

## **ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE KITs PARA EXPERIMENTOS DIDÁTICOS EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA – MÓDULOS DE RETIFICADORES NÃO CONTROLADOS**

JOSÉ ANEILSON DA SILVA JÚNIOR<sup>1</sup>; JOSÉ IRINEU FERREIRA JÚNIOR<sup>2</sup>; GREGORY ARTHUR DE ALMEIDA CARLOS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduando do curso de Sistemas Elétricos, IFAL, Campus Palmeira dos Índios, jose\_aneilson@hotmail.com;

<sup>2</sup>Graduando do curso de Sistemas Elétricos, IFAL, Campus Palmeira dos Índios, irineujuniorif@gmail.com;

<sup>3</sup>Professor Doutor do curso Graduação de Tecnologia em Sistemas Elétricos, Campus Palmeira dos Índios, gregory.carlos@ifalpalmeira.edu.br

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018  
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

**RESUMO:** O uso de recursos laboratoriais é de fundamental importância no ensino de disciplinas da área técnica. Este artigo visa apresentar estudos sobre desenvolvimento de um kit didático voltado a eletrônica de potência abordando o estudo de retificadores não controlados, com baixo custo se comparado aos encontrados no mercado atual, e com grande potencial em auxiliar a aprendizagem dos alunos, devido a sua praticidade e a grande quantidade de montagens possíveis de serem executadas, em sala de aula. O kit é composto por módulos de retificador a diodos de potência, ao qual o aluno poderá se desenvolver e estreitar as relações entre a teoria e a prática propriamente dita.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eletrônica de potência, kit didático, educação em módulos retificadores.

### **STUDY AND DEVELOPMENT OF KITs FOR DIDACTIC EXPERIMENTS IN POWER ELECTRONICS - NON-CONTROLLED RECTIFIER MODULES**

**ABSTRACT:** The use of laboratory resources is of fundamental importance in the teaching of technical subjects. This article aims to present a didactic kit focused on power electronics addressing the study of non-controlled rectifiers, with low cost compared to those found in the current market, and with great potential to help students learn, due to its practicality and the large number of assemblies possible to be carried out in the classroom. The kit consists in rectifier modules to power, to which the student can develop and narrow the relations between theory and practice itself.

**KEYWORDS:** Power electronics, educational kit, education in rectifier modules.

### **INTRODUÇÃO**

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. Assim, retificadores trifásicos controlados e não controlados possuem significativa importância em várias aplicações industriais por garantirem um bom desempenho do conjunto retificador, assim como robustez (BORGES & FREITAS, UFU).

Os retificadores trifásicos controlados a diodo são utilizados principalmente em aplicações onde são necessárias baixas flutuações de tensão e maior potência DC. Algumas das suas aplicações são: Processos eletroquímicos; Circuitos (*drivers*) de acionamento de motores; Fontes DC ajustáveis; Sistemas HVDC (Alta voltagem em corrente contínua).

Um dos tipos bem difundidos de conversores trifásicos CA/CC são os do tipo de 6 e 12 pulsos por suas aplicações diversas e apresentar alta eficiência e baixa ondulação na tensão de saída.

Tendo em vista o uso desses módulos para fins educativos, é apresentada neste trabalho um estudo para o desenvolvimento de um kit para experimentos didáticos em eletrônica de potência através do uso de módulos de retificadores não controlados. O kit visa contribuir para o processo de ensino-aprendizagem no laboratório.

Na sala de aula, a grande dificuldade do docente é possivelmente criar relação do conteúdo a ser passado com o entendimento do aluno, de forma a obter uma maior compreensão do mesmo. Segundo Myriam Krasilchik (1996), é mais fácil ocorrer à concretização do aprendizado no aluno quando às experiências educativas assemelham-se às futuras situações em que os alunos deverão aplicar seus conhecimentos.

Assim, o objetivo geral desse artigo é descrever e desenvolver um módulo retificador a diodo de 6 e 12 pulsos a fim de conhecer seu princípio de funcionamento, suas utilidades e aplicações práticas em sistemas industriais e afins.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento dos módulos retificadores de 6 e 12 pulsos proposto, foram adotados dois procedimentos: a construção e simulação do circuito elétrico no software PSIM DEMO (versão gratuita disponível) dos retificadores de 6 e 12 pulsos; e em seguida foi realizada a montagem prática dos mesmos seguindo o modelo desenvolvido.

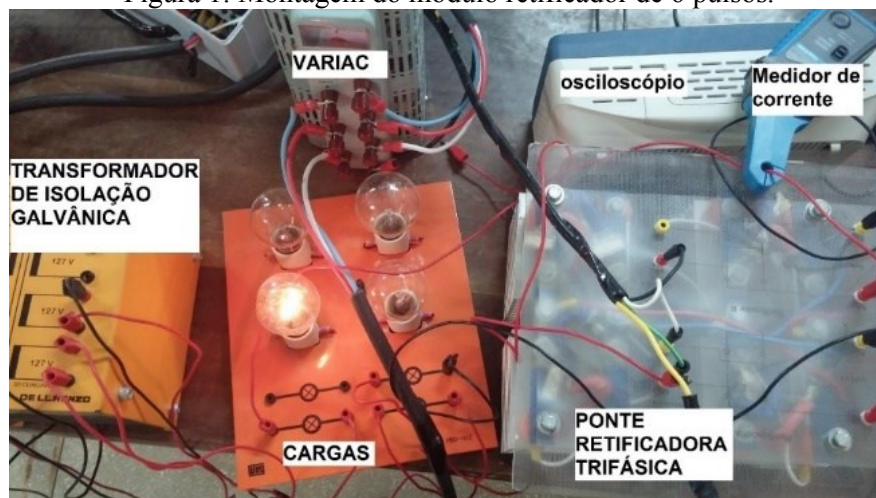
Os circuitos desenvolvidos no PSIM são os mostrados nas figuras 2 e 5, com suas respectivas formas de onda nas figuras 4 e 6.

A montagem do módulo retificador de 6 e 12 pulsos foi realizada no laboratório de Automação Industrial do IFAL campus Palmeira dos Índios, onde foram obtidos todos os materiais necessários para a realização do experimento, tais como: Fonte de alimentação trifásica; Variac para ajuste da tensão; Transformadores trifásicos com possibilidade de configurações em  $\Delta$ -Y e Y-( $\Delta$ -Y); Duas pontes retificadoras trifásicas a diodos não controlados; Osciloscópio Digital; Multímetro digital; Lâmpada incandescente para a simulação de uma carga resistiva.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados, de forma preliminar, alguns resultados experimentais acerca das principais características sobre retificadores não-controlados. A primeira montagem é de um retificador de 6 pulsos.

Figura 1: Montagem do módulo retificador de 6 pulsos.

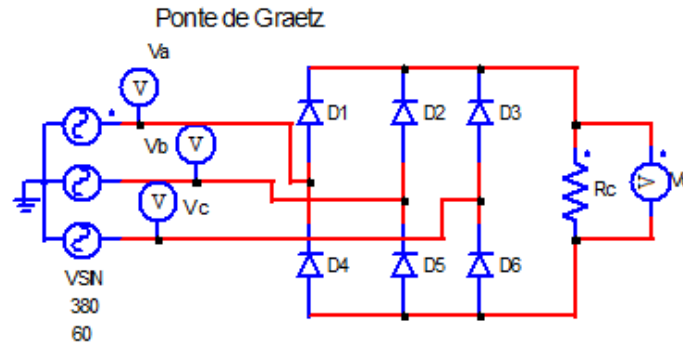


Nessa montagem, foi utilizado um Variac para se ter o controle da amplitude da tensão injetada no retificador, prevenindo contra maiores riscos, como sobretensões. Uma ponte trifásica contendo 6

diodos de potência. E na saída foi ligada uma carga composta por lâmpadas incandescentes. Para a medição do sinal de tensão e corrente do módulo foi usado um osciloscópio digital, este foi ligado a um transformador de isolamento galvânica – que tem a função de isolar equipamentos ligados no secundário contra possíveis problemas advindos pelo neutro da rede elétrica.

O circuito cuja montagem foi realizada é o mesmo da Figura 2 a seguir, que não utiliza transformador. O módulo foi alimentado com tensão trifásica, frequência 60Hz e amplitude controlada pelo variac.

Figura 2: Diagrama do retificador de 6 pulsos sem transformador.



Também conhecido como retificador em ponte ou retificador de Graetz, no retificador de 6 pulsos a carga é conectada diretamente aos terminais do retificador (KAISER, 2009).

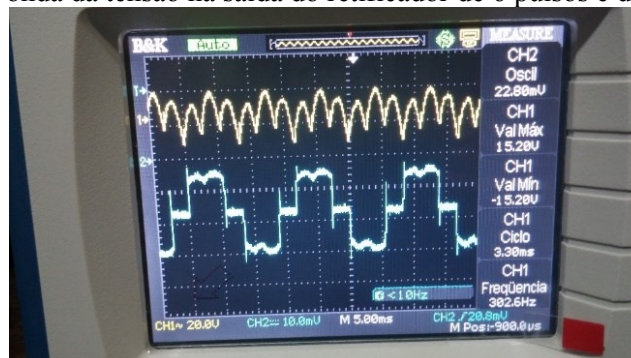
$$V_o(wt) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_{rms} \cdot \cos(wt) \quad (1)$$

Onde,  $V_{rms}$  é o valor eficaz da fonte de alimentação. Assim,

$$V_{o_{med}} = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{rms} \cdot \cos(wt) d(wt) \Rightarrow V_{o_{med}} = 2,34 \cdot V_{rms} \quad (2)$$

A tensão na saída do retificador e a corrente na entrada foram medidos pelo osciloscópio, como mostra a Figura 3

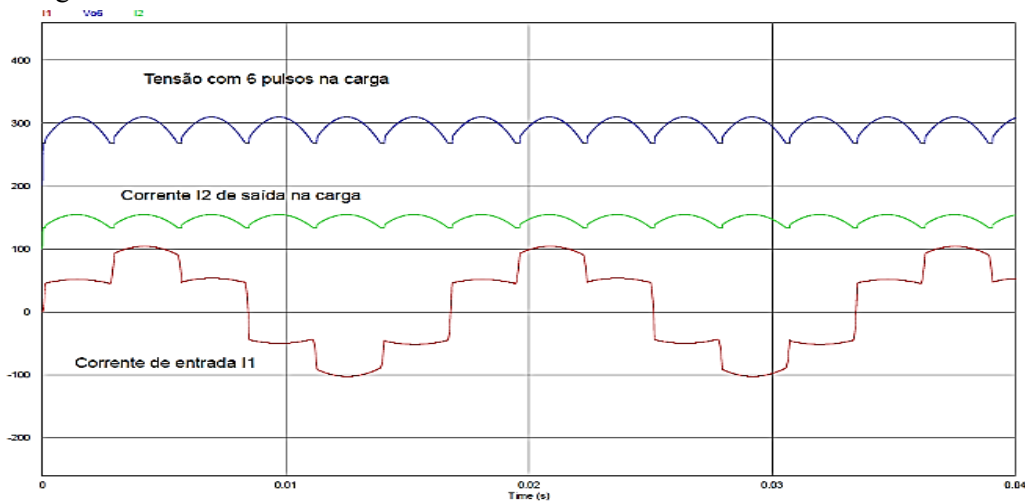
Figura 3: Forma de onda da tensão na saída do retificador de 6 pulsos e da corrente de entrada.



A forma de onda da tensão, mostrada no osciloscópio, é pulsante e o circuito gera 6 pulsos. A forma de onda da corrente é constituída por componentes harmônicas, havendo assim uma DHT (Distorção Harmônica Total) moderada que caracteriza um problema na qualidade de energia elétrica de uma rede, quando se utilizam retificadores não-controlados.

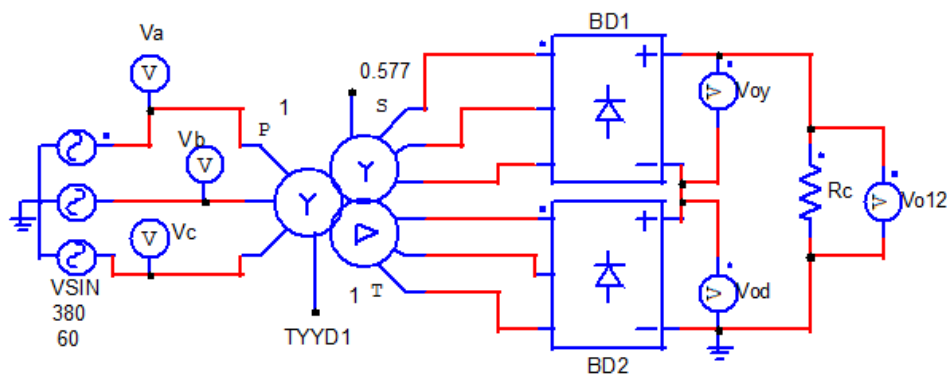
Para fins de comparação, temos na Figura 4 as formas de onda para a tensão e a corrente na saída, bem como a corrente de entrada simulada no PSIM. Como pode-se observar, a onda da corrente de entrada possui 6 pulsos como esperado.

Figura 4: Forma de onda da tensão na saída do retificador e da corrente de entrada.



Nesta versão preliminar, o ensaio com o módulo retificador de 12 pulsos ainda não foi finalizado. Todavia, é importante avaliar pelo menos a nível de simulação como se comporta a corrente de entrada bem como a tensão e corrente de saída em simulação no computador. Então, a seguir é apresentado o circuito de um retificador de 12 pulsos numa associação série, normalmente empregada em situações em que se deseja uma tensão CC de saída elevada, que não poderia ser obtida com um retificador único. Tipicamente a aplicação da associação em série de retificadores é na transmissão de energia em corrente contínua, em alta tensão (HVDC), como é o caso da linha CC que conecta Itaipu a São Roque (SP), trazendo a energia comprada do Paraguai (originalmente em 50 Hz).

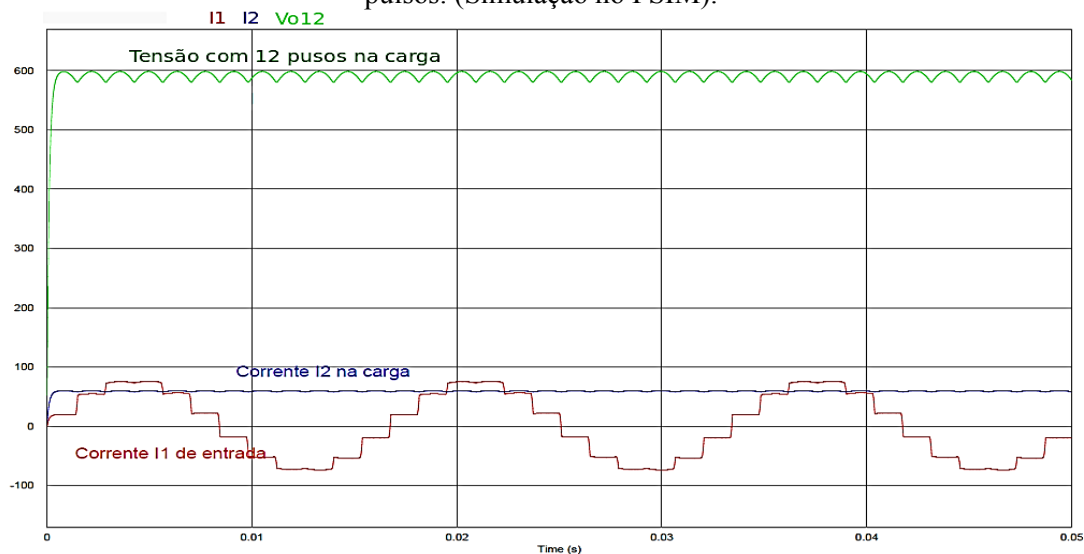
Figura 5: Diagrama de ligação do módulo retificador de 12 pulsos na configuração Y-(Y- $\Delta$ ) com os retificadores BD1 e BD2 em série.



No circuito da Figura 5, a alimentação é trifásica de 380 V (tensão de linha) e 60 Hz, a relação de espiras do transformador Y-( $\Delta$ -Y) é de 1:1 (Y- $\Delta$ ) e  $1:\sqrt{3}$  (Y-Y), Voy, Vod e Vo12 são os voltmetros. No circuito série, a tensão CC total apresenta uma ondulação em 720 Hz (por conta dos 12 pulsos) e uma variação pico a pico de apenas 3% do valor CC. Aqui também, uma eventual filtragem seria facilitada pela frequência elevada e pela pequena amplitude das variações.

Assim, na Figura 6, tem-se uma simulação realizada no PSIM.

Figura 6: Forma de onda da corrente de entrada e da tensão e corrente de saída do retificador de 12 pulsos. (Simulação no PSIM).



Neste exemplo, a corrente de entrada se mostra mais adequada em relação ao circuito retificador de 6 pulsos, por apresentar um comportamento com 12 pulsos, o que é vantajoso porque terá uma DHT menor e menos harmônicas indesejáveis na rede, melhorando assim a qualidade de energia elétrica na distribuição.

## CONCLUSÃO

A simulação dos circuitos retificadores de 6 e 12 pulsos, através do software PSIM DEMO, foi uma etapa muito importante para a sua compreensão e construção prática em laboratório. Através das simulações foi possível perceber qual o nível de tensão na carga, bem como identificar a amplitude das tensões na saída de cada retificador, as formas de onda para as diferentes configurações da ligação do transformador:  $\Delta$ -Y,  $\Delta$  - ( $\Delta$ -Y), Y - (Y- $\Delta$ ).

Os resultados obtidos em prática, através da construção e operação do módulo retificador de 6 pulsos, comprovaram em partes os resultados obtidos em simulação pelo software PSIM. No entanto, algumas divergências puderam ser notadas, como por exemplo uma grande ondulação de tensão na saída do retificador, enquanto na simulação os efeitos foram bem menores. Entretanto, fica claro que os módulos retificadores não controlados com mais níveis e mais pulsos se mostram os mais eficientes para a alimentação de cargas de corrente contínua e possuem ampla aplicação em eletrônica de potência, como na distribuição HVDC.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem inicialmente a antiga empresa Intercement (fábrica de cimentos) pela doação dos diodos de potência para construção dos primeiros módulos de retificadores bem como ao CNPq, FAPAL pela concessão de bolsa de pesquisa ao primeiro autor, auxílio financeiro para a pesquisa. Adicionalmente agradecem ao IFAL pela ajuda de custos para participação no evento.

## REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 6. ed. Florianópolis Ed. do Autor, 2006. 315 p.

BORGONOVO, Deivis. *Análise Modelagem e Controle de Retificadores PWM Trifásicos*. 2005. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

KAISER, W. **PEA2502 laboratório de eletrônica de potência: Retificadores não controlados de dois caminhos**. 02/2009.