

UTILIZAÇÃO DE ESTRUTURA RETIFICADORA HÍBRIDA MONOFÁSICA PARA IMPOSIÇÃO DE CORRENTE DE ENTRADA SENOIDAL, REGULAÇÃO DE TENSÃO NO BARRAMENTO CC E INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA NA REDE

Bárbara M. A. Ribeiro¹, Paulo R. da Silva¹, Gustavo B. de Lima², Danillo B. Rodrigues², Luiz Carlos G. de Freitas¹.

¹ - Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberlândia - MG.

² - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberaba - MG.
barbaramaribeiro@hotmail.com; danillorodrigues@yahoo.com.br.

Resumo – Este artigo propõe o projeto e simulação computacional de um Retificador Híbrido Monofásico bidirecional com elevado fator de potência, reduzida distorção harmônica total (DHT) para imposição de corrente drenada da rede em conformidade com as normas IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4, imposição de corrente durante a injeção de potência ativa na rede em conformidade com a norma IEEE 1547, além da regulação de tensão no barramento CC durante a condição de excedente de energia no mesmo.

Palavras chave – Bidirecionalidade, distorção harmônica, DSP, fontes renováveis de energia, Retificador Híbrido Monofásico.

STRUCTURE UTILIZATION OF SINGLE-PHASE HYBRID RECTIFIER FOR SINUSOIDAL CURRENT IMPOSITION, VOLTAGE REGULATION IN CC BUS AND ACTIVE POWER INJECTION ON THE GRID

Abstract – This paper presents the design and simulation of a Bidirectional Single-Phase Hybrid Rectifier with high power factor and low harmonic distortion of current (THD) to impose electric current drained of the grid in accordance with the international standards IEC 61000-3-2 and IEC 61000-3-4, imposition of current during the injection of active power onto the grid in accordance with IEEE 1547 and voltage regulation on the DC bus when there is surplus power.

Keywords – Bidirectionality, DSP, harmonic distortion, renewable energy sources, Single Phase Hybrid Rectifier.

I. INTRODUÇÃO

As energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda

energia disponível na Terra e, por isso, são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta. Com o aumento da demanda global por energia elétrica aliado à baixa do preço destas fontes renováveis, a inserção das mesmas no Sistema Elétrico é cada vez mais expressiva [1].

Dessa maneira, por volta da década de 80, surgiu um conceito denominado por *Microgrid*. Este sistema opera normalmente conectado ao sistema de uma concessionária, com um fluxo de energia positivo ou negativo entre os mesmos, correspondentes à compra ou venda de energia.

A *Microgrid* deve ser dotada de equipamentos e técnicas de controle que permitam alterações em sua configuração interna e externa e em seu controle sem causar quaisquer transtornos aos consumidores. Isto pode ser alcançado pelo uso dos conversores conectados às fontes e outros dispositivos de eletrônica de potência distribuídos pela rede [2].

II. ESTRUTURA PROPOSTA

As fontes renováveis de energia dependem de condições ambientais como o nível de radiação solar e o vento, como é o caso das gerações fotovoltaica e eólica, respectivamente. Com isso, oscilações na tensão do barramento CC fornecido por esses sistemas de microgeração ocorrem em decorrência da intermitência dessa geração, acarretando em problemas de fornecimento de energia às cargas conectadas a esse barramento [3].

Neste sentido, como proposta de eliminar essas oscilações de tensão no barramento CC e promover a transferência do excesso de potência ativa gerada para a rede CA, este artigo propõe a utilização de um Retificador Híbrido Monofásico (RHM) composto pela associação em paralelo de dois grupos retificadores: um Retificador Monofásico Não Controlado (RNC) e um conversor monofásico chaveado SEPIC.

Trata-se de uma estrutura de alta potência e elevado FP, capaz de fornecer um barramento CC a partir da potência fornecida pela rede CA e estabelecer o fluxo reverso de potência no caso do excedente de energia elétrica gerada pelas fontes alternativas que compõem a Microrede, com base no trabalho proposto em [4], conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**



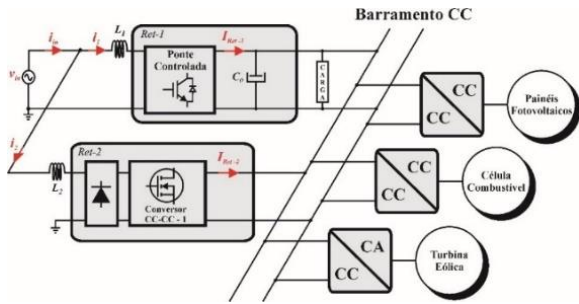


Fig. 1. Estrutura proposta por este artigo.

III. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento da estrutura pode ser explicado com base em três variáveis que são a potência, a corrente de entrada e a tensão e em seus comportamentos em condições normais de operação e em condições de excedente de potência ativa no barramento CC.

Para o caso de operação normal, observa-se através da Fig. 2 que a potência requerida pela carga é superior àquela fornecida pelo painel fotovoltaico que está conectado ao barramento CC, o que faz com que o retificador atue como um retificador não controlado tradicional através dos diodos antiparalelos das chaves juntamente com a atuação do conversor SEPIC. Nota-se ainda, também através da Fig. 2, que devido à estratégia de controle desenvolvida para maior robustez e eficiência do sistema, o RNC fica responsável por processar maior parte da potência nessa situação (60%). Em relação à corrente de entrada, para essa situação, ela está em fase com a tensão da rede. A tensão nesse caso fica constante e em torno de 280V.

Já para a situação de excedente de potência, a potência ativa requerida pela carga passa a ser menor do que a que é fornecida pelo painel, ou seja, o retificador não controlado passa a atuar como um inversor no sentido de reverter o fluxo de energia e o SEPIC fica desabilitado. Nessa situação, a corrente de entrada fica defasada de 180 graus em relação à tensão de referência já que a rede passa agora a receber energia ao invés de fornecê-la. Já a tensão de saída sobe um pouco e fica em torno de 300V para garantir o correto funcionamento do controle.

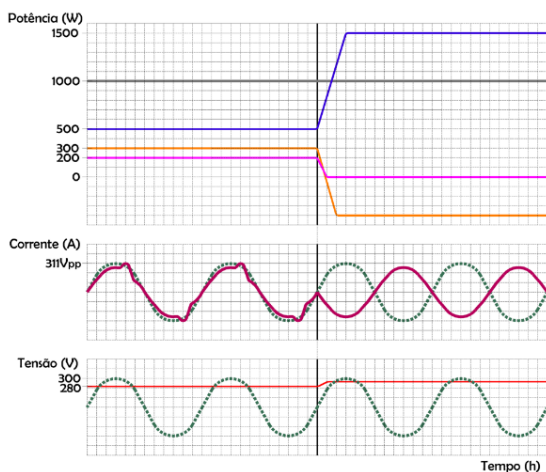


Fig. 2. Gráficos para princípio de funcionamento.

IV. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Baseando-se no princípio de funcionamento explicado anteriormente, desenvolveu-se uma estratégia de controle para determinar a operação do RHM tanto para condições normais quanto para excedente de energia mostrada na Fig. 3.

O seletor digital interpreta as condições de excedente ou falta de energia no barramento relacionadas ao painel fotovoltaico através do cálculo da potência fornecida pelo painel (o produto entre V_{pv} e I_{pv}) e da potência total requerida pela carga (produto entre V_0 e I_0). Se a potência requerida pela carga for superior à entregue pelo painel, o seletor habilita o SEPIC e desabilita as chaves do RNC. Mas se a potência do painel for maior, o seletor desabilita o SEPIC e habilita as chaves do RNC que passa a trabalhar como um inversor.

A técnica de controle utilizada em condição normal consiste em impor corrente de entrada senoidal de forma a garantir baixa distorção harmônica em conformidade com as normas e um elevado fator de potência de entrada fazendo com que a potência ativa processada pelo conversor SEPIC seja de 40% apenas. Dessa maneira, assegura-se que os 60% restantes da potência entregue a carga sejam processados pelo retificador não controlado. Essa divisão da potência estabelecida, 60% para o RNC e 40% para o SEPIC, é uma condição que garante uma maior robustez da estrutura pois tem-se um maior rendimento.

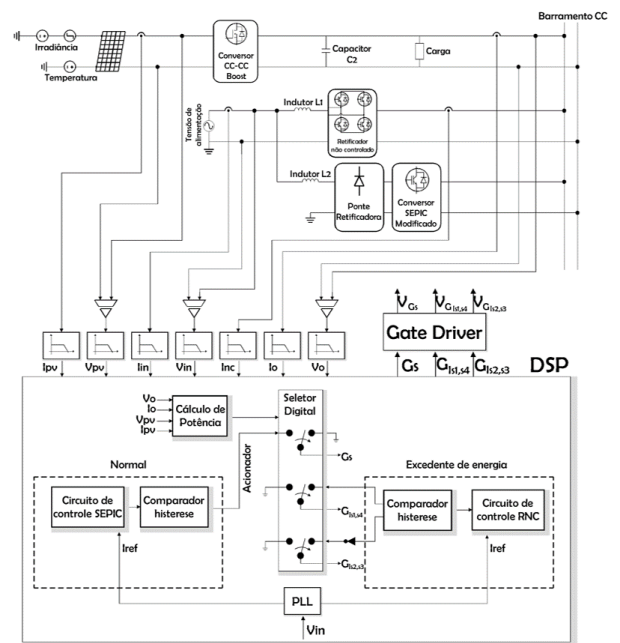


Fig. 3. Estratégia de controle desenvolvida.

Para o caso de operação normal, o controle do SEPIC irá atuar garantindo que a parcela de potência processada pelo RNC seja regulada em torno dos 60% desejados, conforme ilustra a Fig. 4. Para que isso ocorra, sensoria-se a corrente do RNC e a seguir ela é filtrada em um filtro de segunda ordem de forma a se obter apenas seu valor médio. Esse valor médio é multiplicado pela tensão de saída V_0 obtendo-se a potência média do RNC.

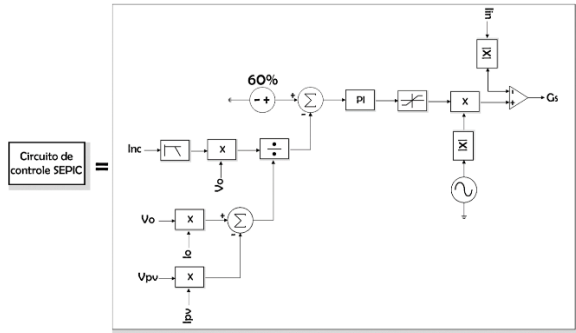


Fig. 4. Controle do conversor SEPIC.

Assim, para encontrar o percentual de processamento de potência do RNC, dividiu-se essa potência média pela diferença entre a potência da carga e a potência do painel. A seguir, subtrai-se 60% do resultado esperado e o erro encontrado é passado por um controlador PI o qual vai atuar na chave do SEPIC anulando o erro e garantindo o processamento de potência.

Após o PI, tem-se um saturador para limitação da corrente de saída e por fim um controle por histerese que compara a corrente de entrada sensorizada com uma referência senoidal gerada. Se a corrente for superior à de referência, abre-se a chave do SEPIC, mas, se a corrente for inferior, a chave do conversor é então fechada. São estabelecidos os valores máximo e mínimo para a corrente I_{in} e assim o chaveamento é finalmente selecionado conforme o código de comutação de controle.

Durante a condição normal de operação, o controle garante também que um nível de pulso baixo é enviado para as chaves do Retificador Não Controlado para que ele não funcione como uma ponte composta por chaves. Ou seja, durante a operação normal, a estratégia de controle estabelece que as chaves do RNC são desabilitadas de tal forma que ele vai operar como um retificador não controlado em ponte completa de diodos normal.

Já para o caso da operação com excedente de energia, tem-se a atuação do retificador não controlado isoladamente realizando o mesmo papel de um inversor como mostrado pela Fig. 5. Trata-se de um controle bem mais simples que o controle desenvolvido para o conversor SEPIC.

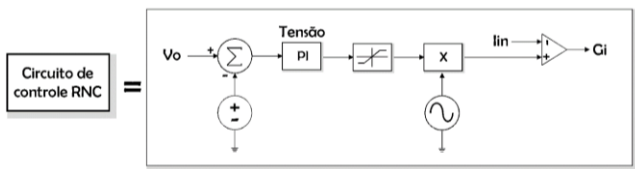


Fig. 5. Controle do RNC.

Primeiramente, sensoria-se a tensão no barramento e dessa tensão tira-se o erro que é enviado para o PI de tensão. Esse controlador vai interpretar esse erro e atuar no sistema de forma a reduzi-lo a zero. A saída do PI passa por um saturador e é então é multiplicada por uma referência senoidal a qual é utilizada para se comparar diretamente com a corrente imposta/injetada na rede CA. Uma vez que as chaves S_1 e S_4 trabalham de forma complementar às chaves S_2 e S_3 , quando

a referência de corrente for maior que a corrente I_{in} , nível alto de pulso é enviado para as chaves S_1 e S_4 e nível baixo é enviado para as chaves S_2 e S_3 . Quando a referência de corrente for menor que a corrente I_{in} , o inverso ocorre e as chaves S_2 e S_3 recebem nível alto enquanto que as chaves S_1 e S_4 recebem nível baixo de pulso. Desta forma, o RNC funciona como um inversor responsável por injetar a potência ativa excedente no barramento CC para a rede CA de alimentação, além de regular a tensão no barramento CC durante essa condição de operação.

V. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Com o circuito estruturado foi possível dar início às simulações para comprovação dos gráficos e teorias já apresentadas. Como explicado no item anterior (IV – Estratégia de Controle), os resultados foram realizados e discutidos tanto para a operação em condições normais quanto para a operação com excedente de potência.

Em relação à corrente de entrada, denominada I_{in} , nota-se pela Fig. 6 que, em condição normal de operação, o conversor opera exatamente como ocorre na referência na qual o mesmo foi baseado: as quatro chaves do RNC estão desabilitadas e os diodos entram em condução de maneira que o retificador exerce a função de um retificador não controlado tradicional. Nessa situação, ainda é possível observar ainda na Fig. 6 que a corrente de entrada está em fase em relação à tensão.

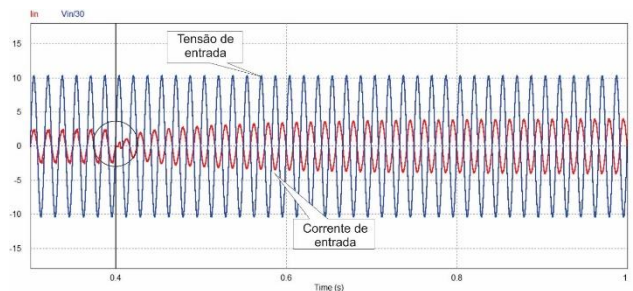


Fig. 6. Corrente de entrada comparada à tensão.

A Fig. 7 ilustra a forma de onda da corrente de entrada durante a condição normal de operação – ela possui uma característica próxima da senoidal e, apesar de apresentar uma pequena deformação devido ao efeito da forma de onda tradicional da corrente do Retificador Não Controlado, apresenta baixo conteúdo harmônico.

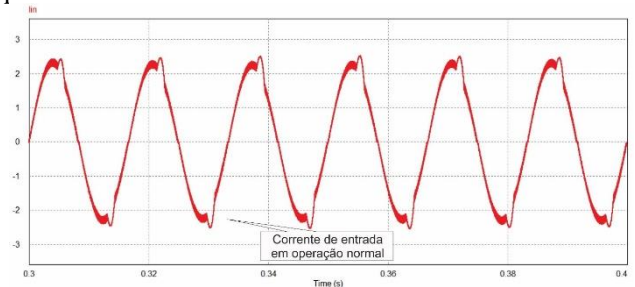


Fig. 7. Corrente de entrada em operação normal.

A Fig. 8 mostra em detalhes a corrente de entrada (I_{in}) quando há excedente de potência. Como nesta situação o conversor SEPIC está desabilitado, essa corrente passa a ser

imposta pela ponte chaveada do RNC e ter características mais próximas da referência senoidal. No momento em que começa a ocorrer o excedente de potência nas linhas, essa corrente de entrada inverte seu sentido e passar a ficar defasada de 180 graus em relação à tensão de referência (possuía sentido fonte-carga e possui sentido carga-fonte) comprovando a bidirecionalidade de potência.

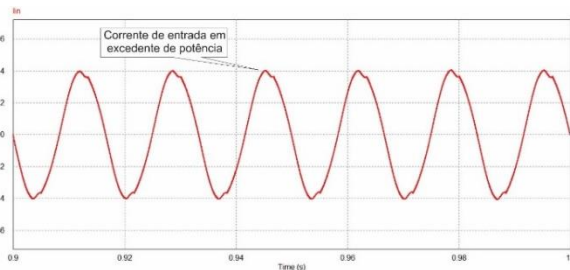


Fig. 8. Corrente em excedente de potência.

Agora, através do software MATLAB®, foi verificado que a corrente atende às normas internacionais do IEC (imposição de corrente drenada da rede) mostrada em [5] e IEEE 1547 (imposição de corrente injetada na rede) em relação à injeção de harmônicos na rede mostrada em [6]. A Fig. 9 e a Fig. 10 ilustram os resultados.

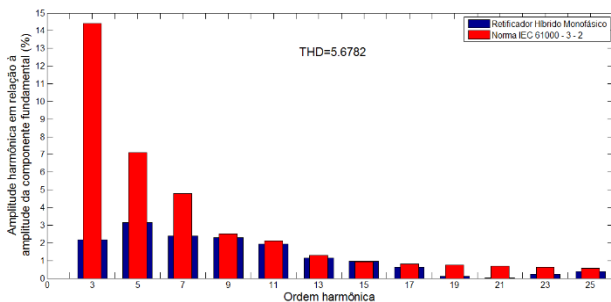


Fig. 9. THD para a norma IEC 61000-3-2.

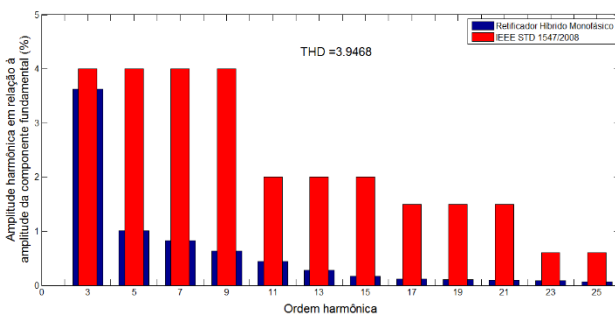


Fig. 10. THD para a norma IEEE 1547.

Para demonstrar que o conversor SEPIC é desabilitado durante a condição de operação com excedente de energia no barramento CC, a Fig. 11 e a Fig. 12 ilustram as formas de onda das correntes drenadas pelo RNC e pelo conversor SEPIC.

Na etapa de operação normal, a corrente do RNC (I_{nc}) é a tradicional de retificadores não controlados enquanto que a corrente do SEPIC é chaveada. Na etapa de operação com

excedente de energia, a corrente do RNC se transforma em uma corrente chaveada senoidal defasada de 180 graus em relação à tensão da rede e a corrente do conversor SEPIC irá zerar já que o mesmo está desabilitado. Além disso, a Fig. 13 comprova que a corrente de entrada é composta pela soma das correntes drenadas pelo RNC e pelo conversor SEPIC.

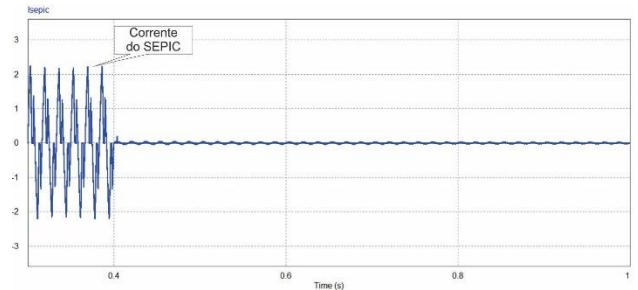


Fig. 11. Corrente no conversor SEPIC.

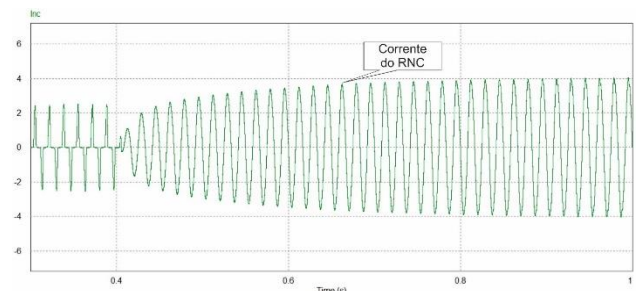


Fig. 12. Corrente no RNC.

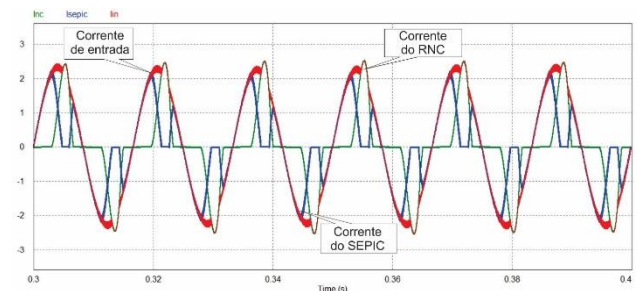


Fig. 13. Composição da corrente de entrada.

Já em relação à tensão na carga, a qual corresponde à tensão do barramento de corrente contínua, espera-se que a mesma se mantenha constante de maneira a não prejudicar nenhuma carga a ele conectada devido a variações de tensão indesejadas. A Fig. 14 ilustra o comportamento da tensão no barramento CC durante o transitório da mudança de condições de operação.

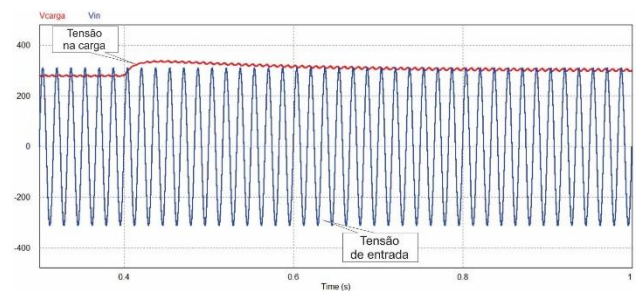


Fig. 14. Tensão na carga comparada à de entrada.

Por fim, têm-se as potências do retificador não controlado (P_{nc}), do conversor SEPIC (P_{sepic}) e a potência requerida pela carga (P_{carga}) de acordo com a potência do Boost anteriormente (P_{out_boost}) ilustradas na Fig. 15.

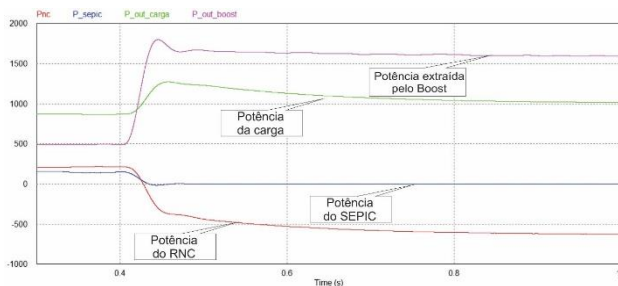


Fig. 15. Potências do circuito.

Em condição de funcionamento normal do conversor, o Retificador Híbrido Monofásico atua por completo e drena a energia da rede para fornecer à carga. Em condição de excedente de energia, a potência extraída do painel pelo conversor Boost é maior que a requisitada pela carga de maneira que o conversor SEPIC fica desabilitado (sua potência é zerada) e o retificador não controlado passa a fazer o papel de um inversor enviando o excedente de energia a rede.

Através do controle do SEPIC é possível provar a divisão do processamento de potência requerido como ilustra a Fig. 16. Durante a operação normal, a parcela de potência processada pelo retificador não controlado é regulada em aproximadamente 60% com o sensoriamento da corrente do RNC e posteriormente passa a ser regulada em 100% já que nesse caso o conversor SEPIC estará desabilitado.

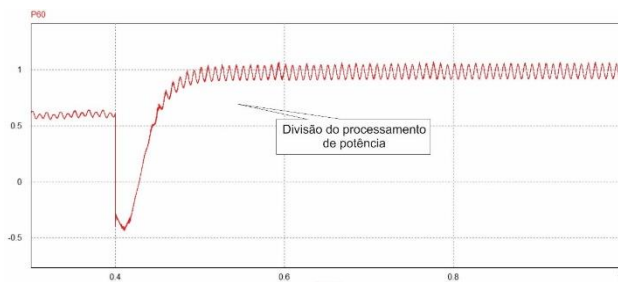


Fig. 16. Divisão do processamento de potência.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para validar as proposições deste trabalho, desenvolveu-se um protótipo mostrado na Fig. 17, que comprova parcialmente a teoria aqui apresentada. Devido a limitações de componentes, a criação do protótipo limitou-se ao projeto do Retificador Híbrido Monofásico somente para a operação normal. Com este protótipo, foi possível comprovar a eficácia do controle em termos de imposição de uma corrente senoidal em conformidade com a norma internacional IEC 61000-3-2 e a manutenção da tensão constante na carga. A implementação do controle foi realizada através do microprocessador TMS320F28335, da marca *Texas Instruments*.

O protótipo foi desenvolvido para uma potência de 1 kW, entretanto os ensaios experimentais foram realizados para uma potência média de aproximadamente 100W. Isso ocorreu basicamente por dois motivos: (1) pois os componentes possuem limitações de corrente; (2) por questões de segurança.

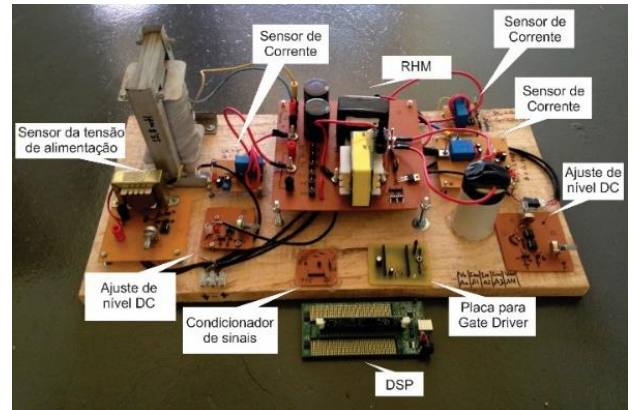


Fig. 17. Protótipo construído.

Na Fig. 18, tem-se a forma de onda da corrente de entrada do RHM. Assim como foi observado na simulação computacional, a forma de onda dessa corrente (que é composta pela soma da corrente de entrada do SEPIC e a corrente do RNC) é muito próxima da forma de onda senoidal, demonstrando a eficácia do controle em termos de imposição da corrente de entrada.

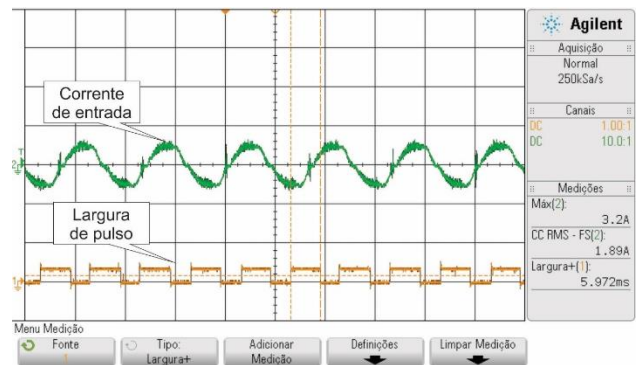


Fig. 18. Resultados para a corrente de entrada.

Ainda na Fig. 18, comprova-se que a estratégia de controle promoveu o processamento de potência esperado que era de 60%. Um dos objetivos do controle é estabelecer o cálculo do percentual do processamento de potência por parte do retificador não controlado. Esse percentual calculado é então dividido por 100 (de tal forma que o valor ficasse entre 0 e 1) e enviado para entrada de um bloco PWM com frequência da onda dente de serra igual a 100 Hz e amplitude igual a 1. Desta forma, toda vez que o percentual calculado apresentasse um valor menor que o valor da onda dente de serra do PWM, um nível alto de pulso era gerado na saída do PWM.

Assim, como o período da onda dente de serra era igual a 10 ms, a largura de pulso alta da saída PWM apresentava

aproximadamente 6 ms (5,972 ms), indicando que o compensador de potência realmente impôs que o conversor SEPIC processasse somente 40% da potência total fornecida à carga, e desta forma estabelecendo que o retificador não controlado processasse a maior parcela da potência total de saída (60%) garantindo uma maior robustez e rendimento da estrutura.

Dessa forma, analisando-se agora as componentes harmônicas presentes na forma de onda da corrente de entrada comparadas à norma IEC 61000-3-2, tem-se a Fig. 19.

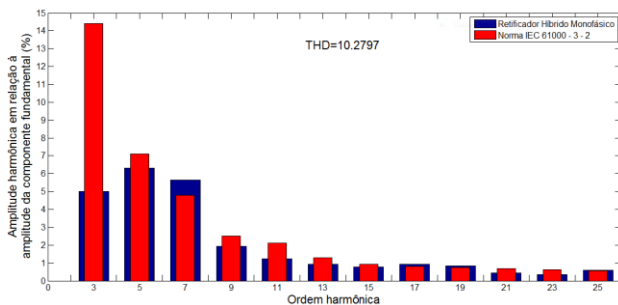


Fig. 19. THD da corrente de entrada.

Através da Fig. 19 nota-se que alguns componentes harmônicos não ficaram em conformidade com a norma IEC 61000-3-2. Isso se deve ao fato do RHM estar operando com carga bem abaixo da nominal e devido aos ruídos de chaveamento presentes nas aquisições. Entretanto, é possível observar que o conteúdo harmônico presente na corrente senoidal imposta foi reduzido drasticamente em relação ao conteúdo harmônico presente somente na corrente do retificador não controlado mostrado na Fig. 20, conforme é verificado pela Fig. 21.

Portanto, se o conversor híbrido operasse somente com o retificador não controlado, sem a utilização do conversor SEPIC para impor corrente senoidal da entrada, a corrente de entrada apresentaria somente a forma de onda das correntes típicas de retificadores não controlados em ponte completa, e consequentemente um nível elevado de conteúdo harmônico. Deste modo, o controle para imposição da corrente de entrada se mostrou muito eficaz, uma vez que o conteúdo harmônico da corrente foi reduzido de forma satisfatória.

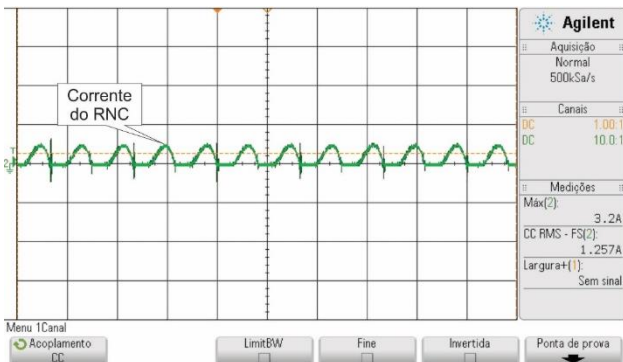


Fig. 20. Corrente do RNC.

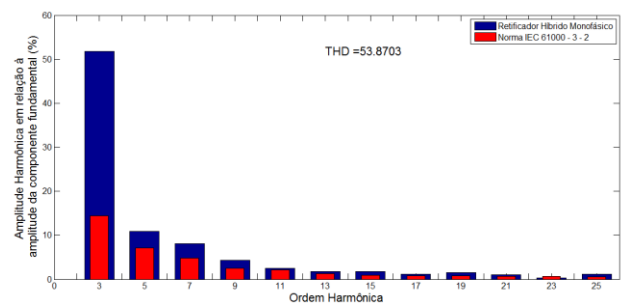


Fig. 21. THD da corrente do RNC.

VII. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta o projeto e simulação de um Retificador Híbrido Monofásico inserido em uma Microrede CC com capacidade de bidirecionalidade do fluxo de potência. Os resultados revelaram que o RHM atendeu a todas as suas propostas as quais são a imposição de corrente de entrada senoidal em conformidade com as normas IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 e IEEE 1547, o fornecimento de um barramento CC a partir da potência fornecida pela rede CA e a injeção de potência ativa na rede no caso de excedente de potência.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KAGAN, N., OLIVEIRA, C. C. B., ROBBIA, E. J., "Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", Editora Edgard Blucher, 1ª edição, São Paulo, 2009.
- [2] ZHAO, B., YU, Q., SUN, W. "Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bidirectional DC-DC Converter for Power Distribution in Microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.27, no.11, pp.4667-4680, Nov. 2012.
- [3] HATZIARGYRIOU, N., ASANO, H., IRAVANI, R., MARNAY, C. "Microgrids: An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects", IEEE Power & Energy Magazine, pp. 78-94, Julho/Agosto 2007.
- [4] LIMA, G. B. "Análise E Desenvolvimento De Um Novo Conversor CA-CC Híbrido Monofásico Com Controle Digital Baseado Em DSP". Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- [5] IEC 61000-3-2, "Part 3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current lower than 16A per phase)", International Electrotechnical Commission, second edition, 2000-08.
- [6] IEEE, IEEE Standard 1547 for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, New York, 2003.