

## ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE PRÁTICAS EXPERIMENTAIS DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA COM ANÁLISE DE FATOR DE POTENCIA

*COELLI, Pedro Henrique Souza<sup>1</sup>,  
Centro Universitário Academia – UniAcademia  
NOGUEIRA, Fernando José<sup>2</sup>.  
Centro Universitário Academia - UniAcademia*

*Linha de pesquisa: Eletrônica de Potência*

### RESUMO

Esse artigo trata da análise de um experimento de bancada sobre 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 de aulas práticas de eletrônica de potência, relatando suas principais aplicações, bem como seus principais componentes. O experimento selecionado para estudo é o experimento N° 5A, onde é realizada a montagem de um retificador não controlado com carga puramente resistiva, e posteriormente a inserção de um filtro capacitivo na saída desse retificador. Após a inserção do filtro capacitivo, também foi realizada a correção do fator de potência e análise da distorção harmônica total da corrente de entrada por meio de um pré-regulador do tipo boost comutado em baixa frequência. A partir de simulações computacionais, são realizadas comparações dos valores obtidos pelos cálculos da modelagem teórica, com os obtidos por simulação pelo software PSIM. Por fim, o objetivo desse trabalho é aplicar os principais conceitos estudados a partir da disciplina Eletrônica de Potência.

**Palavras-chave:** Ponte retificadora, Distorção Harmônica Total, Fator de Potência, Conversor, Pré regulador Boost.

---

[0] Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário - UniAcademia, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário – UniAcademia.

[2] Professor Doutor em Engenharia Elétrica do Centro Universitário – UniAcademia.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A primeira revolução da eletrônica ocorreu no ano de 1948, quando o primeiro transistor de silício foi desenvolvido por Bardeen, Brattain e Shockley da *Bell Telephone Laboratories*. 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 (RASHID, MUHAMMAD H, 1999).

A eletrônica de potência é a ciência que estuda o desenvolvimento e dimensionamento de conversores de energia elétrica, tais como: inversores de frequência, circuitos retificadores e conversores CC-CC e CA-CA, buscando mais eficiência e qualidade na transformação de energia elétrica, reduzindo as perdas e interferências 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 – Ligado/Desligado), 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, desenvolveu 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, circuitos 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 e uma revisão sobre os semicondutores utilizados na prática. A metodologia discriminará as principais expressões que fazem a modelagem dos circuitos. Em resultados e discussão, será realizada a análise dos resultados e uma simulação do experimento proposto utilizando o software PSIM, a fim de fazer uma comparação de valores teóricos e simulados.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

A seguinte seção, foi dividida em dois tópicos sendo, um tópico relacionado a bancada utilizada e o outro tópico ao experimento proposto para análise.

### **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.

O painel de ensaio produzido 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 (Figura 1), 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:

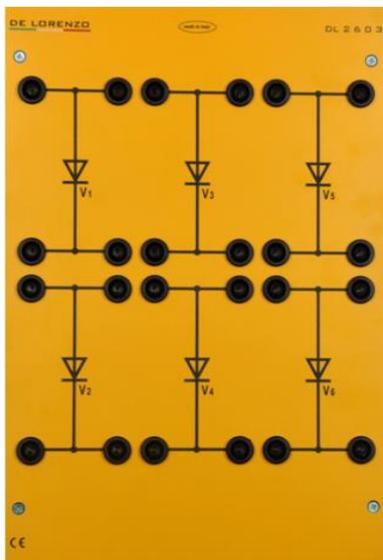
**Figura 1:** Painel DLB DCA BR4 da Delorenzo.



Fonte: Manuais Delorenzo. Disponível em:

<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em:  
23 nov. 2020.

**Figura 2:** Mini painel DL 2603.



**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).

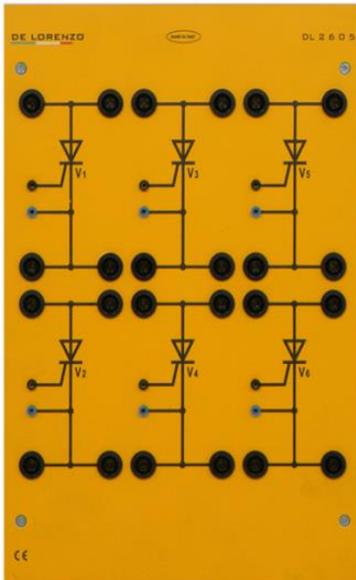
Tensão reversa de pico  $U_{rrm}$  = 1000 V.

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

Fonte: Manuais Delorenzo, Disponível em:

<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em:  
23 nov. 2020.

**Figura 3:** Mini painel DL 2605



**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  $I_{f\text{av}}$  - 12 A max.

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

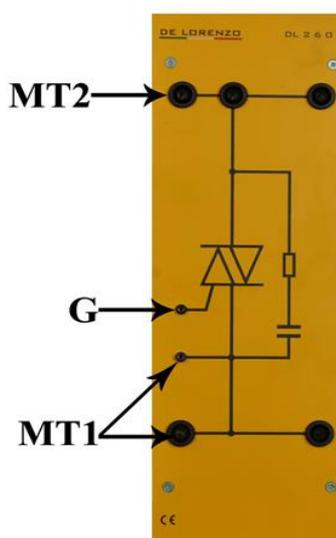
Tensão reversa de pico  $U_{rrm} = 1000$  V.

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

Fonte: Manuais Delorenzo, Disponível em:

<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em: 23 nov. 2020.

**Figura 4:** Mini painel DL 2607



**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.

Corrente de trigger do gate  $I_G$  Tensão de trigger do gate  $U_{GT} = 2.5$  V max.

$\tau = 25$  mAmax (todos quadrantes).

Corrente de bloqueio  $I_H = 25$  mAmax.  $I^2t = 24$  A<sup>2</sup> s.

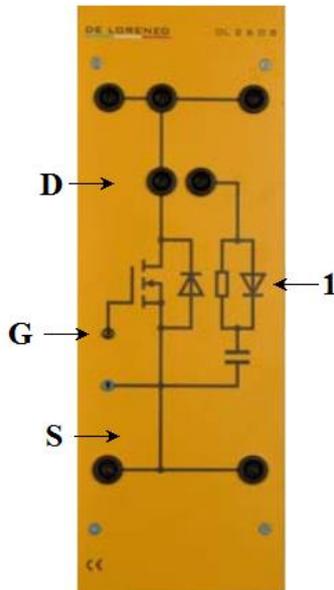
**Descrição:**

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

Fonte: Manuais Delorenzo, Disponível em:

<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em: 23 nov. 2020.

**Figura 5:** Mini painel DL 2608



**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 UDS = 400 V.

Corrente de dreno CC ID = 10 A.

Resistência dreno-fonte em estado ligado RDS(on) = 0.55 Ω.

Tensão Gate-fonte UGS = ±20 V.

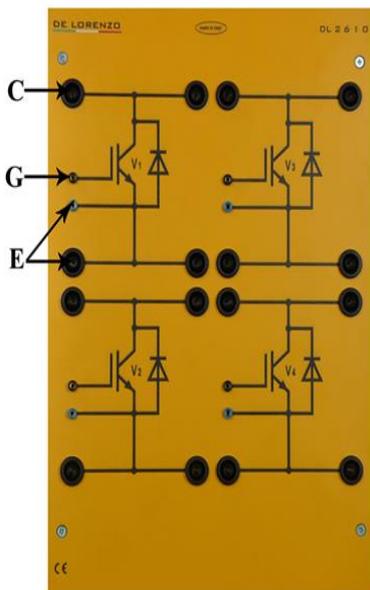
**Descrição:**

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

Fonte: Manuais Delorenzo, Disponível em:

<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em: 23 nov. 2020.

**Figura 6:** Mini painel DL 2610



**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 Uces = 600 V.

Corrente de coletor CC Ic = 24 A atTc =25°C.

Tensão de saturação coletor-emissor UcEsat =1.8 Vtyp a Ic = 15A.

Tensão gate-emissor Uge = ±20 V.

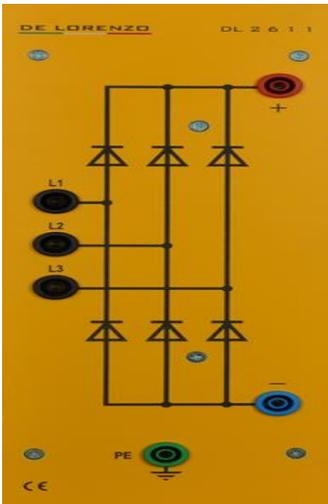
**Descrição:**

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

Fonte : Manuais Delorenzo, Disponível em:

<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em: 23 nov. 2020.

**Figura 7:** Mini painel DL 2611



**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 UVN = 400 V.

Tensão de saída CC  $U_d = 540$  V.

Corrente contínua nominal  $I_{dN} = 10$  A.

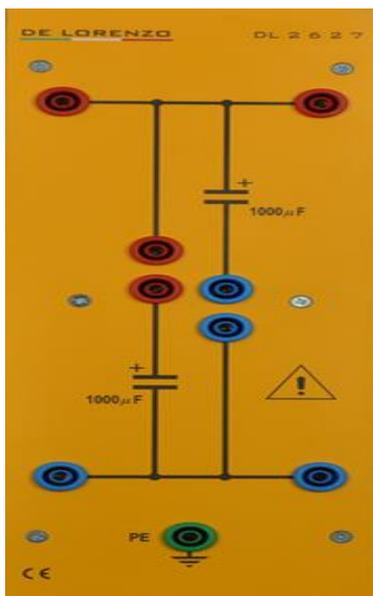
Corrente de pico transitória de polarização direta  $I_{FSM} = 300$  A.

$I^2t = 400$  A<sup>2</sup>s. Queda de tensão UF = 1 V por diodo.

Fonte: Manuais Delorenzo, Disponível em:

<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em: 23 nov. 2020.

**Figura 8:** Mini painel DL 2627



**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 x 1000 mF.

Tensão nominal: 385 V.

Proteção interna contra tensão reversa.

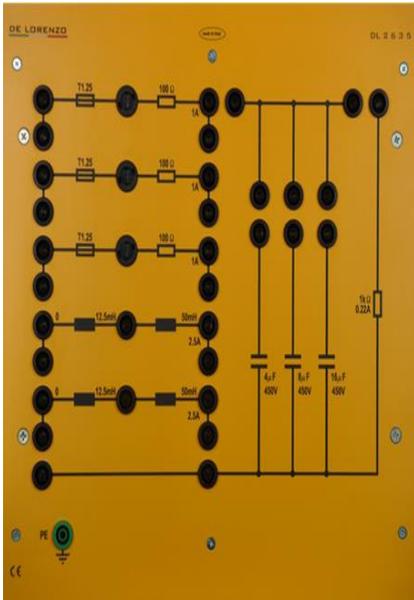
Resistência de descarga: 330 kW ( $t = 330$  s).

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

Fonte: Manuais Delorenzo, Disponível em:

<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em: 23 nov. 2020.

**Figura 9:** Mini painel DL 2635



**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.

Possibilidade de ligações em série (300Ω) e paralelo (33.33 Ω) ou carga em estrela e triângulo.

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

Possibilidade de ligação em série (100 mH) e paralelo (6.25 mH).

**c) Capacitores de cargas:** 4 - 8 - 16 μF/450 Vac. Possibilidade de ligação em paralelo (28 μF).

Resistor de descarga: 1 kΩ/0.22A.

Fonte: Manuais Delorenzo, Disponível em:

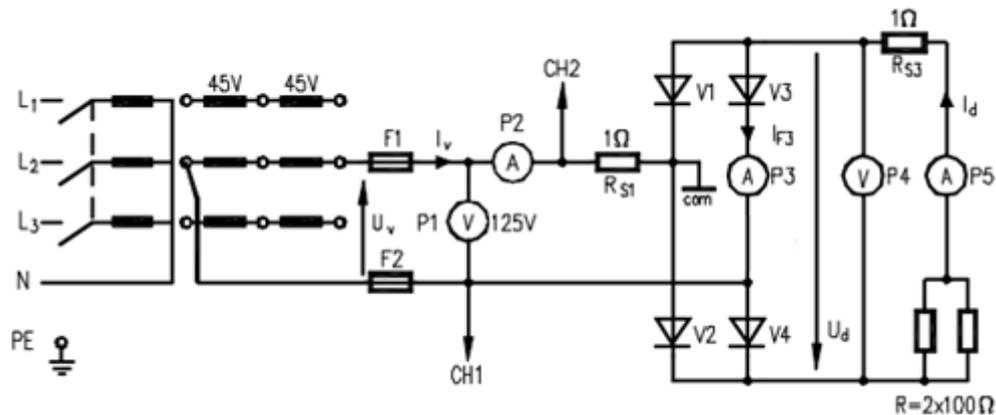
<[https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact\\_PT\\_A4.pdf](https://www.delorenzoglob.com/documenti/prodotti/1352448116-compact_PT_A4.pdf)> Acesso em: 23 nov. 2020.

Com esses mini painéis de componentes, é possível realizar uma gama de práticas relacionadas à 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. EXPERIMENTO PROPOSTO PARA O ESTUDO

O Experimento N° 5A, faz uso de uma ponte retificadora não controlada de onda completa, na qual é constituída de 4 (quatro) diodos retificadores como representado na figura 10.

Figura 10: Diagrama de circuito estudado: Experimento N° 5ª.



Fonte: Manual da Bancada de Eletrônica de Potência da DeLorenzo. Disponível em: <<https://www.delorenzogloba.com/documenti/prodotti/dca201.1-diodes-eng.pdf>> Acesso em: 23 nov. 2020.

A retificação não controlada ou retificação passiva tem esse nome devido à utilização de diodos retificadores 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 corrente alternada para corrente contínua (CA-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

A seguinte seção, apresenta as principais formulas utilizadas para realização da análise.

#### 3.1. PRINCIPAIS EXPRESSÕES

Nessa Seção serão apresentadas as principais expressões 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{Distorção Harmônica Total: } THD = \frac{\sqrt{I_{s,rms}^2 - I_{s1,rms}^2}}{I_{s1,rms}} \quad (10)$$

$$\text{Fator de Potência: } FP = \frac{VI_{s1} \cos(\varphi_1)}{VI_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cdot FD = \frac{FD}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (11)$$

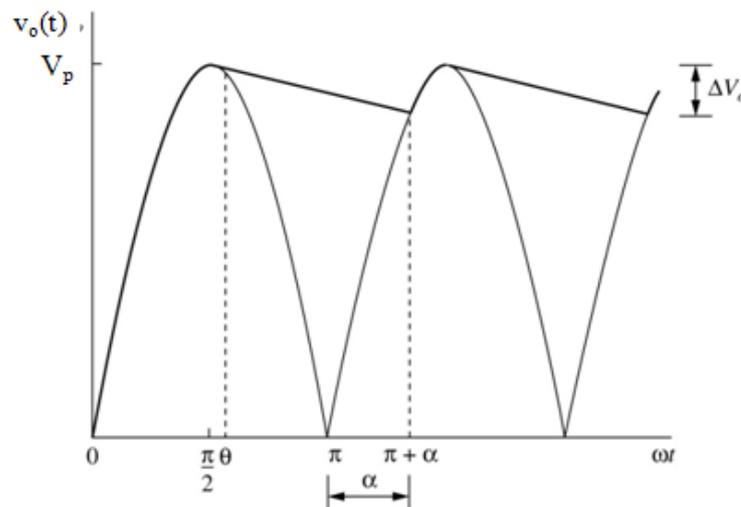
$$\text{Fator de Deslocamento: } FD = \cos(\varphi_1) \quad (12)$$

$$\text{Fator de Distorção: } FDi = \sqrt{\frac{1}{1+(THD)^2}} \quad (13)$$

Para que a tensão de saída no retificador atenda as formas de onda continua constante é necessário que seja inserido um filtro capacitivo para preencher as

lacunas da tensão pulsante. Assim ao ser inserido o filtro capacitivo, a forma de onda que era pulsante, tende a ser filtrada e ter um valor constante. Para isso, é necessário dimensionar a capacitância do filtro para que haja uma ondulação (*ripple*) conhecida como visto na Figura 11.

**Figura 11:** Retificador de onda completa com filtro capacitivo e ondulação (*ripple*)( $\Delta V_0$ ).



Fonte: Eletrônica de Potência, Hart, D. W.

Os cálculos foram realizados admitindo uma variação ( $\Delta V_0$ ) para o circuito a partir da seguinte expressão (14):

$$\text{Variação de tensão: } \Delta V_0 \approx \frac{V_m \pi}{\omega RC} = \frac{V_m}{2fRC} \quad (14)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

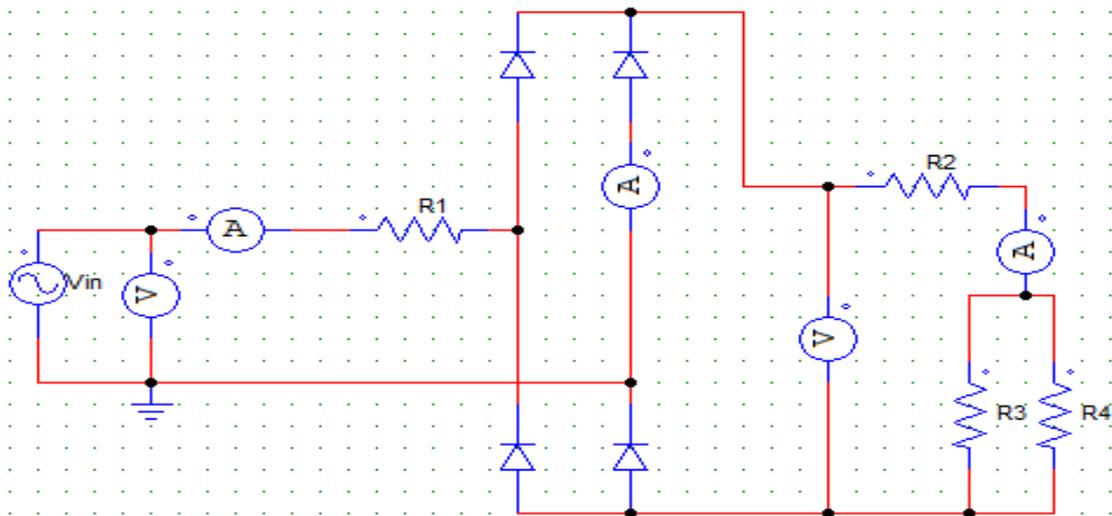
O seguinte tópico se divide em três tópicos sendo, Análise de resultados, Simulação do circuito e Análise de THD e Fator de Potência.

### 4.1. ANÁLISE DE RESULTADOS

Como 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 10. E com base nas

expressões demonstradas na seção 3, foram admitidos os seguintes valores:  $R1 = 1 \Omega$ ,  $R2 = 1 \Omega$ ,  $R3 = 100 \Omega$ ,  $R4 = 100 \Omega$ ;  $f = 60 \text{ Hz}$ ;  $V_{rms} = 127 \text{ V}$  e  $\Delta V_0 = 27 \text{ V}$ .

**Figura 12:** Retificador não controlado sem filtro capacitivo simulado no software PSIM.

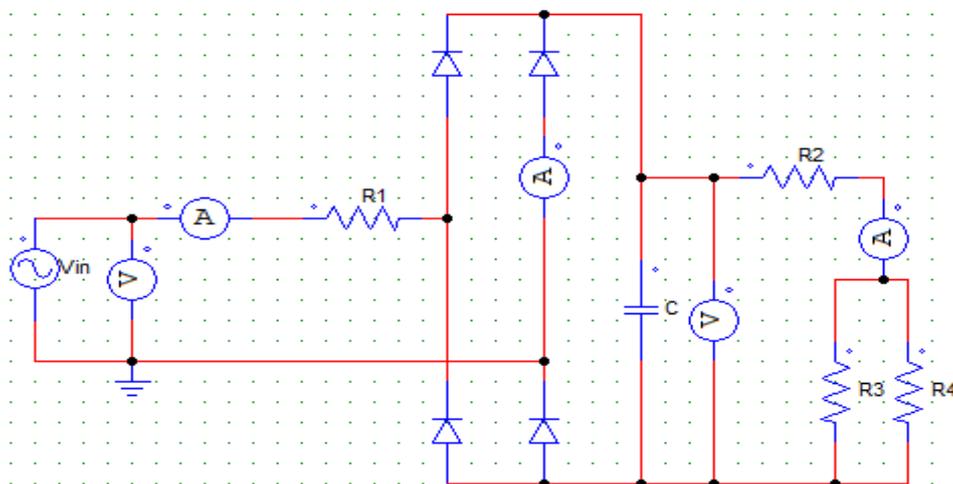


Fonte: Autor.

Após realizados os cálculos para o retificador não controlado sem filtro capacitivo e admitidos os valores mostrados no início dessa seção, foi realizado o cálculo para a capacitância do circuito de retificação utilizando a equação (15), onde:

$$C \approx \frac{V_m \pi}{\omega R \Delta V_0} \approx 950 \mu\text{F}. \quad (15)$$

**Figura 13:** Retificador não controlado com filtro capacitivo simulado no software.

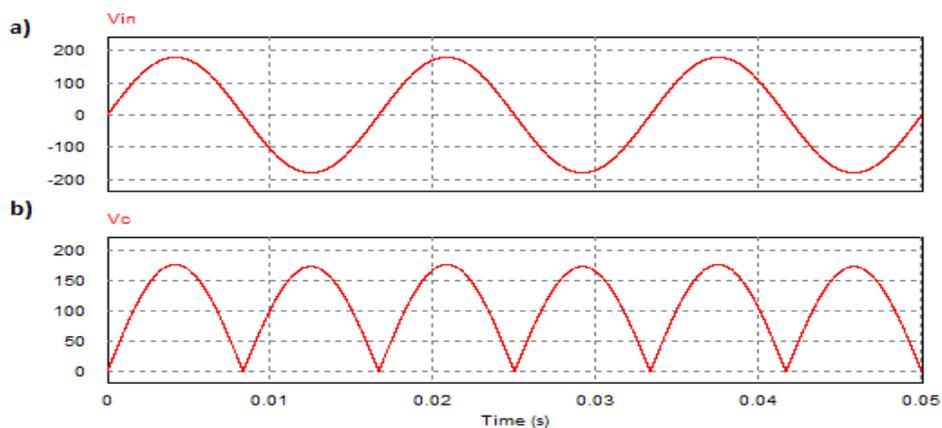


Fonte: Autor.

## 4.2. SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

A partir da definição de  $\Delta V_0$  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. O objetivo é verificar se as formas de onda desejadas estão compatíveis com a teoria e realizar a comparação dos valores teóricos obtidos pelas principais equações do retificador com os valores obtidos por meio da simulação.

**Figura14:** Formas de onda de tensão a) entrada ( $V_{in}$ ) e b) saída ( $V_c$ ), sem filtro capacitivo.

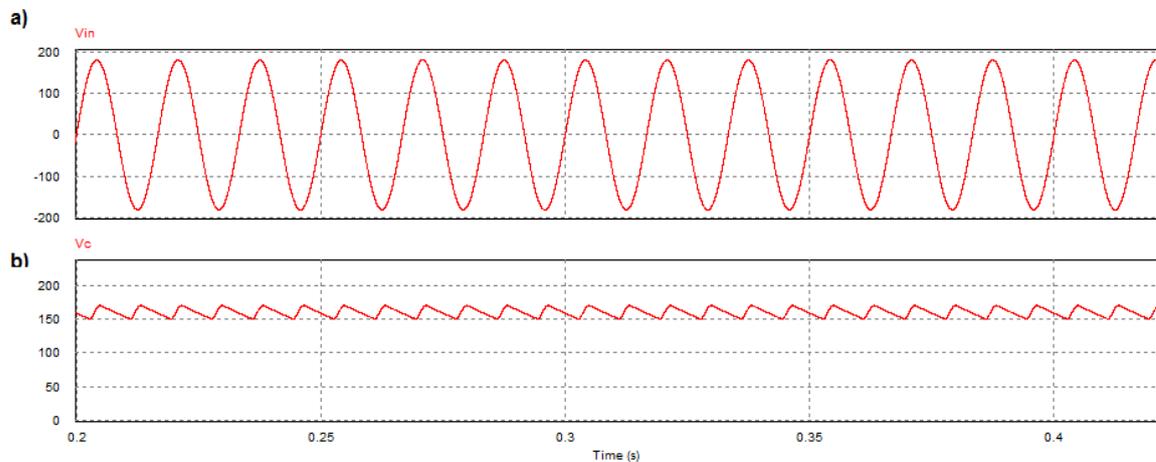


Fonte: Autor.

Na figura 14 a), é possível observar na forma de onda de tensão na entrada ( $V_{in}$ ) do circuito que não ocorre distorção ou defasagem com  $V_m = 180 V$ . Na figura 14 b), observa-se que a senoide é alterada e passa a não possuir o semiciclo negativo da onda, tornando a tensão, neste caso, contínua e pulsante com valores de  $V_{rms} = 127 V$ , obtido através da equação (4) e simulação e por fim,  $V_0 = V_{méd} = 114,6 V$  obtido através da equação (2) e (5).

Ao inserir o filtro capacitivo, como pode ser visto na figura 13, ocorrem alterações na forma de onda de tensão na saída do retificador como representado na figura 15 b).

**Figura 15:** Formas de onda de tensão a) entrada ( $V_{in}$ ) e b) saída ( $V_c$ ), com filtro capacitivo.



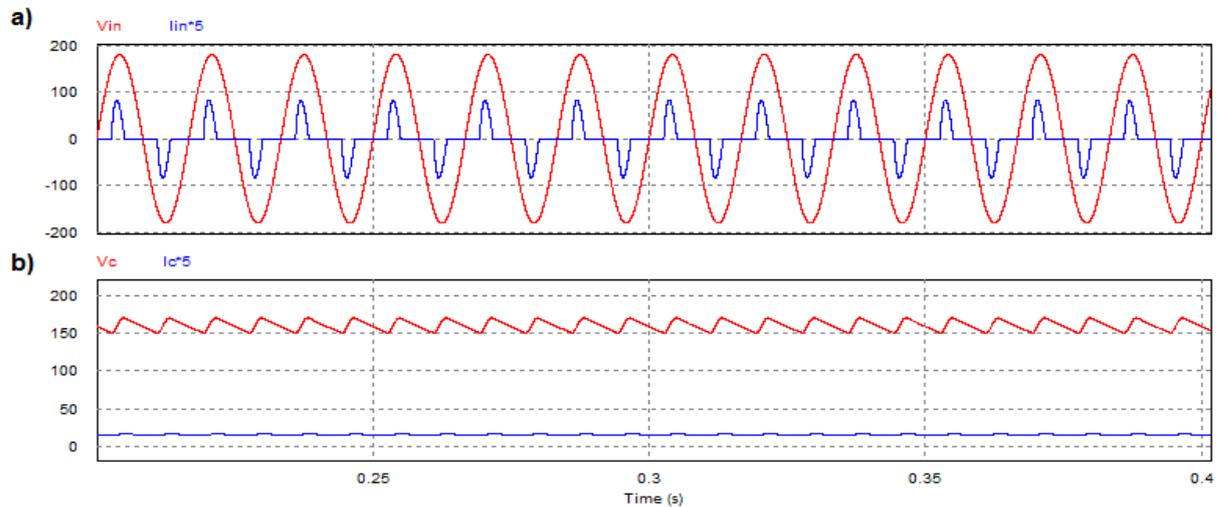
Fonte: Autor.

Na figura 15 a), assim como na figura 14 a), representam a forma de onda de tensão na entrada do circuito com  $V_m = 180\text{ V}$ . Na figura 15 b), é representada forma de onda de saída de tensão do retificador com filtro capacitivo onde ocorre a retificação continua 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  $\Delta V_0 = 27\text{ V}$  ou 15% tornando a tensão neste caso continua com uma ondulação constante.

### 4.3. ANÁLISE DE THD E FATOR DE POTÊNCIA

A partir das simulações de tensão, foram analisadas as correntes de entrada e saída do circuito após inserção do filtro capacitivo e foi possível observar que ocorre uma distorção na forma de onda da corrente na entrada do retificador, como representado na figura 16 a).

**Figura 16:** Formas de onda da corrente(Azul)(5x)e tensão(Vermelho)a) entrada b) saída.



Fonte: Autor.

Essa deformação e defasagem na forma de onda da corrente ( $I_{in}$ ) ocorre devida a inserção do filtro capacitivo em paralelo com a saída do circuito. Esta forma é resultado do somatório de múltiplos sinais senoidais harmônicos geradas pela inserção de cargas não lineares.

Harmônicos constituem-se em uma das formas de distorção para tensões e/ou correntes elétricas, caracterizadas por sinais senoidais com múltiplas frequências provenientes da frequência fundamental (LEÃO, RUTH P.S., 2014). Esse fenômeno pode ser definido como:

- Distorção Harmônica Individual;
- Distorção Harmônica Total;

A distorção harmônica individual é dada a partir da relação entre a amplitude de corrente e/ou tensão harmônica de ordem  $n$  ( $I_{Hn}$ ) e a correspondente fundamental ( $I_1$ ), representado pela seguinte expressão (14):

$$\text{Distorção Harmônica Individual de Corrente: } \frac{I_{hn}}{I_1} \times 100 \quad (16)$$

A distorção harmônica total (THD) é o termo utilizado com o objetivo de gerar uma variável representativa do somatório de todas as frequências harmônicas presentes no sinal senoidal.

A THD é o termo utilizado para quantificar as propriedades da forma de onda senoidal. Este valor é a relação entre valor eficaz de todas as componentes das

harmônicas distintas e o valor eficaz da componente da frequência fundamental. O valor de THD pode ser representado pela expressão (15) onde:

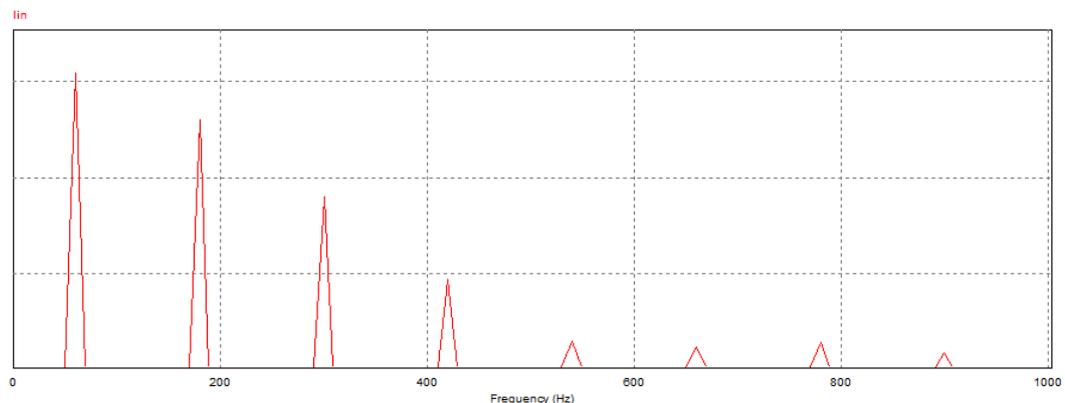
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad (17)$$

Ao reduzir a expressão 17, o valor de THD também pode ser obtido através da expressão 10, mencionada no tópico 3.1.

A distorção de tensão e/ou corrente é analisada matematicamente através de estudos em ondas senoidais e não senoidais periódicas. Sabe-se que qualquer onda que possua em seu conteúdo distorções ou frequências com amplitude diferente da fundamental, pode ser decomposta através de uma série de Fourier, em uma componente de mesma frequência que a onda resultante distorcida que é chamada de frequência fundamental, e em outras ondas senoidais de frequências múltiplas da fundamental. A ferramenta matemática utilizada no cálculo desses índices de frequência e ângulo das harmônicas é denominada F.F.T. (*Fast Fourier Transformer*) ou Transformada Rápida de Fourier.

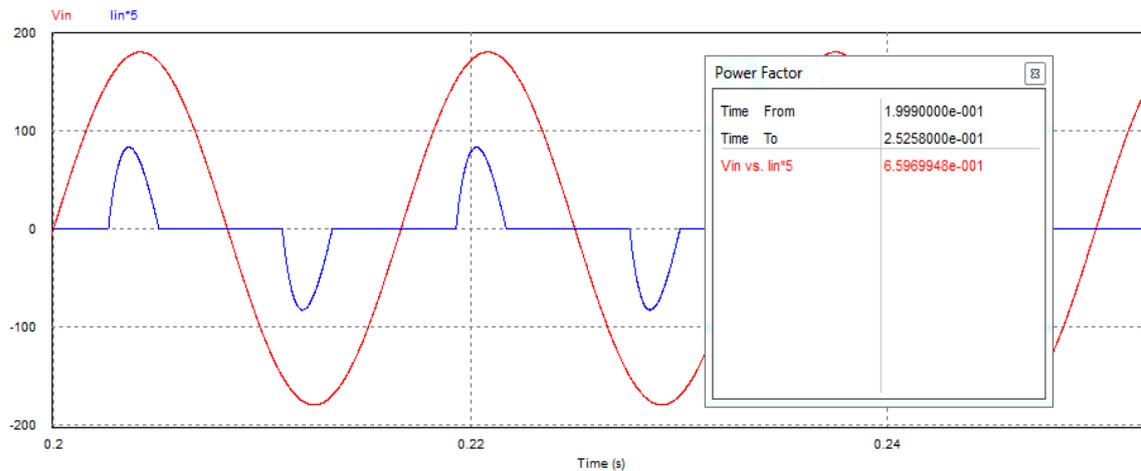
Realizando a F.F.T. na corrente de entrada (lin) e o cálculo do fator de potência (FP) por meio do simulador PSIM, é possível analisar a distorção harmônica (THD) do retificador representado pela Figura 17 e Figura 18.

**Figura 17:** F.F.T. (*Fast Fourier Transformer*) da corrente de entrada.



Fonte: Autor.

**Figura 18:** Cálculo de F.P feito através do *Software* PSIM.



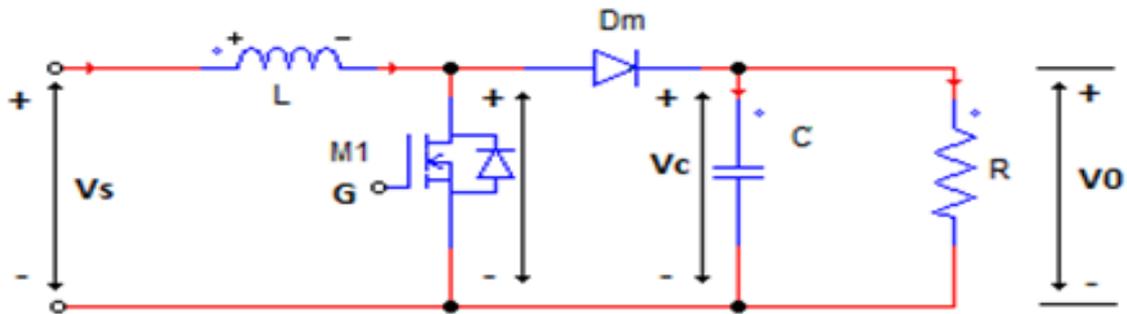
Fonte: Autor.

Como pode se observar na Figura 17, as harmônicas de 3ª e 5ª ordem, 180 Hz e 300 Hz respectivamente, são as principais responsáveis pela distorção e defasagem da forma de onda de corrente na entrada do circuito.

Com Fator de Potência igual a 0,659 (Figura 18), foi proposto um circuito pré regulador de fator de potência, baseado no conversor *boost* comutado em baixa frequência.

Segundo a norma IEEE-519-2014 para circuitos compreendidos em  $120\text{ V} < V < 69\text{ kV}$ , todas as harmônicas ímpares não devem ultrapassar 25% da harmônica fundamental (o que ocorreu nas harmônicas 3, 5 e 7 da figura 8). Essa norma visa um controle de injeção de harmônicas na rede elétrica a fim de manter a qualidade de energia fornecida pela concessionária. A injeção de harmônicas a rede pode distorcer a forma geral da onda senoidal fornecida pela concessionária e isso acarreta uma série de problemas como: a propagação do problema para outros usuários da rede, problemas na própria alimentação do usuário que utiliza o equipamento, problemas na rede elétrica, etc.

**Figura 19:** Diagrama do circuito do conversor *boost*.



Fonte: Autor.

Como pode se observar na Figura 19, o pré regulador baseado no conversor *boost* comutado, neste caso em baixa frequência (120 Hz), funciona abrindo e fechando um interruptor eletrônico representado como M1.

O conversor CC-CC do tipo *boost* operando como pré regulador em baixa frequência, tem a capacidade de proporcionar um fator de potência naturalmente elevado com conteúdo harmônico reduzido da corrente de entrada (SUGA, 1993). Neste caso, esse conversor tem seu interruptor acionado em baixa frequência (duas vezes a frequência da rede elétrica, normalmente 100 Hz ou 120 Hz), através de um pulso único a cada meio ciclo da forma de onda da tensão de entrada (Figura 20), de acordo com estratégias descritas em (SUGA, 1993).

**Figura 20:** Representação da estratégia de chaveamento do Pré Regulador *Boost*.



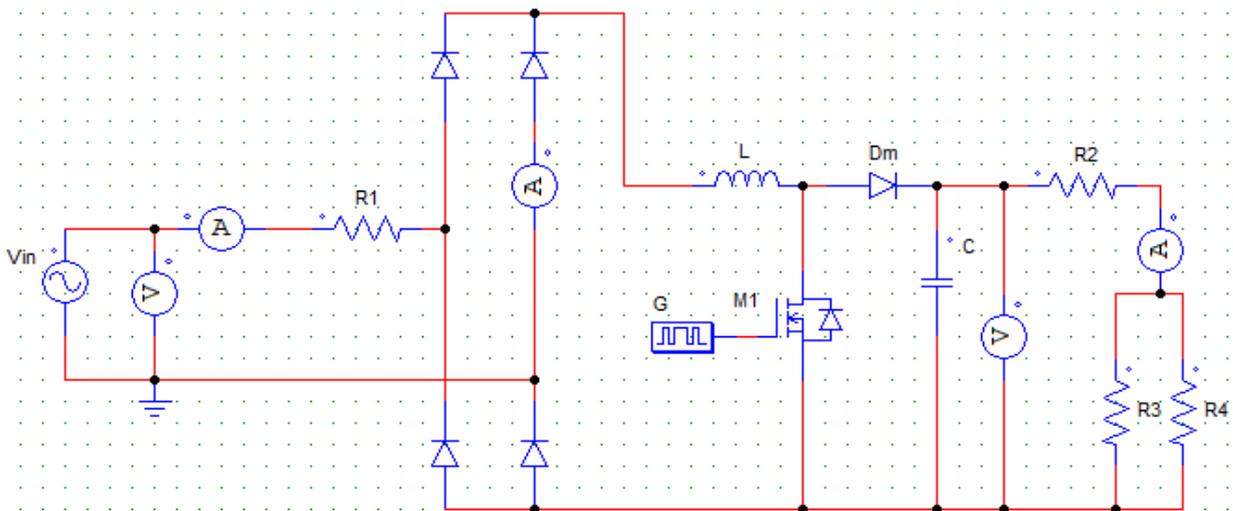
Fonte: Autor.

A técnica de chaveamento do interruptor M1 consiste em um pulso unitário de duração  $T_{on}$  no início de cada semiciclo da tensão de entrada ( $V_s = 0$  V), o que

corresponde a uma frequência de chaveamento de 120 Hz (assumindo que a frequência de  $V_s$  é de 60 Hz).

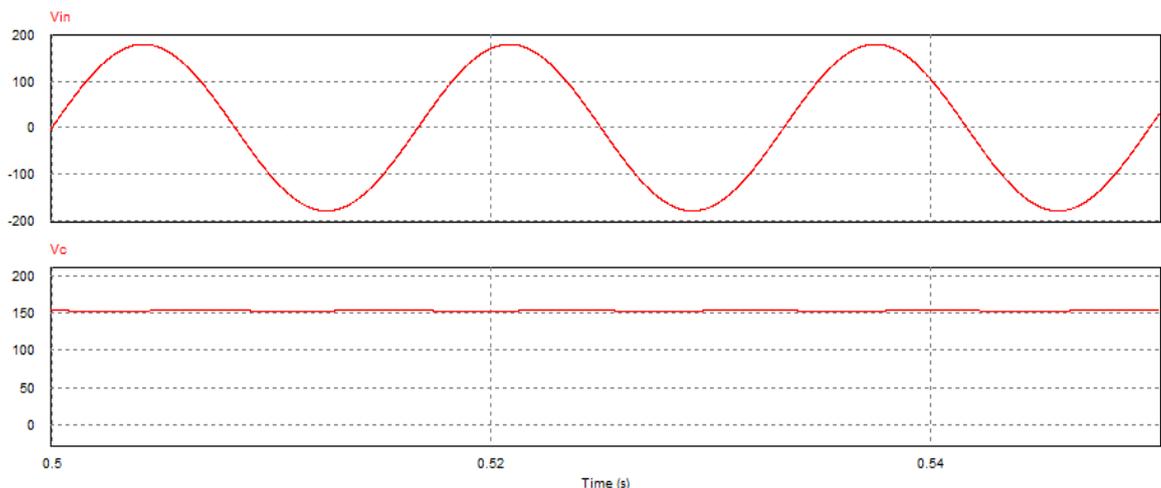
Através da análise de simulações, foram encontrados os seguintes parâmetros para o pré regulador:  $L = 20$  mH,  $C = 10$  mF e  $G = 120$  Hz, com  $T_{on} = 3,47$  ms.

**Figura 21:** Retificador com pré regulador boost



Fonte: Autor.

**Figura 22:** Formas de onda de tensão de a) Entrada e b) Saída com pré regulador

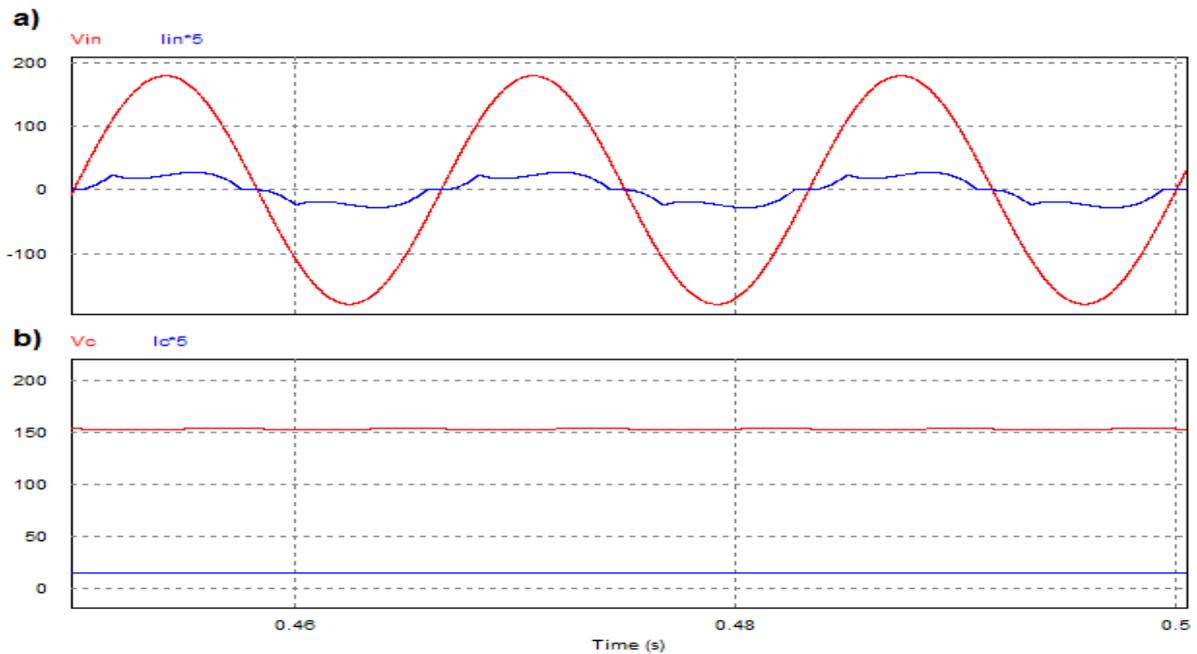


Fonte: Autor.

Ao implementar o pré regulador ao circuito como visto na Figura 21, foi possível manter o proposto da retificação em ponte com filtro capacitivo (Figura 22) e manter

as formas de onda de corrente e tensão em fase como pode se observar na Figura 23.

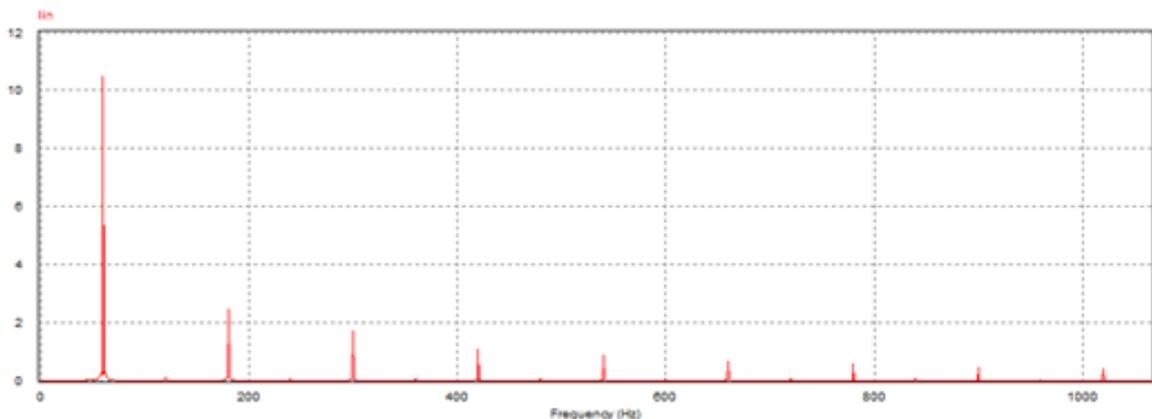
**Figura 23:** Formas de onda de tensão (Vermelho) e corrente(Azul)(x5) a) Entrada e b) Saída.



Fonte: Autor.

Com as formas de onda em fase, a distorção harmônica total (THD), é reduzida o que conseqüentemente aumenta o fator de potência (F.P). Na Figura 24, é representada a F.F.T da corrente de entrada ( $I_{in}$ ) do circuito com pré regulador, e é possível observar que as harmônicas ímpares não ultrapassam 25% da frequência fundamental (60 Hz) fazendo o circuito tenha um elevado fator de potência.

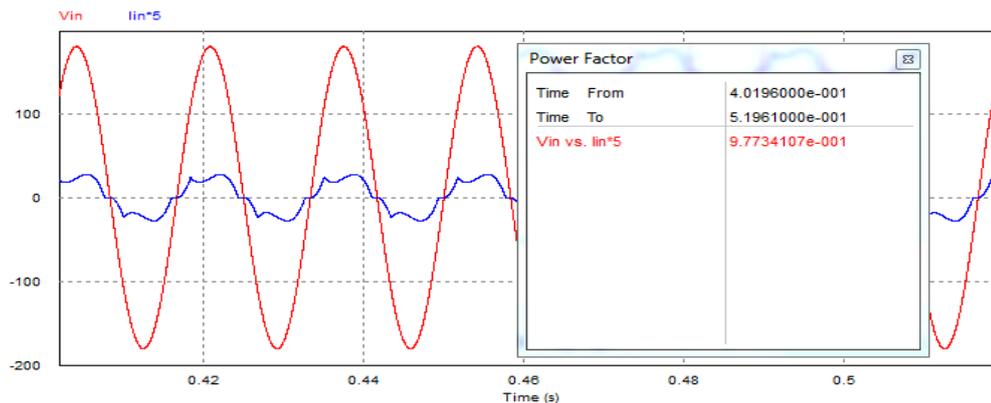
**Figura 24:** F.F.T. (*Fast Fourier Transform*) da corrente de entrada.



Fonte: Autor.

Realizada a análise da F.F.T do circuito, visto na Figura 24, foi executada o cálculo da F.P através do *software* PSIM, como pode se observar na Figura 25, com esse cálculo observa se que com a implementação do pré regulador *boost* o fator de potência do circuito atinge 0,977 tornando assim o circuito mais eficaz para filtragem da tensão e corrente do circuito.

**Figura 25:** Cálculo de F.P feito através do PSIM.



Fonte: Autor.

## 5. CONCLUSÃO

Com a realização do atual trabalho, constata-se que com a retificação utilizando o filtro capacitivo ocorre a defasagem e a injeção de harmônicos a rede elétrica o que torna a qualidade de energia elétrica reduzida, acarretando problemas na alimentação de equipamentos. Após a implementação do pré regulador *boost*, foi possível observar que houve uma melhora significativa na correção da defasagem e distorção harmônica, elevando o fator de potência do circuito.

A injeção de Harmônicos na rede elétrica, acarreta uma serie de problemas na rede em geral, para que essa injeção seja controlada, além das normas propostas pela IEEE, a ANEEL inspeciona constantemente o nível de qualidade de energia para fazer o levantamento da qualidade total no fornecimento de energia das concessionárias, analisando forma geral da onda, THD da rede e interferências na rede afim de atender e tornar o fornecimento de energia um recurso mais seguro e de qualidade.

Com o isolamento que ocorreu no ano de 2020, não foi possível obter os valores a partir das montagens na bancada de ensaios, mas após realizar a modelagem matemática, simulações com *software*, adequações do circuito e comparações com

os resultados dos manuais, foi possível estabelecer um padrão de proximidade entre eles. A partir dessa análise, a proposta é que seja realizada a montagem na bancada para análises mais reais dos circuitos e levado em consideração os efeitos de cada componente no circuito após o fim do isolamento pela COVID-19 e reabertura das instituições de ensino superior.

## **ABSTRACT**

This article deals with the theoretical-practical analysis of an experiment on the power electronics bench in the electrical engineering course laboratory at UniAcademia. Initially, a historical description of the invention of power semiconductors is made, such as: Rectifier Diodes, SCRs, TBJs, TRIACs, GTOs, MOSFETs and IGBTs. A description was made of the panel used to carry out the proposed practice, its main applications, as well as the main components used in this work. The practice proposed for the study was an experiment No 5A, in which an uncontrolled rectifier is assembled with a purely resistive load, and subsequently the insertion of a capacitive filter at the rectifier output. After the publication, the PF correction and THD analysis generated by the capacitive filter were carried out, proposing a pre-regulator for filtering the voltage and current of the circuit. The objective of this work is to apply theoretical knowledge acquired behind the discipline of power electronics in mathematical modeling and analysis of the main waveforms. From computer simulations, comparisons of the values obtained by calculations of theoretical modeling were made with the results by simulation of PSIM software

**Keywords:** Rectifier bridge, Total Harmonic Distortion, Power Factor, Converter, Pre-Regulator boost.

## **REFERÊNCIAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica, Revisão 8, vigente a partir de 01/01/2017.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. 10. ed. São paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

---

DIAS, M. P. **Avaliação do emprego de um pré-regulador boost de baixa frequência no acionamento de leds de iluminação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

DE LORENZO. **De Lorenzo: engineering training solutions**, 2020. Disponível em: <<https://www.delorenzogloba.com/documenti/prodotti/dca201.1-diodes-eng.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2020.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

HART, D. W. Hart. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. Porto Alegre: Bookman, 2012.

IEC 61000-3-2: “**Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current < 16A per phase)**”. International Electrotechnical Commission, 2015.

IEC/TR 61000-3-4: “**Compatibilidade Eletromagnéticas (CEM) – Parte 3-4: Limites. Limitação das emissões de correntes harmônicas nas redes de baixa tensão para equipamentos com corrente atribuída superior a 16 A**”. International Electrotechnical Commission, 2015.

IEEE-519-2014: **IEEE práticas e requisitos recomendados para o controle de harmônicos em sistemas de energia elétrica**.

LEÃO, R., SAMPAIO, R., ANTUNES, F. **Harmônicos em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier. 2014.

NOGUEIRA, F. J. **Notas de aula de eletrônica de potência**. Juiz de Fora: Uniacademia, 2019.

NOGUEIRA, F. J. **Controladores de leds para iluminação pública com elevado fator de potência comutados no dobro da frequência da rede elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron, 1999.

SUGA, I.; KIMATA, M.; OHNISH, Y.; UCHIDA, R. “**New Switching Method for Single: phase CA to DC Converter**”. Power Conversion Conference. Yokohama – Japão, 1993.