



Associação Propagadora Esdeva  
Centro Universitário UniAcademia  
Curso de Engenharia Elétrica  
Trabalho de Iniciação Científica – Artigo

## ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE PRÁTICAS EXPERIMENTAIS DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Pedro H. S.Coelli<sup>1</sup>, Sheilla Samuel<sup>2</sup>, Anapaula Guimarães<sup>3</sup>, Krislene Badico<sup>4</sup>,  
Fernando J. Nogueira<sup>5</sup>.

*Linha de pesquisa: Eletrônica de Potência*

### RESUMO

Esse artigo trata da análise teórico-prática de um experimento da bancada de eletrônica de potência presente no laboratório do curso de engenharia elétrica do UniAcademia. Inicialmente, é realizada uma descrição histórica da invenção dos semicondutores de potência, tais como: Diodos Retificadores, SCRs, TBJs, TRIACs, GTOs, MOSFETs e IGBTs. Foi realizada uma descrição do painel utilizado para a execução da prática proposta, suas principais aplicações, bem como os principais componentes utilizados nesse trabalho. A prática proposta para o estudo foi a Experimento Nº 5A, onde é realizada a montagem de um retificador não controlado com carga puramente resistiva, e posteriormente com a inserção de um filtro capacitivo na saída. O objetivo do trabalho é aplicar os conhecimentos adquiridos através das disciplinas de Fundamentos de Eletrônica de Potência, aplicando a modelagem matemática do circuito e analisando as principais formas de onda desse circuito. A partir de simulações computacionais, serão feitas comparações dos valores obtidos pelos cálculos da modelagem teórica, com os obtidos por simulação pelo software PSIM.

**Palavras-chave:** Eletrônica de potência, Conversor AC-DC, Diodo retificador, Retificador de onda completa em Ponte.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica, bolsista, e-mail: pedrocoelli@hotmail.com

[2] Graduando em Engenharia Elétrica, voluntário, e-mail: sheillacsamuel@hotmail.com

[3] Graduando em Engenharia Elétrica, voluntário, e-mail: anpacguimaraes@gmail.com

[4] Graduando em Engenharia Elétrica, voluntário, e-mail: krislenebadico@yahoo.com.br

[5] Professor, orientador, e-mail: fernandonogueira@uniacademia.edu.br

## 1. INTRODUÇÃO

A primeira revolução da eletrônica ocorreu no ano de 1948, quando o primeiro transistor de silício foi desenvolvido por John Bardeen e Walter House Brittain. Posteriormente, em 1956 é criado o primeiro transistor PNP, nomeado de SCR (do inglês Silicon controlled rectifier – Retificador controlado de silício), também conhecido como Tiristor. Esse dispositivo foi lançado comercialmente no ano de 1958, e representou o início da era da eletrônica de potência. Anos mais tarde, com o estudo e desenvolvimento da tecnologia relacionada a semicondutores, foram criados os IGBTs, MOSFETs, GTOs, dentre outros dispositivos.

A eletrônica de potência é a ciência que estuda o desenvolvimento e dimensionamento de conversores de energia elétrica como: inversores de frequência, circuitos retificadores, conversores CC-CC e CA-CA, buscando mais eficiência e qualidade na transformação de energia elétrica, reduzindo as perdas na conversão de energia. Sua principal finalidade é controlar e processar o fluxo de energia elétrica, através de dispositivos semicondutores (diodos, transistores, etc.) operando como chave (On/Off), para realizar o controle do fluxo de energia e conversão das mais diversas formas de onda de tensão e corrente entre fonte e a carga. Os principais dispositivos implementados a chaves semicondutoras são: Diodos retificadores, transistores bipolares de junção (TBJ), SCRs, Triacs, GTOs, MOSFETs e IGBTs.

Existe uma vasta aplicabilidade da eletrônica de potência, sendo elas, fontes chaveadas, controle de motores CC e CA, alimentação de emergência, carregadores de bateria, transmissão de energia, reatores eletrônicos, filtros ativos, compensadores, processadores de energia alternativa, iluminação dentre outras aplicações diversas.

Dentre as diversas aplicações, a DeLorenzo, montou um painel de ensaio para o estudo dos tipos de circuitos atribuídos a eletrônica de potência. O painel DLB DCA BR4 desenvolvido para práticas e experimentos laboratoriais de eletrônica de potência, possui uma gama de dispositivos semicondutores para auxiliar na montagem de circuitos como ponte retificadora, ponte com SCR, circuito chaveados dentre outras práticas.

No referencial teórico, será descrito mais sobre a bancada de ensaio da empresa De Lorenzo, seus componentes e abrangência de práticas, uma descrição

da prática: Experimento N° 5A, para o estudo e uma revisão sobre os semicondutores utilizados na prática. A metodologia discriminará as formulas e cálculos feitos para realização e modelagem dos circuitos. Em resultados e discussão, será realizada a análise de resultados e uma simulação do experimento proposto utilizando PSIM.

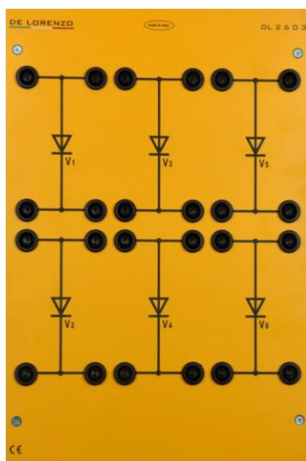
## 2. REFERENCIAL TEORICO

### 2.1. BANCADA DE ENSAIO DE LORENZO

A bancada de ensaios da DeLorenzo, empresa italiana, fundada em 1951 é a empresa mais reconhecida pelo design, desenvolvimento e produção de equipamentos de formação técnica e profissional. Com projetos implementados em 140 países, o Brasil é um dos contemplados pela empresa e tem como objetivo, aperfeiçoar continuamente os produtos para boas práticas profissionais e capacitar ainda mais a mão de obra técnica e profissional.

Os painéis de ensaio produzidos pela DeLorenzo, tem o intuito de auxiliar em projetos de pesquisa, estudos experimentais e auxílio técnico com grande aplicabilidade não só em eletrônica de potência, mas também automação industrial, telecomunicações, eletrotécnica e instalações elétricas são exemplos da ampla abrangência dos painéis de ensaio.

O painel DLB DCA BR4, usado para estudos em eletrônica de potência, adquirido pela UniAcademia que se encontra no Laboratório de Automação Industrial e Eletrônica de Potência é constituído por mini painéis de componentes semicondutores como os mostrados a seguir (fotos retiradas pelos autores):



**DL 2603 - Grupo de Diodos:** Seis diodos de rápida recuperação com disjuntor diferencial residual para montagem de circuitos retificadores não controlados.

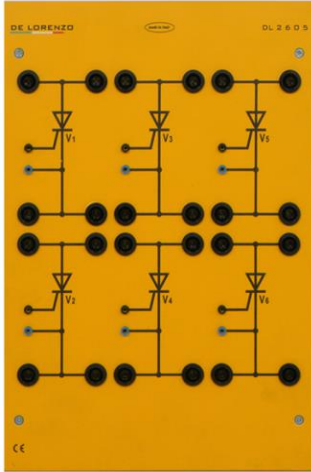
#### Características técnicas:

Corrente média de polarização direta  $I_{fav}$  - 12 A max.

Corrente de pico transitória de polarização direta  $I_{fsm} = 75$  A ( $t_p = 10$  ms).

Tensão reversa de pico  $U_{rrm} = 1000$  V.

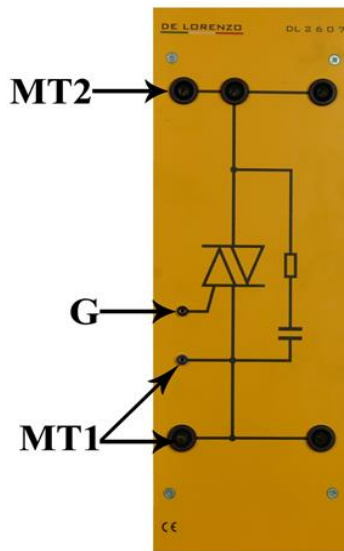
Tempo de recuperação de polarização reversa  $t_{rr} = 65$  ns.



**DL 2605 - Grupo de SCR:** seis SCRs com disjuntor diferencial residual para montagem de circuitos retificadores e inversores controlados

**Características técnicas:**

Corrente média de polarização direta  $I_{fav}$  - 12 A max.  
 Corrente de pico transitória de polarização direta  $I_{fsm} = 75$  A ( $t_p = 10$  ms).  
 Tensão reversa de pico  $U_{rrm} = 1000$  V.  
 Tempo de recuperação de polarização reversa  $t_{rr} = 65$  ns max.



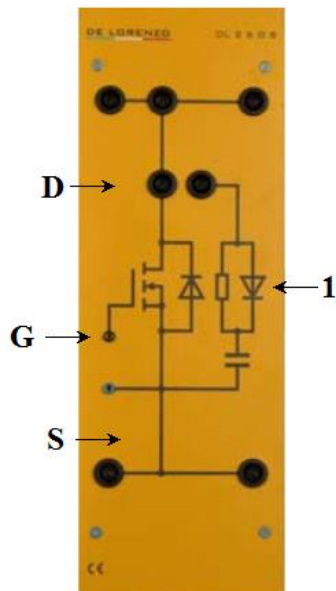
**DL2607 - Triac:** Tiristor bidirecional com gate controlado usado para controle. Filtro RC interno.

**Características técnicas:**

Corrente rms de estado ligado  $I_{TRMS} = 8$  A. Corrente de pico transitória de estado ligado  $I_{TSM} = 70$  A, 50 Hz (77 A, 60 Hz).  
 Pico de tensão de saída CC  $U_{DRM} = 800$  V.  
 Tensão de trigger do gate  $U_{GT} = 2.5$  V max.  
 $I_T = 25$  mA máx (todos quadrantes).  
 Corrente de bloqueio  $I_H = 25$  mA max.  $I^2t = 24$  A<sup>2</sup> s.

**Descrição:**

(MT1): terminal principal (G): gate (MT2): terminal principal.



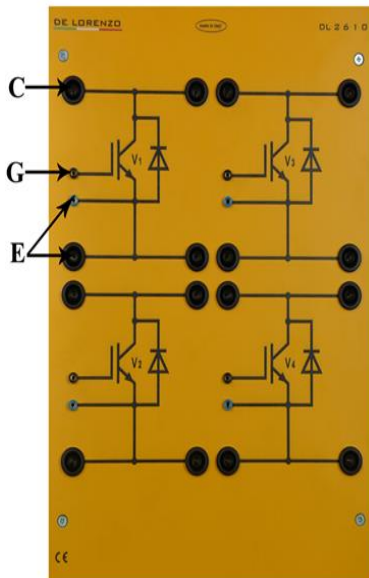
**DL 2608 - Mosfet:** MOS de potência do tipo canal N com diodo reverso integrado (FRED, Fast Recovery Epitaxial Diode) usado para chaveamento rápido em reguladores e inversores.

**Características técnicas:**

Tensão dreno-fonte  $U_{DS} = 400$  V.  
 Corrente de dreno CC  $I_D = 10$  A.  
 Resistência dreno-fonte em estado ligado  $R_{DS(on)} = 0.55$  Ω.  
 Tensão Gate-fonte  $U_{GS} = \pm 20$  V.

**Descrição:**

(D): dreno (G): gate (S): fonte (1): circuito supressor IDR.



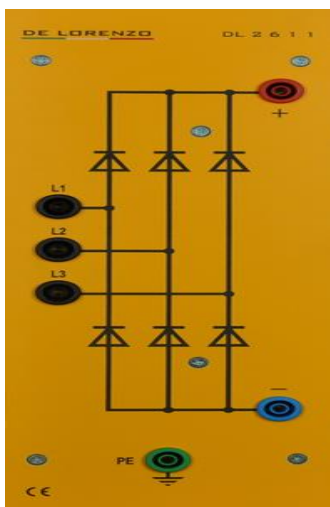
**DL 2610 – Ponte de 4 IGBT:** Transistor Bipolar de Gate Isolado tipo N (IGBT) com diodo antiparalelo ultrarrápido usado como chave rápida para chavear reguladores e inversores

**Características técnicas:**

Tensão coletor-emissor  $U_{ces} = 600 \text{ V}$ .  
 Corrente de coletor CC  $I_c = 24 \text{ A at } T_c = 25^\circ\text{C}$ .  
 Tensão de saturação coletor-emissor  $U_{sat} = 1.8 \text{ V typ a } I_c = 15\text{A}$ .  
 Tensão gate-emissor  $U_{ge} = \pm 20 \text{ V}$ .

**Descrição:**

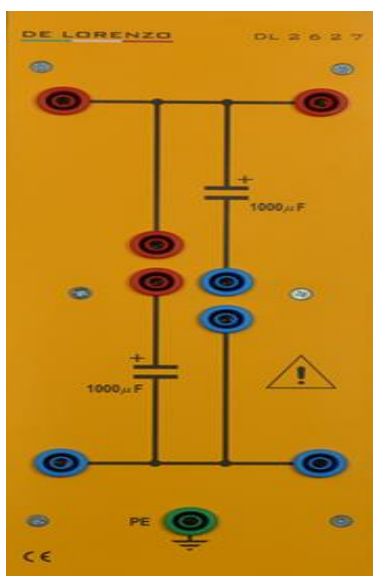
(C): coletor (G): gate (E): emissor.



**DL 2611 – Ponte retificadora trifásica:** Retificador não controlado em ponte de onda completa B6UK para geração de tensão contínua utilizando a rede trifásica de alimentação.

**Características técnicas:**

Tensão alternada nominal de entrada  $U_{VN} = 400 \text{ V}$ .  
 Tensão de saída CC  $U_d = 540 \text{ V}$ .  
 Corrente contínua nominal  $I_{dN} = 10 \text{ A}$ .  
 Corrente de pico transitória de polarização direta  $I_{FSM} = 300 \text{ A}$ .  
 $I^2t = 400 \text{ A}^2\text{s}$ . Queda de tensão  $U_F = 1 \text{ V}$  por diodo.

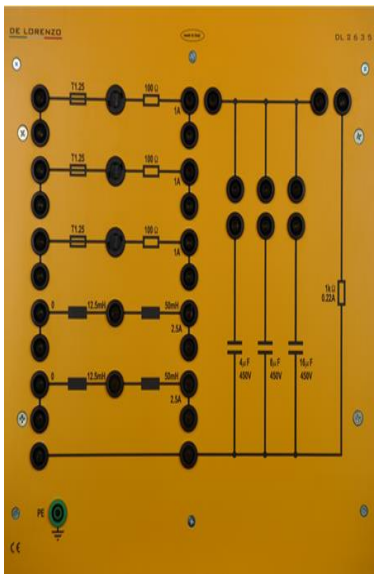


**DL 2627 – Capacitores:** Dois capacitores eletrolíticos de alto desempenho. Especialmente projetado para uso como filtros capacitivos ou com fontes de tensão chaveadas e convencionais

**Especificações técnicas:**

Capacitância nominal:  $2 \times 1000 \text{ mF}$ .  
 Tensão nominal:  $385 \text{ V}$ .  
 Proteção interna contra tensão reversa.  
 Resistência de descarga:  $330 \text{ kW (t = 330 s)}$ .

**Atenção:** energia elétrica armazenada pelo capacitor pode resultar em descargas perigosas até 20 minutos após a fonte de tensão ter sido desconectada.



**DL 2635 - Cargas:** Cargas resistivas, indutivas e capacitivas para todas as experiências de laboratório de eletrônica de potência.

**Especificações técnicas:**

**a) Resistores de carga:** 3 x 100Ω/1A.

Proteção por fusível: 3 x T1.25A.

**b) Indutores de carga:** 2 x (12.5 + 50) mH/2.5A.

**c) Capacitores de cargas:** 4 - 8 - 16 μF/450 Vac.

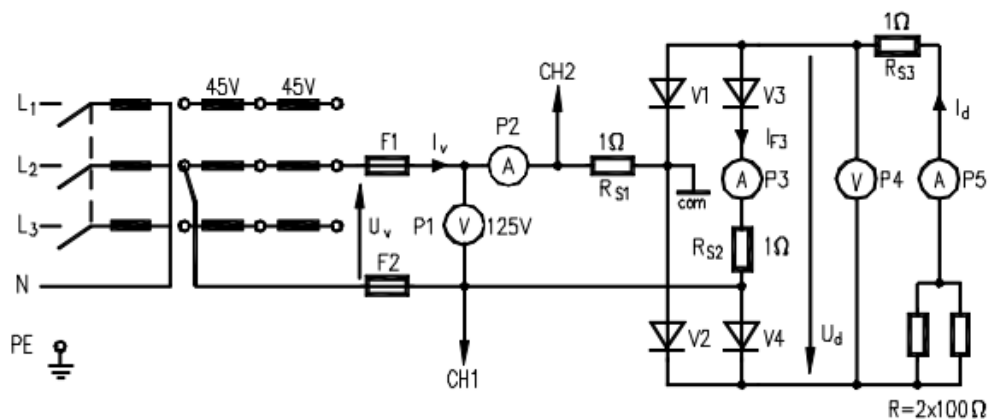
Possibilidade de ligação em paralelo (28 μF).

Com esses minis painéis de componentes, é possível realizar uma gama de práticas relacionadas a eletrônica de potência. Neste trabalho será realizado o experimento N° 5A, mas também é possível realizar outros tipos diferentes de montagens fazendo uso dos dispositivos descritos anteriormente.

**2.2. PRATICA PROPOSTA PARA O ESTUDO**

Na prática: Experimento N° 5A, é utilizada uma ponte retificadora não controlada de onda completa, na qual é constituída de 4 (quatro) diodos retificadores como representado na figura 1.

**Figura 1:** Diagrama de circuito da prática: Experimento N° 5A.



**Fonte:** Manual DeLorenzo

A retificação não controlada ou retificação passiva, tem esse nome devido a utilização de diodos retificadores não controlados que tem como função anular um semiciclo da tensão e/ou corrente do circuito. Os diodos retificadores possuem uma vasta aplicabilidade em circuitos de engenharia elétrica e eletrônica e são amplamente empregados em circuitos de eletrônica de potência para a conversão de energia elétrica.

Os circuitos retificadores, são elementos responsáveis pela conversão de energia elétrica em conjunto com os SCRs e diodos retificadores (DRs). Os conversores de CA em CC são comumente conhecidos como retificadores, e fornecem uma tensão CC na saída. Para os circuitos de retificação existem alguns modelos como:

- Retificadores de Meia Onda;
- Retificador de Onda Completa com transformador de *tap center*;
- Retificador de Onda Completa em Ponte;

Os retificadores podem atuar em circuitos monofásicos com ponte de diodos retificadores, SCRs ou transformador de *tap center* e também em circuitos trifásicos. O trabalho proposto é simular o retificador em ponte de diodos para circuito monofásico e inserir um filtro capacitivo para obter uma tensão CC constante de saída.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. PRINCIPAIS FORMULAS

Nessa Seção serão apresentadas as principais fórmulas utilizadas na modelagem matemática do circuito de retificação. Com base no livro **Eletrônica de Potência, Hart, D. W.**, foram realizados os cálculos admitindo as seguintes expressões:

$$\text{Tensão de entrada: } v_0(\omega t) = \begin{cases} V_m \text{sen}(\omega t) & \text{para } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ -V_m \text{sen}(\omega t) & \text{para } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Componente de tensão continua: } V_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \text{sen}(\omega t) d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \quad (2)$$

$$\text{Tensão RMS (root means square): } V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m^2 \text{sen}^2(\omega t) d(\omega t)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$\text{Tensão Pico: } V_m = \sqrt{2}V_{rms} \quad (4)$$

$$\text{Tensão Média: } V_{méd} = \frac{2\sqrt{2}V_m}{\pi} \quad (5)$$

$$\text{Componente de corrente contínua: } I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{2V_m}{\pi R} \quad (6)$$

$$\text{Corrente RMS (root means square): } I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

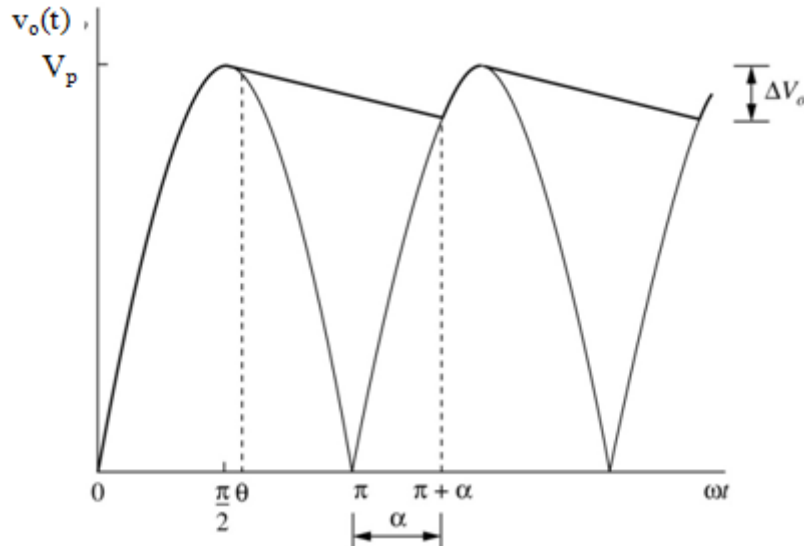
$$\text{Corrente Média: } I_{méd} = \frac{2\sqrt{2}V_m}{\pi R} = \frac{V_{méd}}{R} \quad (8)$$

$$\text{Ângulos de Disparo: } \beta = \alpha = 180^\circ \quad (9)$$

$$\text{Frequência angular: } \omega = 2\pi f \quad (10)$$

Ao inserirmos o filtro capacitivo, a forma de onda que era pulsante se torna constante para isso é necessário dimensionar a capacitância do filtro para que haja uma ondulação (*ripple*) conhecida como podemos ver na Figura 2.

**Figura 2:** Retificador de onda completa com filtro capacitivo e ondulação ( $\Delta V_0$ )



Fonte: Manual DeLorenzo

Para isso, foram realizados os cálculos admitindo uma variação ( $\Delta V_0$ ) para o circuito e foi utilizada a seguinte expressão (10):

$$\text{Variação de tensão: } \Delta V_0 \approx \frac{V_m \pi}{\omega RC} = \frac{V_m}{2fRC} \quad (11)$$

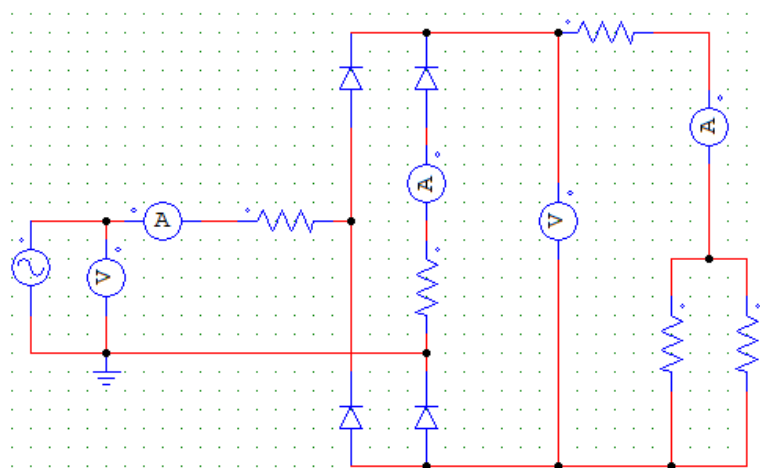


## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ANÁLISE DE RESULTADOS

Como o proposto pelo trabalho, o Experimento N° 5A, *Two-Pulse Bridge Rectifier B2Uk, Ohmic Load*, é a construção de uma ponte retificadora não controlada com carga puramente resistiva como pode ser visto na figura 1. E com base nas expressões demonstradas na seção 2, foram admitidos os seguintes valores:  $R = 1 \Omega$ ,  $R_1 = 1 \Omega$ ,  $R_2 = 1 \Omega$ ,  $R_3 = 100 \Omega$ ,  $R_4 = 100 \Omega$ ;  $f = 60 \text{ Hz}$ ;  $V = 127 \text{ V}$  e  $\Delta V = 27 \text{ V}$ .

**Figura 3:** Retificador não controlado simulado no software PSIM.

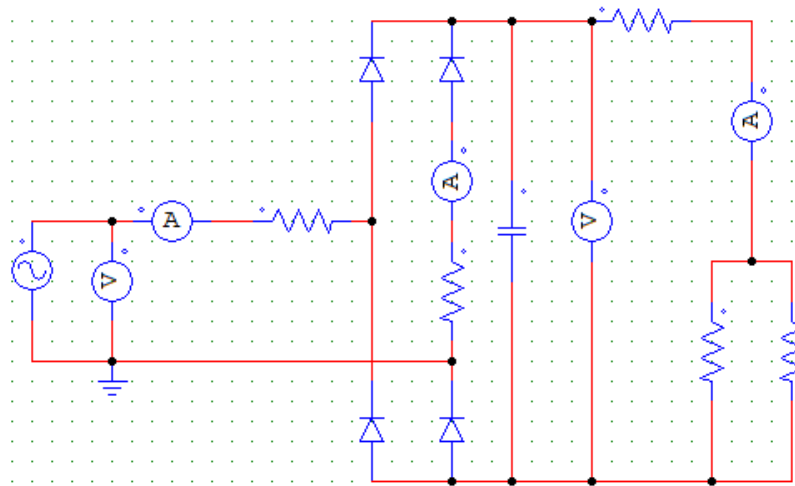


**Fonte:** O autor

Após realizados os cálculos para o retificador não controlado sem filtro capacitivo e admitidos esses valores, foi realizado o cálculo para a capacitância ideal para o circuito de retificação utilizando a equação 11 onde:

$$\Delta V_0 \approx \frac{V_m \pi}{\omega RC} \approx 950 \mu\text{F}.$$

**Figura 4:** Retificador não controlado com filtro capacitivo simulado no *software*.

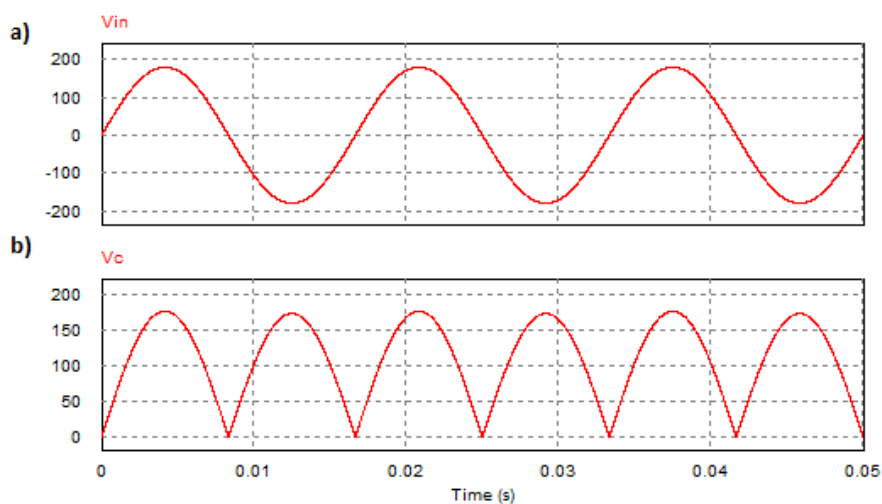


Fonte: O autor

## 4.2. SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

Realizada a modelagem matemática, definição de  $\Delta V$  e encontrado a capacitância (C), foi utilizado o *software* PSIM 9.1, na qual é um *software* destinado a simulação de circuitos eletrônicos, assim como: Proteus, PSpices, Simulink, etc, para fazer a simulação dos circuitos, verificar a forma de onda desejada do início ao fim do experimento e realizar a comparação dos valores teóricos obtidos pela modelagem matemática e os valores obtidos através da simulação.

**Figura 5:** Formas de onda de tensão a) entrada e b) saída, sem filtro capacitivo.

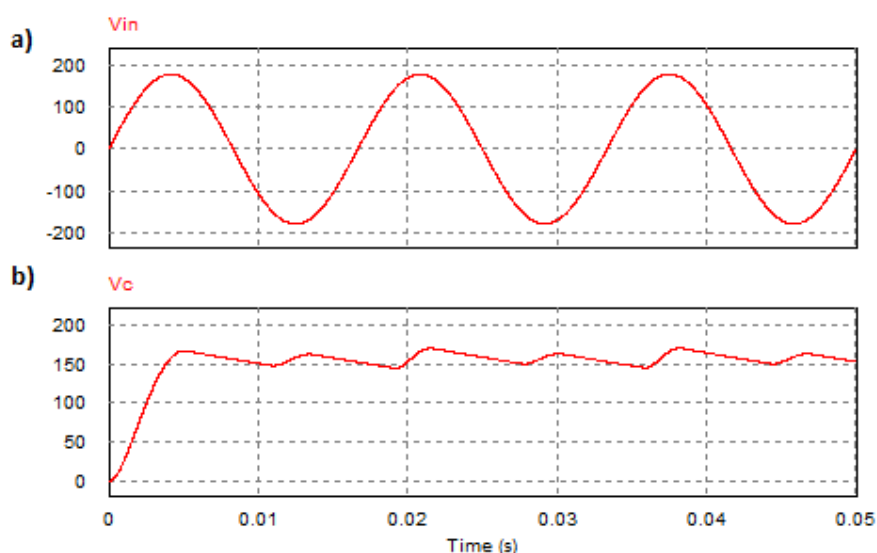


Fonte: O autor

Na figura 5 a), é possível observar na forma de onda de tensão na entrada ( $V_{in}$ ) do circuito que não ocorre distorção ou defasagem com  $V_m = 180 V$ , agora na figura 5 b), observa se que a senoide é alterada e passa a não possuir o semiciclo negativo da onda, tornando a tensão, neste caso, continua pulsante com valores de  $V_{méd} = 162 V$ , obtido através da equação (5),  $V_{rms} = 127 V$ , obtido através da equação (4) e simulação e por fim,  $V_0 = 114,6 V$  obtido através da equação (2)

Ao inserir o filtro capacitivo, visto na figura 6, ocorrem alterações na forma de onda de tensão na saída do retificador como representado na figura 6 b).

**Figura 6:** Formas de onda de tensão a) entrada e b) saída, com filtro capacitivo.



**Fonte:** O autor

Na figura 6 a), assim como na figura 5 a), representam a forma de onda de tensão na entrada do circuito com  $V_m = 180 V$ . Na figura 6 b), é representada forma de onda de saída de tensão do retificador com filtro capacitivo no primeiro instante é possível observar o transitório do circuito e após este instante ocorre a retificação completa e assim como na retificação sem filtro capacitivo, não temos o semiciclo negativo da onda. Neste caso foram obtidos os mesmos valores de  $V_{méd}$ ,  $V_{rms}$  e  $V_0$  obtidos anteriormente sem a inserção do capacitor. Considerando o tempo de carga e descarga do capacitor, obtém se uma variação de tensão continua ou *ripple* neste caso  $\Delta V_0 = 27V$  ou 15% tornando a tensão neste caso continua constante.

## 5. CONCLUSÃO

Com o isolamento que ocorreu no ano de 2020, não foi possível realizar a montagem da prática na própria bancada de ensaios, mas ao realizar a modelagem matemática do circuito, simulação com o *Software* e comparação com os resultados dos manuais, foi possível estabelecer um padrão de proximidade entre eles. É possível observar essa proximidade nos valores de tensão do circuito e na forma de onda encontrada ao final da retificação. Para projetos futuros, será proposto a montagem na bancada de ensaio do experimento proposto no trabalho, análises a partir dos experimentos presentes nos manuais como: Análise de Fator de Potência, Análises de Fourier, dentre outros e o levantamento dos valores através dos aparelhos de medição específicos após o fim do isolamento pela covid-19 e reabertura das instituições de ensino superior.

## ABSTRACT

This paper deals with the theoretical-practical analysis of an experiment on the power electronics bench present in the electrical engineering course laboratory at UniAcademia. Initially, a historical description of the invention of power semiconductors is performed, such as: Rectifier Diodes, SCRs, TBJs, TRIACs, GTOs, MOSFETs and IGBTs. A description of the panel used for carrying out the proposed practice, its main applications, as well as the main components used in this work was carried out. The proposed practice for the study was an experiment No. 5A, where an uncontrolled rectifier is assembled with a purely resistive load, and later with the insertion of a capacitive filter at the output. The objective of the work is to apply the knowledge acquired through the disciplines of Fundamentals of Power Electronics, applying a mathematical modeling of the circuit and analyzing the main waveforms of this circuit. From computer simulations, comparisons of the values obtained by calculations of theoretical modeling will be made, with the results by simulation of PSIM software.

**Keywords:** Power electronics, AC-DC converter, rectifier diode, Bridge rectifier.

## REFERÊNCIAS

DE LORENZO. **DeLorenzo**: *Engineering Training Solutions*,c2020. Pagina inicial Disponível em: <<https://www.delorenzogloba.com/documenti/prodotti/dca-tot-power-electronics-ing-tot.pdf>>. Acesso em: 28 de Setembro de 2020.

HART. Daniel W. **Eletrônica de potência: Análise e projetos de circuitos**. Porto Alegre. RS: Bookman, 2012.

RASHID, Muhammad Harunur. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações** . São Paulo, SP: Makron, 1999.