da tensão de saída V_o .

O comportamento da forma de onda I_{Ref} é simples de ser implementada, em virtude da própria característica de uma carga resistiva e pode ser visualizada através da Figura 11.

É importante ressaltar que a topologia do estudo tem uma maior complexidade em relação ao controle devido a sua dinâmica, comparado com os sistemas que adotam um con-

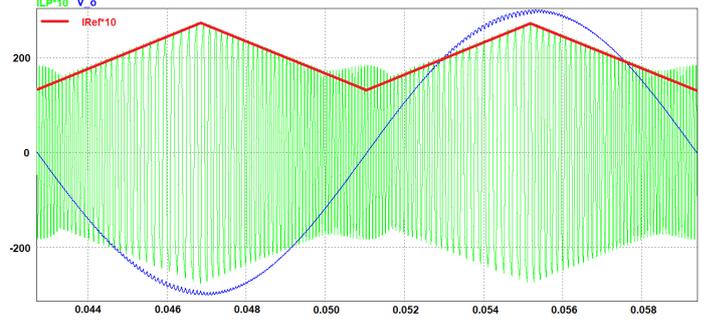


Figura 11. Formas de ondas de I_{Ref} , I_{LP} e V_o .

trole com modulação PWM, porém, a simulação apresenta uma boa resposta dinâmica do micro-inversor quanto a tensão desejada, demonstrando uma grande aplicabilidade em sistemas “off-grid” e “on-grid”.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O software de simulação PSIM é utilizado para obtenção dos resultados numéricos do micro-inversor monofásico do estudo, a Tabela 1 apresenta os parâmetros de simulação.

Tabela 1. Parâmetros do Micro-inversor

Parâmetros	Valor
Tensão Nominal PV (V_{PV})	34,4 V
Corrente Nominal PV (I_{PV})	13,84 A
Tensão de Saída (V_o)	220 V
Frequência de Saída	60 Hz
Indutância do Link CA	390 μ H
Capacitância do Link CA	0,4 μ H
Corrente de Pico do Link CA ^a	27,69 A
Frequência do Link CA	12,74 KHz
Capacitância do Filtro de Entrada	660 μ H
Capacitância do Filtro de Saída	4,7 μ H
Indutância do Filtro de Saída	6,6 mH

^a A corrente de pico do Link CA varia com o ganho de I_{Ref} .

Através da Figura 12 é constatado que a corrente de entrada I_{PV} na forma pulsante, responsável pela carga do circuito *LC* e a corrente de saída I_o na forma pulsante, responsável pela descarga do circuito *LC* ocorrem em momentos diferentes, comprovando a característica de um conversor com desacoplamento de potência (não galvânico) entre a corrente de entrada e saída do micro-inversor. Assim como, é visualizado o funcionamento adequado da técnica de comutação ZVS sobre as chaves, quando a tensão V_{LP} se iguala a tensão V_{PV} para carregar o circuito *LC* e quando a tensão V_{LP} se iguala a tensão V_o para descarregar a energia do circuito *LC* na carga da saída do micro-inversor.

A confirmação do funcionamento da comutação ZVS se dá através da forma de onda da corrente da Figura 12, pois, apresenta um valor de pico da corrente adequado, caso a comutação ZVS não fosse aplicada corretamente, apresentaria um valor de pico de corrente elevado no início da condução.

Outra característica constatada através da Figura 12, é uma diferença grande entre o tempo de carga do circuito *LC* e o tempo de descarga do circuito *LC*, isso se dá devido a diferença entre a tensão de entrada 34,4 V_{CC} e a tensão de saída 220 V_{CA} . Ou seja, o ideal é que a tensão de entrada

tenha uma amplitude igual ou próximo a tensão de pico da tensão de saída.

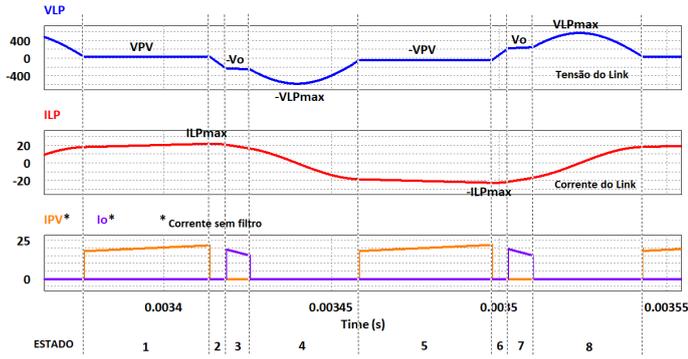


Figura 12. Ciclo do fluxo de energia do Micro-inversor.

A Figura 13 apresenta o comportamento das seguintes formas de ondas: tensão de entrada V_{PV} ; corrente de entrada I_{PV} ; tensão de saída V_o e a corrente de saída I_o com os respectivos filtros. Através dessas formas de ondas se constata que a energia utilizada da fonte de entrada V_{PV} não é constante ao longo do ciclo, há uma maior demanda do fluxo de energia de forma concentrada, chegando a apresentar uma queda de tensão nesses momentos. Isso se dá em virtude da topologia do micro-inversor com saída monofásico, onde, não se requer um fluxo de energia contínuo.

A energia não utilizada na fonte de entrada V_{PV} , pode ser melhor aproveitada a partir de uma topologia trifásica com funcionalidade semelhante a estudada.

Foram realizadas simulações para constatação da potência máxima do micro-inversor com as características de tensão convertida como adequada, conforme ANEEL (2018), a potência máxima obtida nas simulações é de 255,17W.

A partir da definição da potência máxima e com base nas perdas de potência do micro-inversor, são realizados ensaios mudando-se o valor da resistência de carga, para gerar uma demanda de potência progressiva a cada 10% até atingir a potência máxima do micro-inversor.

Nestas simulações buscou-se atender os critério da ANEEL (2018) para tensão de linha e frequência. Na condição adequada, a tensão de linha (TL) a ser fornecida pela fonte deve estar entre ($202 \text{ V} \leq TL \leq 231 \text{ V}$) no regime contínuo, assim como, a frequência deve estar entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

Na simulação do micro-inversor sobre condição de potência máxima a amplitude mínima da tensão de saída V_o é de 205V.

Para a obtenção do rendimento do micro-inversor estudado, foram identificados as perdas das chaves, com base nos tempos de comutação e correntes de condução por meio das simulações e cálculos para obtenção das perdas, assim como, foram utilizados as perdas de um indutor e de um capacitor real.

Quanto as não idealidades das chaves, levou-se em consideração os parâmetros dos “datasheets” do mosfet STP38N65M5 e do diodo STTH3010PI. A perda total

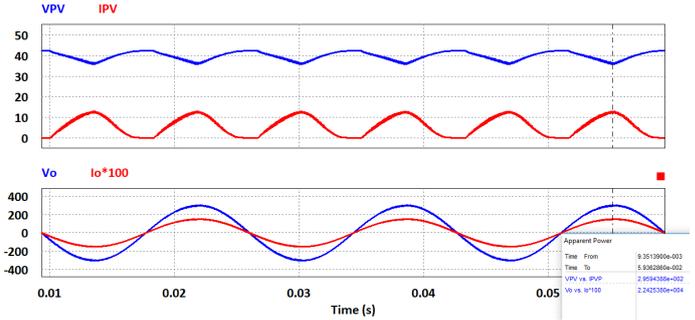


Figura 13. Formas de ondas da entrada (V_{PV} e I_{PV}) e da saída (V_o e I_o).

sobre a máxima potência do micro-inversor é próximo a 49,4W.

Os dados de razão cíclica obtidos nas simulações são próximos a 90° da tensão de saída V_o e os valores das perdas calculadas do conversor são apresentados através da Tabela 2.

A diferença entre a perda total e a perda nas chaves são as perdas dos indutores e capacitores reais de 33,1W.

Tabela 2. Razão cíclica e perdas no conversor.

Potência (%)	Razão Cíccl. CC-CA	Razão Cíccl. CA-CA	Perdas Chaves	Perdas Total
10	6,60%	0,4%	0,7 W	33,8 W
20	9,21%	0,75%	1,3 W	34,5 W
30	12,18%	1,09%	2,3 W	35,4 W
40	15,18%	1,42%	3,5 W	36,7 W
50	17,85%	1,77%	4,9 W	38,1 W
60	20,99%	1,96%	6,8 W	39,9 W
70	24,19%	2,51%	9,0 W	42,2 W
80	27,22%	2,68%	11,4 W	44,6 W
90	30,57%	3,21%	14,4 W	47,6 W
100	32,45%	3,53%	16,2 W	49,4 W

A partir dos resultados obtidos de valores de razão cíclica e valores das perdas no micro-inversor, se obteve o rendimento do micro-inversor no decorrer da potência demandada pela carga, esse resultado pode ser visualizado através da Figura 14.

O maior rendimento do micro-inversor é alcançado quando se utiliza 100% da potência disponibilizada, atingindo um rendimento de 83,78%. O pior rendimento do micro-inversor ocorre quando ha uma menor demanda de carga, no caso do estudo a 10% da potência máxima, apresentando um rendimento de 43,01%.

Portanto, o maior rendimento do micro-inversor é de 83,78% ha uma demanda de potência de 255,17W.

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um micro-inversor monofásico com link CA ressonante aplicado a sistema fotovoltaico “off-grid”. O link CA ocorre a partir das comutações das chaves do micro-inversor associado a um circuito ressonante LC. Essa topologia com a adequada comutação das chaves do micro-inversor, permite um desacoplamento de potência entre a tensão de entrada e saída eletronicamente.

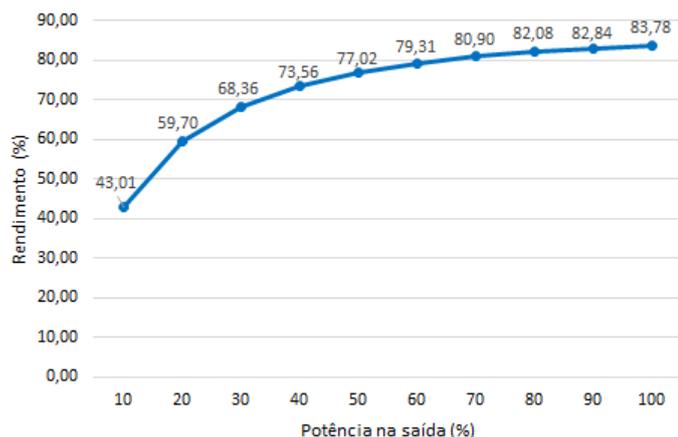


Figura 14. Rendimento (%) do Micro-inversor.

Ao se utilizar o link CA ressonante e adequada utilização da comutação ZVS, o conversor apresentou uma boa redução das harmônicas, o THD_v obtido nas simulações do conversor foi de 0,8%, bem abaixo do limite máximo recomendado pela IEEE Std 519 (2014) para a faixa de tensão aplicável no estudo.

Nesse estudo são apresentados, a topologia do micro-inversor, os estados de operação, o diagrama de controle FSM, a forma de onda adotada no controle da corrente de referência I_{Ref} , os parâmetros utilizados na simulação do micro-inversor em PSIM, as principais formas de ondas do fluxo de energia na topologia com link CA, assim como, as formas de ondas das tensões e corrente de entrada e saída.

O maior rendimento do micro-inversor é de 83,78% ha uma demanda de potência máxima do micro-inversor do estudo. Ou seja, é um bom resultado.

Como trabalho futuro, será concluído o protótipo do micro-inversor e aplicado a uma motobomba de 1/3 CV.

AGRADECIMENTOS

Agrademos a Deus, as famílias, ao IFSC e a UFSC. O presente trabalho teve o apoio do Instituto Federal de Santa Catarina e da Universidade Federal de Santa Catarina.

REFERÊNCIAS

- (2014). IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, 1–29.
- Amirabadi, M., Balakrishnan, A., Toliyat, H.A., and Alexander, W.C. (2014). High-frequency ac-link pv inverter. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 61, 281–291.
- Amirabadi, M., Toliyat, H.A., and Alexander, W.C. (2013). A multiport ac link pv inverter with reduced size and weight for stand-alone application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49, 2217–2228.
- ANEEL (2018). *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST*. Brasília.
- De Doncker, R.W., Dick, C.P., Mura, F., and Butschen, T. (2010). Power electronic devices for renewable power

- systems. In *2010 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices IC's (ISPSD)*, 19–25.
- Dousoky, G.M. and Abu-Rub, H. (2014). Single-phase zvs ac-link inverter for pv-grid connection at mppt operation. In *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2253–2258.
- Harb, S., Zhang, H., and Balog, R.S. (2013). Ac-link, single-phase, photovoltaic module integrated inverter. In *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 177–182.
- Lee, E.A. and Seshia, S.A. (2017). *Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach*. MIT Press, California, 2nd edition.
- Perin, A.J. and Bascopé, R.T. (1997). *O Transistor IGBT Aplicado em Eletrônica de Potência*. Sagra, Porto Alegre.
- Sawin, J.L., Rutovitzand, J., Sverrisson, F., Adib, R., Murdock, H.E., Aberg, E., Appavou, F., Brown, A., Dwyer, S., Epp, B., Guerra, F., Kondev, B., Musolino, E., Seyboth, K., Skeen, J., et al. (2018). *Renewables 2018 global status report*. REN21.