

# RETIFICADOR TRIFÁSICO DE 12 PULSOS COM AUTOTRANSFORMADOR E CONVERSORES BOOST CASCATEADOS

Daniel T. S. Borges, Luiz C. G. Freitas

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT)

Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP)

Uberlândia, MG, Brasil 38400-902

E-mail: [lcgfreitas@yahoo.com.br](mailto:lcgfreitas@yahoo.com.br), [daniel Tobias.sb@gmail.com](mailto:daniel Tobias.sb@gmail.com).

**Resumo** – Este artigo apresenta o desenvolvimento de um retificador trifásico 12 pulsos utilizando um autotransformador com o propósito de promover a defasagem angular de corrente seguido de dois conversores BOOST cascadeados que irão elevar a tensão. A estratégia de controle utilizada foi o controle por histerese constante que tem a função de garantir a corrente de entrada do estágio elevador para que seja o mais constante possível. Neste artigo é descrito o princípio de funcionamento do retificador proposto assim como resultados obtidos por simulações computacionais utilizando o software *PSIM*<sup>®</sup>. Resultados experimentais a serem obtidos através da implementação de um protótipo que serão apresentados na versão final deste trabalho.

**Palavras-Chave** – BOOST, 12 Pulsos, Histerese Constante, *PSIM*<sup>®</sup>, Retificador.

## THREE-PHASE RECTIFIER 12 PULSES WITH AUTOTRANSFORMER AND BOOST CONVERTERS CASCADED

**Abstract** - This article presents the development of a three-phase rectifier 12 pulses using an autotransformer with the purpose of promoting the phase displacement of current followed by two cascaded BOOST converters that will raise the tension. The control strategy used is the constant hysteresis control that has the function of guaranteeing the input current of stage elevator is as constant as possible. This article describes the operation principle of the proposed rectifier as well as results obtained by computer simulation using the software *PSIM*<sup>®</sup>. Experimental results to be obtained through the implementation of a prototype that will be presented in the final version of this work.

**Keywords** –BOOST, 12 pulses, Constant Hysteresis, *PSIM*<sup>®</sup>, Rectifier.

## I. INTRODUÇÃO

À medida que a área de eletrônica de potência evolui científica e tecnologicamente, percebe-se que é cada vez maior o número de cargas elétricas que utilizam algum tipo de conversor eletrônico de potência, resultando na circulação de correntes não-senoidais pelos circuitos elétricos. Portanto, é comum o conceito de distorção harmônica de corrente devido à presença de cargas não lineares conectadas à rede de alimentação em corrente alternada (CA).[1]

A maior parte dos equipamentos que processam energia eletronicamente atuam através de uma fonte de alimentação CA, mas, sempre requer um estágio intermediário de conversão CA-CC através de retificadores ou conversores CA-CC. Visto a isto, devido a sua grande aplicabilidade industrial, o retificador trifásico na configuração Graetz é a fonte mais comum de problemas relacionados com a injeção de componentes harmônicos de corrente no sistema CA de alimentação. Desta maneira, a alimentação da carga é feita a partir da tensão contínua obtida na saída da ponte retificadora (barramento CC).

Em sistemas retificadores de elevadas potências, onde se utilizam estruturas trifásicas clássicas para se promover a redução da distorção harmônica da corrente de entrada e, conseqüentemente, obter-se elevado fator de potência, os retificadores de 12 pulsos e seus múltiplos têm se apresentado como sendo ótimas opções técnicas, visto que os mesmos garantem um bom desempenho do conjunto retificador, assim como robustez.

Um conversor 12 pulsos pode ser obtido a partir da ponte retificadora trifásica clássica como mostrado na figura 1 com associação em série das pontes retificadoras, porem esta não é a única forma podendo ser em paralelo como se vê na figura 2. É obtido um defasamento de 30° entre as tensões das pontes por efeito de transformador com primário em  $\Delta$  (delta) e secundários em  $\Delta$  e Y (estrela). [11]

O conversor de 12 pulsos com autotransformador, portanto não-isolado com conversores BOOST cascadeados dispensam a necessidade de transformadores de interfase sendo mostrado na figura 1. [9]



XI CEEL – ISSN 2178-8308

25 a 29 de novembro de 2013

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

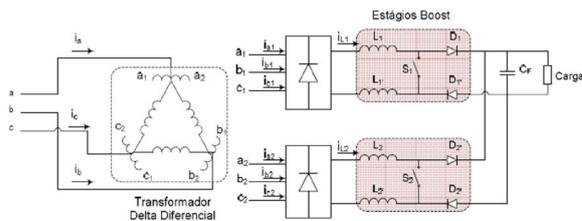


Figura 1 – Retificador 12 pulsos com Autotransformador e Conversores BOOST cascateados

Assim neste trabalho a pesquisa busca por meio do presente projeto desenvolver um retificador de doze pulsos com autotransformador e BOOST cascateado onde cada conversor CC-CC processará 50% da potência na carga.

## II. AUTOTRANSFORMADOR

Conforme apresentado até agora, para se obter correntes CA de entrada de múltiplos pulsos e, conseqüentemente, reduzida DHT(distorção harmônica de tensão) e elevado fator de potência, é necessário utilizar transformadores defasadores. Estes equipamentos devem ser projetados para suprir a potência ativa total entregue a carga fazendo com que o tamanho, o peso e o custo final dessas estruturas seja bastante considerável. Assim, a obtenção de retificadores multipulsos de tamanho, peso e custos reduzidos tem sido objeto de bastante interesse por parte de diversos pesquisadores que atuam na área.

Nos autotransformadores, os enrolamentos são conectados de maneira que os KVAs transmitidos para a carga através do acoplamento magnético são apenas uma pequena fração da potência total requerida. Portanto, obtém-se um transformador fisicamente menor, de custo reduzido e de maior eficiência quando comparado com transformadores convencionais, porém, perde-se o isolamento entre a carga e a rede CA.

Deve-se destacar que, nesses casos, a utilização de IPTs(transformadores de interfase) se torna imprescindível para garantir a correta operação do grupo retificador e, conseqüentemente, obter correntes CA de entrada com reduzida DHT.[10]

Se fosse utilizar um transformador no conversor CA-CC o seu objetivo seria prover o defasamento necessário e de adequar níveis de tensão. Contudo, ao se optar por uma conexão diferencial, outra vantagem é alcançada: este tipo de conexão permite que se obtenha múltiplos degraus na corrente drenada da rede elétrica. Desta maneira, a conexão diferencial opera também como um estágio passivo de correção de fator de potência.

## III. CONVERSOR BOOST PROPOSTO

O conversor *Boost* contém três relés auxiliares ( $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ) e este é apresentado na Figura 2. O relé  $K_1$  apresentado é responsável pelo acoplamento do circuito de potência à fonte de corrente contínua. O relé  $K_2$  e a resistência  $R_{PC}$  são os responsáveis pelo circuito de pré-carga do capacitor do *Boost* e o relé  $K_3$  é o responsável pelo acoplamento da carga na plataforma.

Por se tratar de uma plataforma didática há possibilidade de alterar o indutor e o capacitor do conversor Boost. Além dos relés auxiliares há presença de um fusível de proteção contra sobrecorrente.

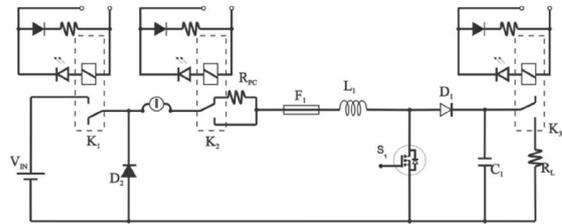


Fig. 2 - Conversor Boost.

Uma das aplicações para o boost na topologia é que com uma malha de controle da tensão de saída, pode-se regular a mesma alterando-se a razão cíclica da chave semicondutora do estágio CC-CC;

O princípio de operação do Boost é apresentado em etapas através da sequência de figuras a seguir. As linhas claras no circuito indicam as partes desativadas, e as linhas escuras ilustram as partes ativadas e indicam a passagem de corrente elétrica.

## IV. PRINCIPIO DE OPERAÇÃO

Com base no levantamento teórico foi possível caracterizar análise do funcionamento do conversor Boost proposto em sete etapas, para tanto, torna-se necessário fazer as seguintes considerações:

- A tensão de entrada instantânea em um curto período de tempo, que será igual ao período de chaveamento, pode ser considerada constante e igual à  $V_e$ ;
- Os elementos condutores são considerados ideais;
- Não existem perdas nos elementos ressonantes ( $L_R$  e  $C_R$ );
- O filtro de saída é considerado suficiente para que não haja nenhuma variação (“ripple”) na tensão de saída, ou seja, ela permanece constante no período de chaveamento;
- O capacitor ressonante ( $C_R$ ) está carregado com a tensão de saída ( $V_o$ ), portanto  $S_1$  esta aberta;
- Existe corrente fluindo no diodo  $D_o$ .

### A. Etapas de Funcionamento

Na 1ª etapa, o circuito de potência (*Boost*) está desalimentado e o circuito de controle está desligado, como mostra a Figura 3.

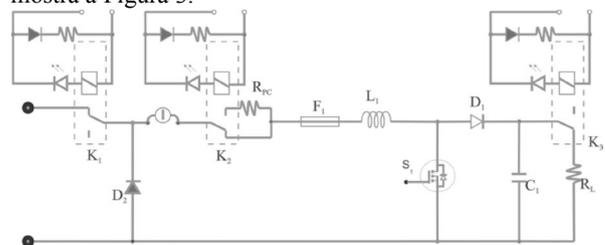


Fig. 3 - Circuito de potência e de controle desenergizados (1ª etapa).

Na segunda etapa, conforme ilustra a Figura 4, o circuito de potência ainda se encontra desenergizado, aguardando ação de circuito de controle para sua operação. Observa-se que todos os relés inicialmente estão energizados, devido à característica do DSP em manter suas saídas em nível alto no seu processo de inicialização. Logo, como procedimento para utilização da plataforma, deve-se primeiramente realizar a alimentação do circuito de controle e depois o circuito de potência.

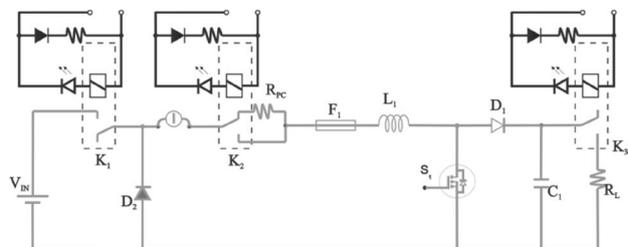


Fig. 4 - Circuito de potência desativado e circuito de controle em operação (2ª etapa).

A partir da terceira etapa mostrada na Figura 5, a lógica de acionamento entra em funcionamento. A corrente provinda da fonte para carregamento do capacitor de saída é limitada por uma resistência de pré-carga.

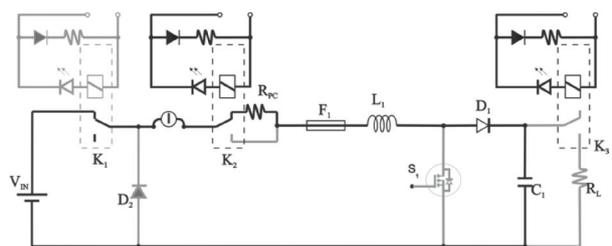


Fig. 5 - Circuito de potência alimentado e circuito de controle em operação (3ª etapa).

Após a terceira etapa, a carga é acoplada ao circuito, conforme ilustra a Figura 6.

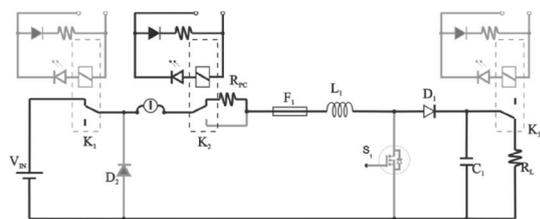


Fig. 6 - Acoplamento da carga (4ª etapa).

Após o capacitor atingir a tensão da fonte de entrada, a quinta etapa é inicializada, conforme apresenta a Figura 7. Nesta etapa o circuito de pré-carga é removido e é iniciada a operação do conversor *Boost* de acordo com a estratégia de controle implementada.

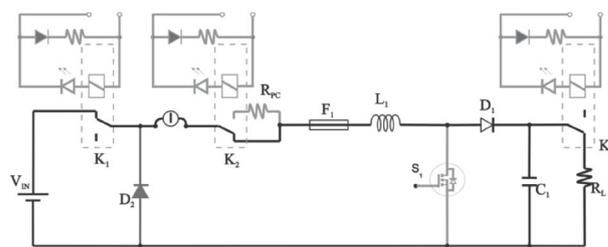


Fig. 7- Remoção da pré-carga (5ª etapa).

Quando o mosfet  $S_1$  é fechado, a corrente no indutor aumenta e a energia é armazenada no indutor em forma de campo magnético, conforme ilustrado na Figura 8.

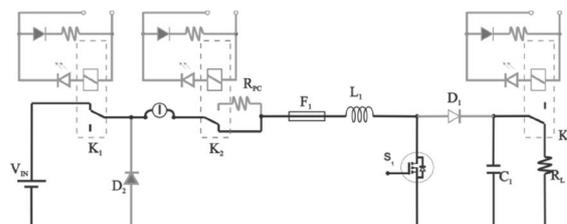


Fig. 8 - Chave fechada (operação normal).

Assim que  $S_1$  é aberto, a energia armazenada no indutor é entregue à carga. O indutor inverte a polaridade em seus terminais e passa a descarregar a sua energia sobre a carga, conforme Figura 9.

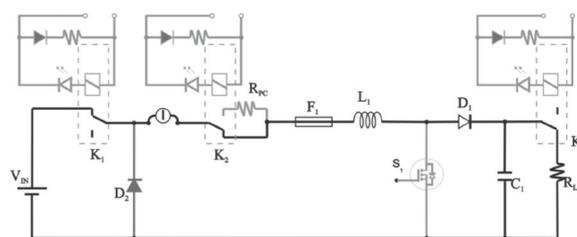


Fig. 9 - Chave aberta (operação normal).

Através deste ciclo de chaveamento é possível controlar a tensão de saída do *Boost*.

## B. Proteção da Plataforma

Caso haja uma sobrecarga de 10% da corrente de entrada na plataforma, os pulsos no gatilho do mosfet  $S_1$  são retirados, igualmente a ilustração da figura 9. Essa proteção é implementada via software.

Se a corrente continuar aumentando, devido algum curto na plataforma ou falha na chave, os relés  $K_1$  e  $K_2$  são acionados (figura 10), desacoplando a plataforma da fonte CC e descarregando o indutor.

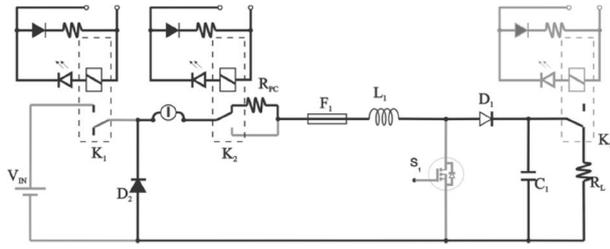


Fig. 10- Interrupção 2: Sobrecarga Contínua.

Após a interrupção do fluxo de corrente proveniente da fonte de alimentação, o relé  $K_3$  é acionado (Figura 11), levando o circuito de potência e controle a aguardar ação de reinicialização do usuário.

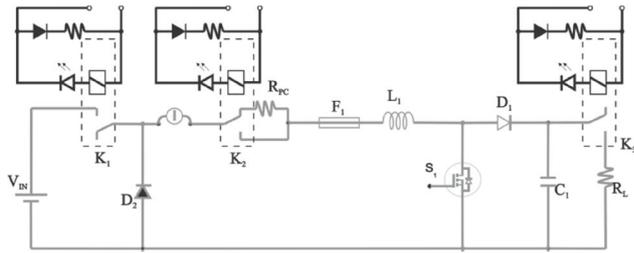


Fig. 11- Interrupção 2: proteção finalizada.

## V. TECNICA DE CONTROLE IMPLEMENTADA

A técnica de controle utilizada se baseia no controle por histerese constante onde sua função é garantir que a corrente na entrada do estágio elevador seja a mais constante possível. A figura 12 ilustra a técnica de controle por histerese constante. Este termo vem do fato de que a largura da banda de histerese ( $\Delta I_i$ ) é constante. Através desta representação do circuito de controle, observa-se que o conversor irá trabalhar sempre no Modo de Condução Contínua. Isto traz algumas vantagens como a independência do ganho de tensão em relação à carga.

No estágio elevador visto na figura 12, um sensor de corrente do tipo Efeito Hall é usado para realizar a transdução da corrente através do indutor em um sinal de tensão proporcional a ela. Este sinal é comparado com um sinal de referência ( $V_{ref}$ ), que define o valor médio da corrente a ser estabelecida na entrada do estágio CC-CC. A largura da banda de histerese ( $\Delta V_h$ ) é ajustada de acordo com os elementos  $R_p$ ,  $R_f$  e a tensão  $V_{CC}$ , que alimenta o comparador por histerese. A equação (1) permite o cálculo de  $\Delta V_h$ .

$$\Delta V_h = \frac{R_p}{R_p + R_f} \cdot V_{CC} \quad (1)$$

Enquanto a corrente através do indutor for inferior ao valor máximo ajustado, a chave ativa permanece em condução. Ao se atingir o valor máximo, a chave é comandada para o bloqueio, de forma que a corrente no indutor decresça. Desta forma, se o comparador por histerese for preciso e seus tempos de comparação forem pequenos o suficiente, a chave deverá operar em frequências da ordem de

50 kHz. Assim, com o correto ajuste da largura da banda de histerese, é possível que a corrente na entrada do estágio elevador seja algo muito próximo de uma constante, a menos, é claro, de uma oscilação de alta frequência.

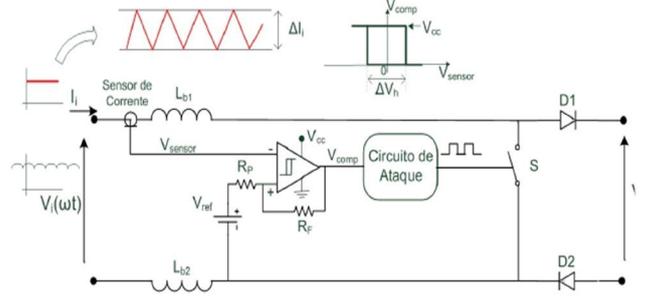


Figura 12 – Estratégia de controle por Histerese Constante.

O circuito da figura 12 indica ainda que a tensão que alimenta o estágio elevador, embora contínua, contém os seis pulsos característicos da retificação. Desta maneira a razão cíclica, dada por (2) para o estágio elevador de tensão, é alterada de acordo com o ângulo de comutação ( $\omega t$ ), visto que, também de acordo com este ângulo, o valor instantâneo da tensão contínua de alimentação se altera. [5]

$$D(\omega t) = 1 - \frac{V_i(\omega t)}{V_0} \quad (2)$$

Para  $\omega t = 90^\circ$ , a tensão retificada encontra-se em seu pico ( $V_{imáx}$ ), correspondente ao pico da tensão de fase que alimenta a ponte retificadora. Conforme (2), se  $V_i(\omega t)$  é máximo,  $D(\omega t)$  atinge o valor mínimo ( $D_{min}$ ).

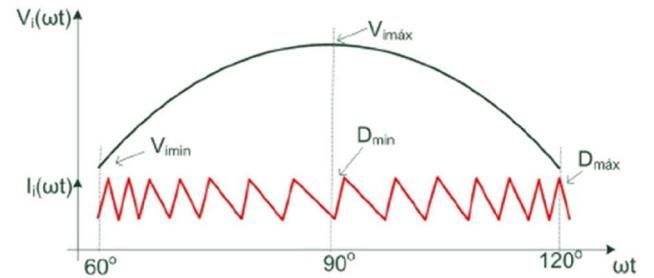


Figura 13 – Variação da razão cíclica  $V_i(\omega t)$ .

Para  $\omega t = 60^\circ$  ou  $\omega t = 120^\circ$ , por outro lado,  $V_i(\omega t)$  assume o valor mínimo ( $V_{imin}$ ) e desta maneira a razão cíclica apresenta-se máxima ( $D_{máx}$ ). Os valores máximo e mínimo de  $D(\omega t)$ , obviamente, dependerão dos parâmetros do circuito CC-CC, como a indutância e oscilação de corrente de entrada admissível. A figura 13, ilustra a variação de  $D(\omega t)$  com o ângulo  $\omega t$ , sendo verificada a modulação da corrente  $I_i(\omega t)$  e tensão  $V_i(\omega t)$  com relação ao ângulo  $\omega t$ . [7]

## VI. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Com as especificações de projeto e com os parâmetros dos elementos do conversor proposto, implementou-se o circuito no *PSIM*<sup>®</sup>.

Na figura 14 é apresentado o circuito do retificador 12 pulsos com autotransformador e boost cascateado, sendo que o conversor boost foi colocado na forma de subcircuito e logo abaixo na figura 15 foi colocado o conversor boost com o controle em malha fechada implementada. [3]

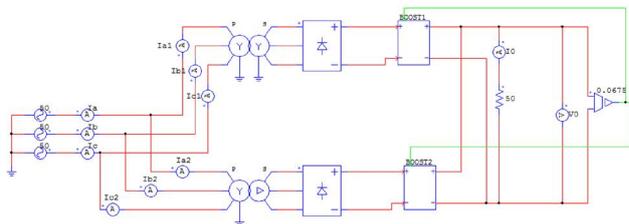


Figura 14 - Retificador 12 pulsos com Autotransformador e Boost cascateado.

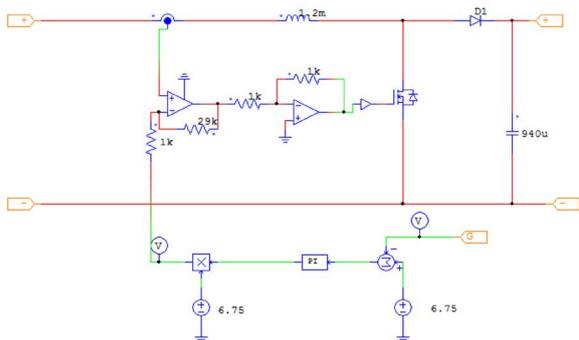


Figura 15 - Subcircuito do conversor Boost com o controle por histerese constante em malha fechada.

Na Figura 16 é observada a tensão e a corrente de saída.

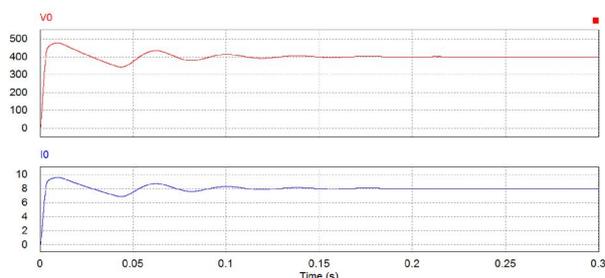


Figura. 16 - Primeiro Gráfico: Tensão de saída  $V_0$ . Segundo Gráfico: Corrente de saída  $I_0$ .

Na Figura 16 no primeiro gráfico é observado a corrente no lado Y-Y afim de verificar os 6 pulsos. No segundo gráfico é observado a corrente no lado Y- $\Delta$  que também tem 6 pulsos porem defasada de  $30^\circ$ .

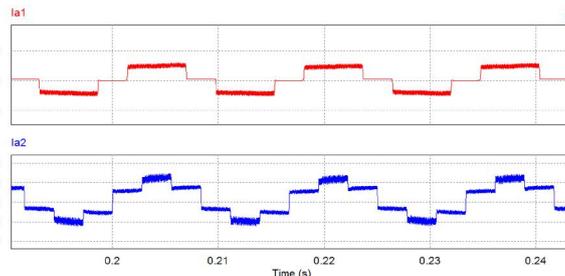


Figura. 16 - Primeiro gráfico: corrente de entrada Y-Y, corrente de entrada Y- $\Delta$ .

Na Figura 17 tem-se a soma das duas correntes acima originando a corrente de 12 pulsos, além de mostrar as correntes na entrada do gerador trifásico.

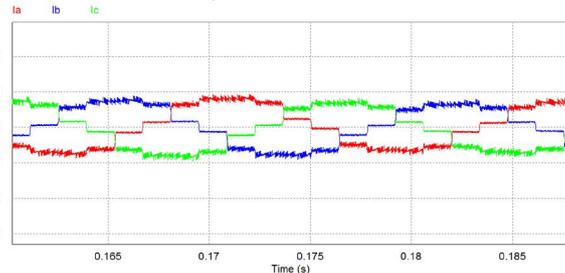


Figura 17 – Correntes de entrada Ia, Ib e Ic.

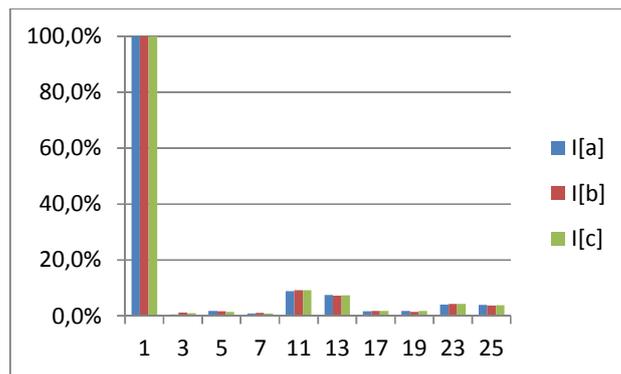


Figura 18 – Espectro harmônico de corrente

A figura 18 mostra o espectro harmônico das correntes de entrada, como esperado as ordens harmônicas mais significativas depois da fundamental são as 11ª e a 13ª harmônica mostrada a partir da seguinte equação (3):[8]

$$N = k(12 \pm 1) \quad K=1,2,3\dots$$

Onde:

- N = número da harmônica significativa.
- k = constante.

Foi calculado pelo software *PSIM*®, as distorções harmônicas total de cada corrente de entrada em que:[2]

$$I[a]=18,83\% \quad I[b]=17,25\% \quad I[c]=16,57\%$$

Como foi visto apesar de termos algumas distorções tivemos resultados computacionais satisfatórios e essas distorções se deve ao controle implementado.

## VII. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta o desenvolvimento e análise de uma estrutura topológica de retificador trifásico de 12 pulsos com autotransformador e dois conversores Boost cascadeados utilizando os conversores em cascata garante a regulação da tensão na saída e por ser 12 pulsos possui um baixo THD.

O controle proposto utiliza a técnica de controle por histerese constante onde irá garantir que a corrente de entrada seja mais constante possível, a partir da tensão de entrada que apesar de ser contínua possui 6 pulsos e sendo assim a razão cíclica mudará conforme o ângulo de comutação muda fazendo com que o chaveamento seja de tal forma que garanta a corrente mais constante possível.

O conversor proposto tem as mesmas características operacionais que retificadores 12 pulsos convencionais, porém possui vantagens tais como, reduzido tamanho e peso, maior rendimento global, eficiência operacional com pequeno conteúdo harmônico na corrente. Resultados experimentais a serem obtidos através da implementação desse protótipo serão apresentados na versão final deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Resende, J. W.; Samesima, M. I.; Gomes, D. B. et al, “Avaliação das perdas técnicas em sistemas elétricos de distribuição suprindo cargas não-lineares”, V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2003.
- [2] Paice, D. A. e Spreadbury, R. J., “Calculating and Controlling Harmonics caused by Power Converters”, Anais do IEEE IAS’89, 1989, pp. 456-463.
- [3] Ray, W. F.; Davis, R. M. e Weatherhogg, I. D., “The Three-Phase Bridge Rectifier with Capacitive Load”, Third International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drivers 1988, pp. 153156.
- [4] Jeong, S e Choi, J., *Line Current Characteristics of Three-phase Uncontrolled Rectifiers Under Line Voltage Unbalance Condition* - IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, nº 6, November 2002, pp. 935-945.
- [5] Redl, R. e Erisman, B. P., “Reducing Distortion in Peak-Current-Controlled Boost Power-Factor Correctors”, Anais do 9o IEEE APEC, 1994, pp.576-583.
- [6] Maksimovic, D., “Design of the Clamped-Current High-Power-Factor Boost Rectifier”, anais do 9o IEEE APEC, 1994, pp.584–590.
- [7] Boroyevich D. e Hiti, S., “Three-phase PWM Converter: Modeling and Control Design”, IEEE APEC Seminar 9, 1999.
- [8] Paice, D.A., *Power Electronic Converter Harmonic Multipulse Methods for Clean Power*, Wiley, 2001 ISBN 0-7803-5394-3.
- [9] Rendusara, D.A.; Jouanne, A.V.; Enjeti, P.N.; and Paice, D.A., Design Considerations for 12-Pulse Diode Rectifier System Operating under Voltage Unbalance and Pre-Existing Voltage Distortion with Some Corrective Measures, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, nº 6, November/December 1996, pp. 1293-1303;
- [10] Freitas L. C. G.; Simões M. G.; Canesin C. A.; de Freitas L. C. *Performance evaluation of a novel hybrid multipulse rectifier for utility interface of Power electronics converters*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.54, nº6, pp. 3030-3041, Dezembro 2007;
- [11] Freitas L. C. G.; Coelho E. A. A.; Simões M. G.; Canesin C. A.; de Freitas L. C. *Um novo retificador trifásico híbrido multipulsos com elevado fator de potência*. Revista Eletrônica de Potência, 10(2): pp. 17–24, Novembro 2005;