



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EEL7074 - ELETRÔNICA DE POTÊNCIA I  
RELATÓRIO 2

# Retificadores de Meia Onda e Onda Completa com Diodos e carga R, RL e RC

*Jade Oumura Melo*  
*Rafael Pintar Alevato*  
*Rafael Ruiz Peroni*  
*Vinícius Felipe de Oliveira da Silva*

Professor André Luís Kirsten

9 de Outubro de 2018

# 1 INTRODUÇÃO

Este documento tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de vários experimentos com circuitos retificadores. Foram analisados os seguintes circuitos:

- Retificador de Onda Completa com Carga R
- Retificador de Onda Completa com Carga RL
- Retificador de Onda Completa com Carga RC

Retificadores são circuitos que transformam tensão alternada em contínua e são úteis para várias aplicações de motores a eletrônicos. O retificador de onda completa rebate a parte negativa da tensão de entrada para cima, ficando positiva. O relatório vai descrever cada circuito dentro dos seguintes tópicos:

- Análise Teórica - Princípios de funcionamento e descrição dos circuitos.
- Simulação - Simulação dos circuitos.
- Experimento - Descrição dos experimentos e análise dos resultados obtidos.
- Análise Matemática e Numérica - Dedução de fórmulas, resoluções de circuitos, aplicações numéricas para cálculos e análises gráficas e comparação com os resultados experimentais.

## 2 ANÁLISE TEÓRICA

### 2.1 FATOR DE POTÊNCIA E A TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

Segundo a Série de Fourier, qualquer sinal periódico pode ser decomposto em uma soma de sinais senoidais. A equação abaixo representa uma corrente periódica decomposta na série de Fourier. A primeira parcela representa o valor médio e a segunda parcela representa o valor fundamental e a somatória dos harmônicos.

$$I_{int}(t) = I_{med} + \sum_{h=1,2,\dots}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \phi_h) \quad (1)$$

Os harmônicos são formas de onda senoidais com frequências múltiplas ( $h = 2, 3, 4, \dots$ ) da frequência em que o sistema opera normalmente (frequência fundamental).

O fator de potência depende da taxa de distorção harmônica descrita pela seguinte equação:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cos(\phi_1) \quad (2)$$

A taxa de distorção harmônica (THD) é a relação entre o valor RMS das componentes harmônicas e da componente fundamental:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{\sqrt{I_1^2}} \quad (3)$$

### 2.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA R

O retificador de onda completa tem como objetivo ter uma menor distorção harmônica do que o retificador de meia onda e aumentar o nível contínuo, porém é mais caro em sua construção. Nós estudamos potência, tensão e corrente tanto na entrada quanto na carga, porém o ênfase deste relatório está na parte do estudo da entrada de energia. Destaca-se que os circuitos estudados não precisam de transformador na entrada, sendo interessantes nestes caso devido por exemplo à redução de custo. Apesar disso, em nossos experimentos havia um transformador para abaixar a tensão de entrada da rede para 110 V RMS.

O circuito a ser estudado encontra-se abaixo (figura 1). Nele, pode-se perceber uma fonte de tensão alternada ligada à uma ponte de diodos, e ligada a uma carga puramente resistiva.

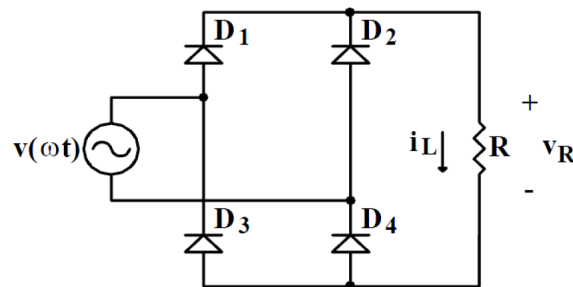


Figura 1: Retificador de onda completa com carga R

Considerando a forma de onda  $v$  senoidal, quando a tensão  $v_D$  for positiva, os diodos 1 e 4 (D1 e D4) estarão conduzindo (diretamente polarizados), já os diodos 2 e 3 (D2 e D3) estarão em aberto. Por outro lado quando a tensão  $v$  for negativa, os diodos 2 e 3 (D2 e D3) estarão conduzindo e os diodos 1 e 4 (D1 e D4) estarão em aberto. Este funcionamento está mostrado nas figuras 2 e 3.

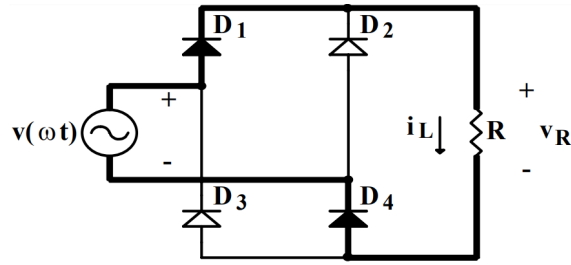


Figura 2: Ciclo positivo de um retificador de onda completa com carga R

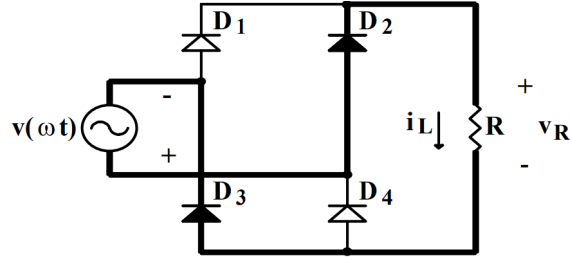


Figura 3: Ciclo negativo de um retificador de onda completa com carga R

Desta maneira, para qualquer polaridade de  $v_R$ , a corrente  $i_L$  circula num único sentido em R e por isto, a corrente em R é contínua. Temos somente os semi-ciclos positivos na saída, como pode ser visto na figura 4.

Também, a tensão e a corrente na carga não estão defasadas e não há harmônicas além da frequência fundamental, e portanto o fator de potência para esta carga é 1 e o THD igual a zero. Isto se espelha na entrada, onde o fator de potência é 1 também e o THD é zero.

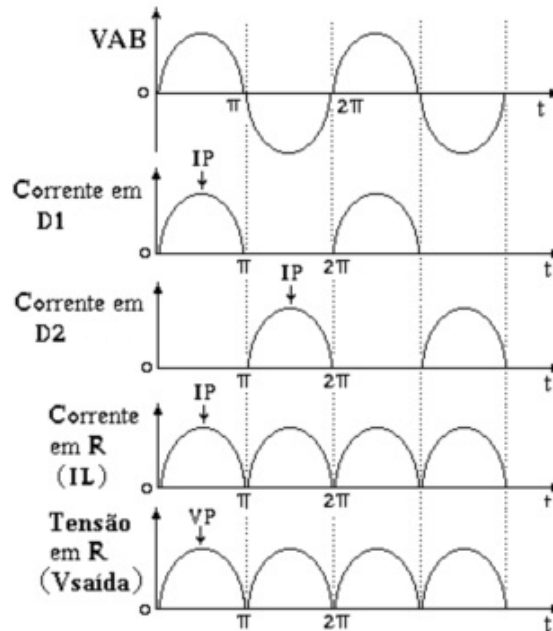


Figura 4: Formas de onda da tensão na fonte e na carga, da corrente no diodo 1, no diodo 2 e na carga

## 2.3 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA RL

O circuito a ser estudado encontra-se abaixo (figura 5). Nele, pode-se perceber uma fonte de tensão alternada ligada à uma ponte de diodos, e ligada a um resistor em série com um indutor. A diferença deste para o anterior é a presença do indutor que armazena energia da corrente e deixa a corrente com menor valor de pico a pico.

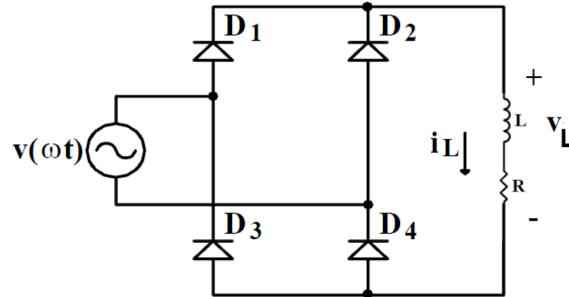


Figura 5: Retificador de onda completa com carga RL

Considerando a forma de onda  $v$  senoidal, quando a tensão  $v_L$  for positiva, os diodos 1 e 4 (D1 e D4) estarão conduzindo (diretamente polarizados), já os diodos 2 e 3 (D2 e D3) estarão em aberto. Por outro lado quando a tensão  $v$  for negativa, os diodos 2 e 3 (D2 e D3) estarão conduzindo e os diodos 1 e 4 (D1 e D4) estarão em aberto. Este funcionamento está mostrado nas figuras 6 e 7.

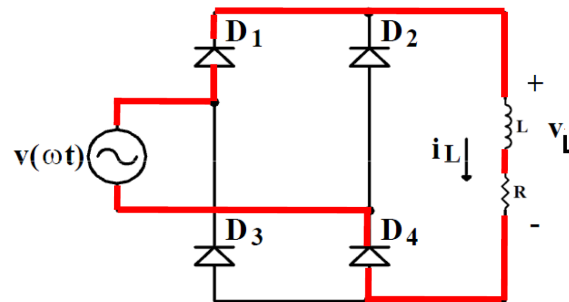


Figura 6: Ciclo positivo de um retificador de onda completa com carga RL

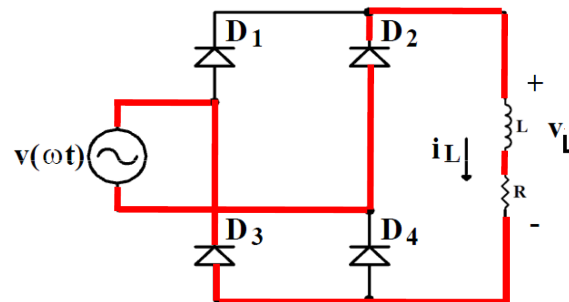


Figura 7: Ciclo negativo de um retificador de onda completa com carga RL

Desta maneira, para qualquer polaridade de  $v_L$ , a corrente  $i_L$  circula num único sentido em RL e por isto, a corrente em RL é contínua. Temos somente os semi-ciclos positivos na saída, como pode ser visto na figura 4.

A presença da indutância faz a corrente de carga estar levemente atrasada em relação à tensão de carga, o que resulta uma distorção da corrente de entrada gerando uma potência reativa, tornando o fator de potência diferente de 1, e assim o THD é diferente de zero. Essa defasagem é ilustrada na figura 8.

No entanto na entrada, corrente e tensão não sofrem defasagem, porém devido a distorção na corrente causada pela carga, a corrente de entrada também sofre distorção gerando harmônicas, ocasionando um THD maior que zero e assim um fator de potência menor que 1. Mais ilustrações sobre este fato na parte da descrição dos experimentos.

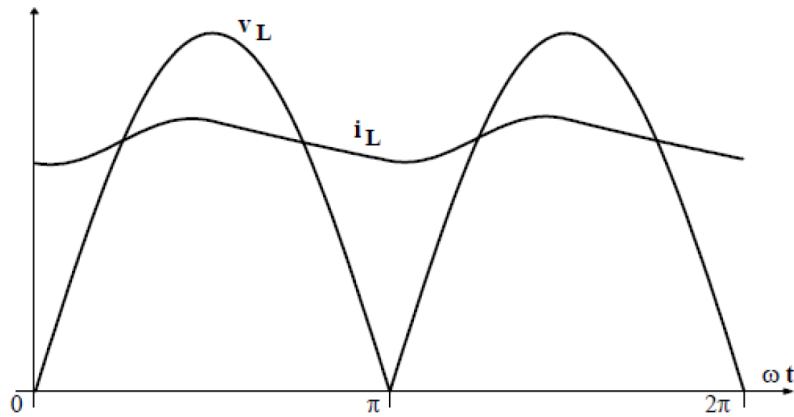


Figura 8: Formas de onda: tensão e corrente na carga RL

## 2.4 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA RC

O circuito a ser estudado encontra-se abaixo (figura 9). Nele, pode-se perceber uma fonte de tensão alternada ligada à uma ponte de diodos, e ligada a um resistor em paralelo com um capacitor.

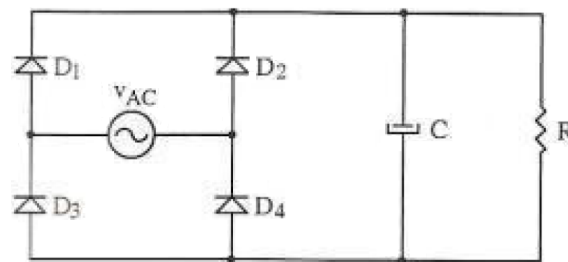


Figura 9: Retificador de onda completa com carga RC

Considerando a forma de onda  $v$  senoidal, quando a tensão  $v_L$  for positiva, os diodos 2 e 3 (D2 e D3) estarão conduzindo (diretamente polarizados), já os diodos 1 e 4 (D1 e D4) estarão em aberto. Por outro lado quando a tensão  $v$  for negativa, os diodos 1 e 4 (D1 e D4) estarão conduzindo e os diodos 2 e 3 (D2 e D3) estarão em aberto. Este funcionamento está mostrado nas figuras 10 e 11.

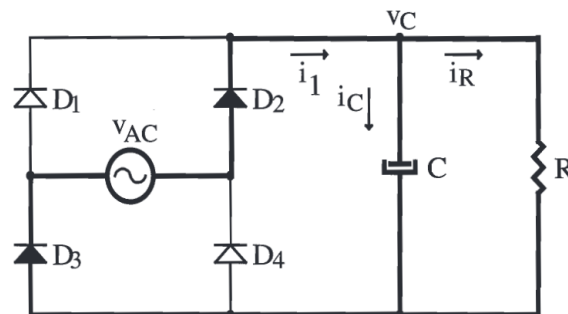


Figura 10: Ciclo positivo de um retificador de onda completa com carga RC

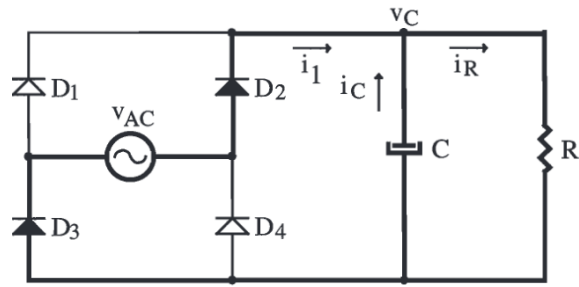


Figura 11: Ciclo negativo de um retificador de onda completa com carga RC

Há uma terceira etapa. Quando  $v_{AC}$  for menor que a tensão no capacitor ( $v_C$ ) todos os diodos da ponte retificadora estarão bloqueados. Fazendo com que a carga  $R$  seja alimentada pelo capacitor.

O capacitor se comporta como um filtro, fazendo com que a forma de onda de saída seja um sinal mais próximo de um sinal contínuo. Assim melhorando o ripple de  $v_R$

### 3 SIMULAÇÃO

#### 3.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA R

Montamos o circuito no PSIM, o qual pode ser visto na figura seguir. Consideramos o transformador e os diodos como ideais. Definimos a fonte de tensão com amplitude de  $311,127\text{ V}$  e frequência  $60\text{ Hz}$ , que é o valor encontrado na rede. O valor da resistência é igual a  $75\ \Omega$  e a relação de transformação é de 2:1.

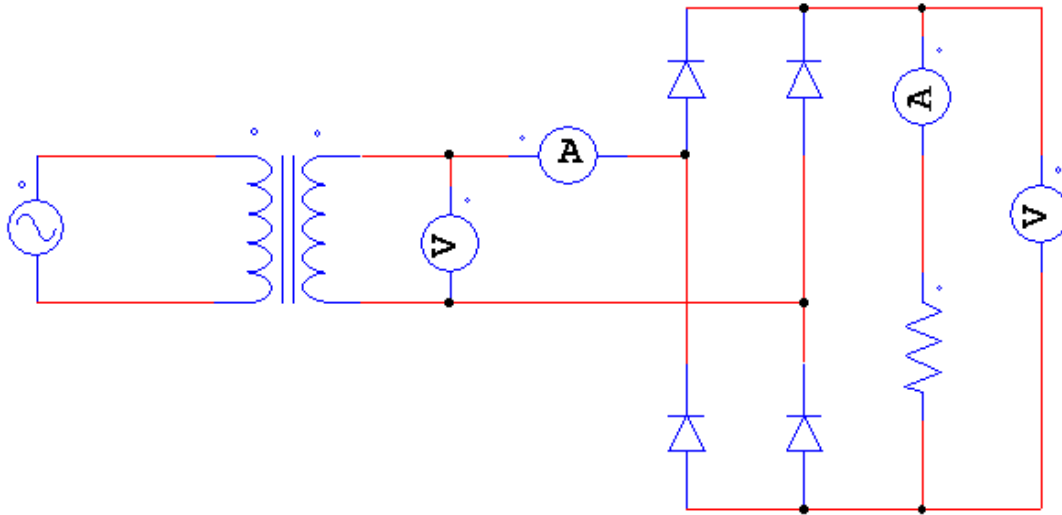


Figura 12: Retificador de onda completa em ponte com carga R

Depois de montar o circuito, simulamos o mesmo para um período de  $50\text{ ms}$ . Além disso, o valor das correntes foi multiplicado por 100 para facilitar a visualização. Vale ressaltar que, na prática, só conseguimos medir qualquer valor no secundário. Portanto, os valores de tensão e corrente de entrada não são os apresentados abaixo. No entanto, basta aplicar a relação de transformação (no caso, 2) para encontrar os valores corretos. Como o que desejamos obter não muda se pegarmos valores do secundário ou do primário e, também, para facilitar a comparação com as curvas e valores retirados do osciloscópio, mantivemos os medidores no secundário. Segue as curvas encontradas na simulação, sendo em cima o sinal de entrada e abaixo o sinal de saída. Segue também a visualização da transformada de Fourier encontrada na simulação.

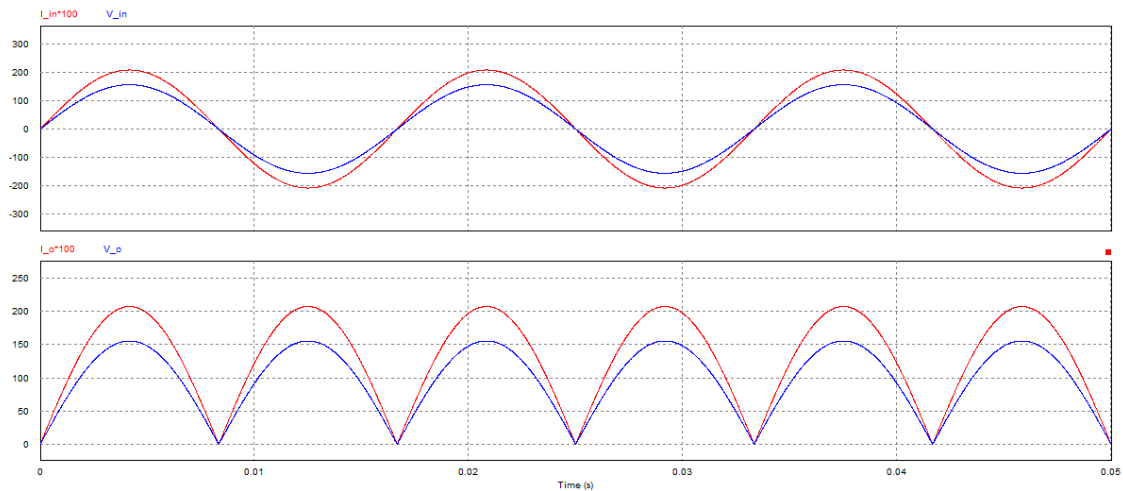


Figura 13: Tensões e correntes de entrada e saída para carga R



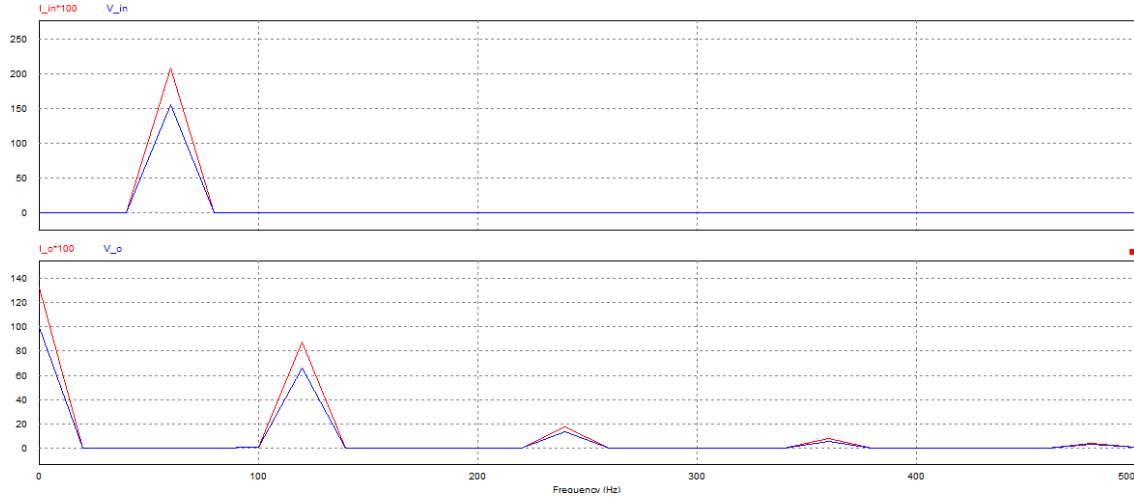


Figura 14: Transformada de Fourier para tensões e correntes de entrada e saída para carga R

Encontramos os seguintes valores calculados pelo PSIM:

$$\begin{aligned}
 P_{in} &= P_o = 161,3 \text{ W} \\
 S_{in} &= S_o = 161,3 \text{ VA} \\
 FP_{in} &= FP_o = 1 \\
 THD_{V_{in}} &= THD_{I_{in}} = 1,51e-3 \\
 THD_{V_o} &= THD_{I_o} = 797
 \end{aligned}$$

### 3.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA RL

O circuito é similar ao anterior, com única diferença de um indutor de  $500 \text{ mH}$  em série com o resistor:

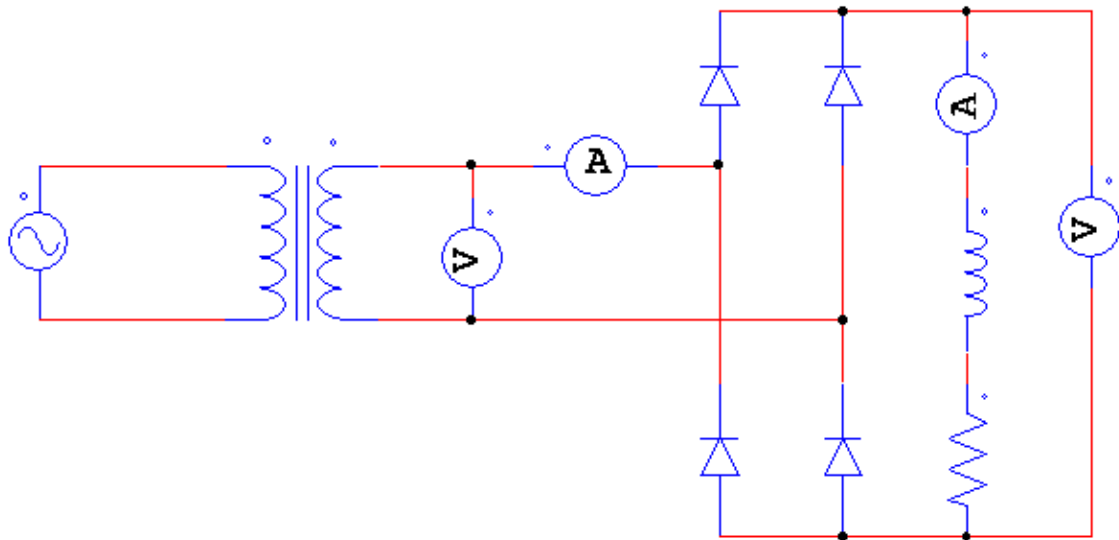


Figura 15: Retificador de onda completa em ponte com carga RL

Diferente do circuito anterior, em função do indutor, este possui um regime transitório e outro permanente. O transitório foi observado do tempo  $0s$  até  $25ms$ . Já o permanente foi observado de  $1s$  até  $1,050s$ . A partir disso, fizemos o mesmo procedimento anterior.

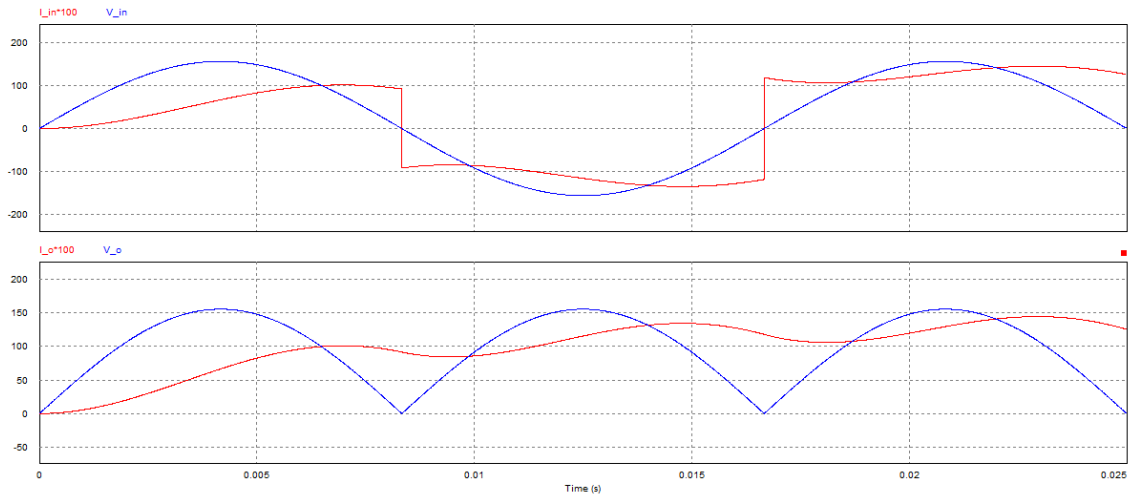


Figura 16: Tensões e correntes de entrada e saída para carga RL em regime transitório

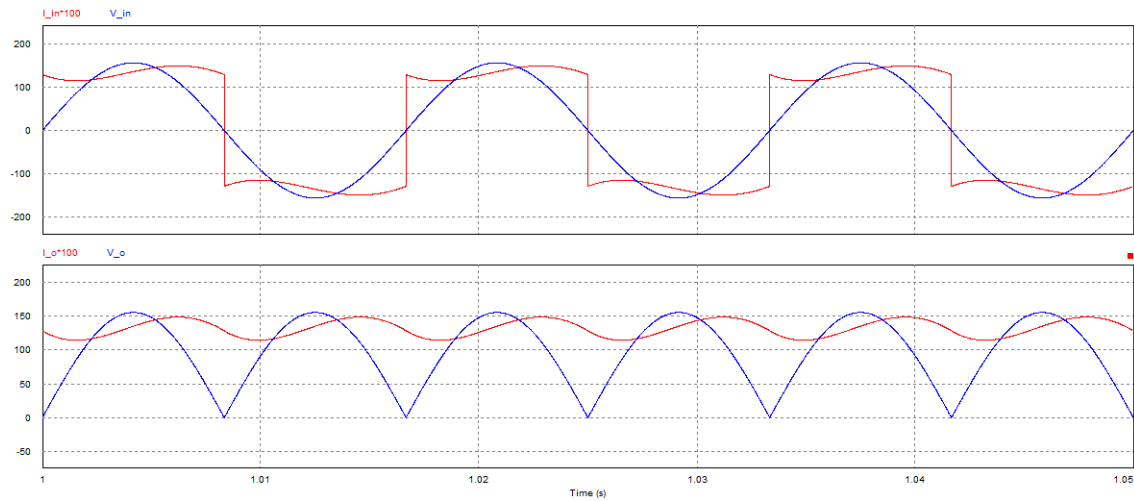


Figura 17: Tensões e correntes de entrada e saída para carga RL em regime permanente

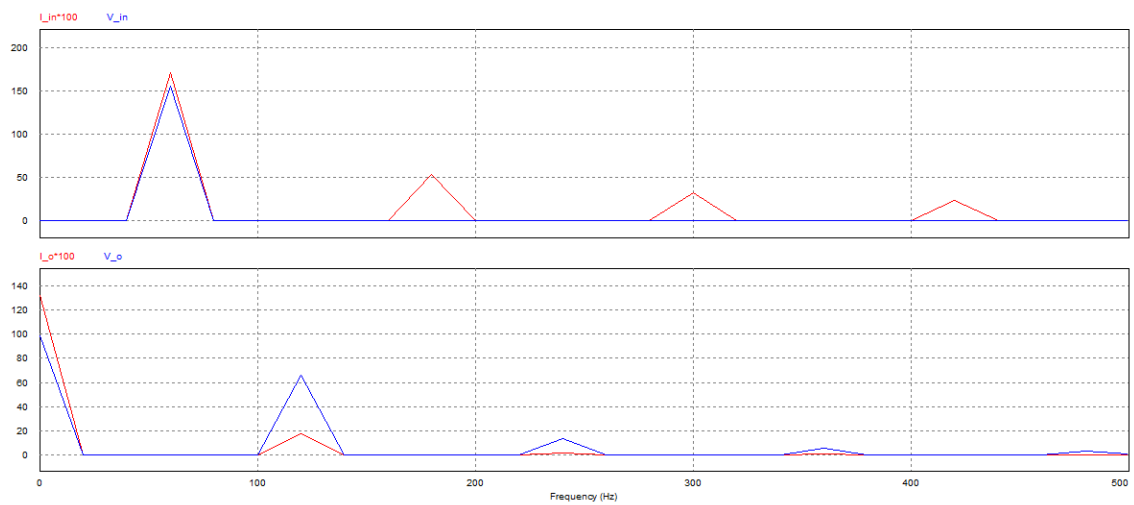


Figura 18: Transformada de Fourier para tensões e correntes de entrada e saída para carga RL

Encontramos os seguintes valores calculados pelo PSIM:

$$P_{in} = P_o = 131,9W$$

$$S_{in} = S_o = 146,0VA$$

$$FP_{in} = FP_o = 0,904$$

$$THD_{V_{in}} = 1,51e - 3$$

$$THD_{I_{in}} = 4,62e - 1$$

$$THD_{V_o} = 797$$

$$THD_{I_o} = 9280$$

### 3.3 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM FILTRO CAPACITIVO

O circuito é semelhante ao primeiro, com um capacitor de  $500 \mu$  em paralelo ao resistor.

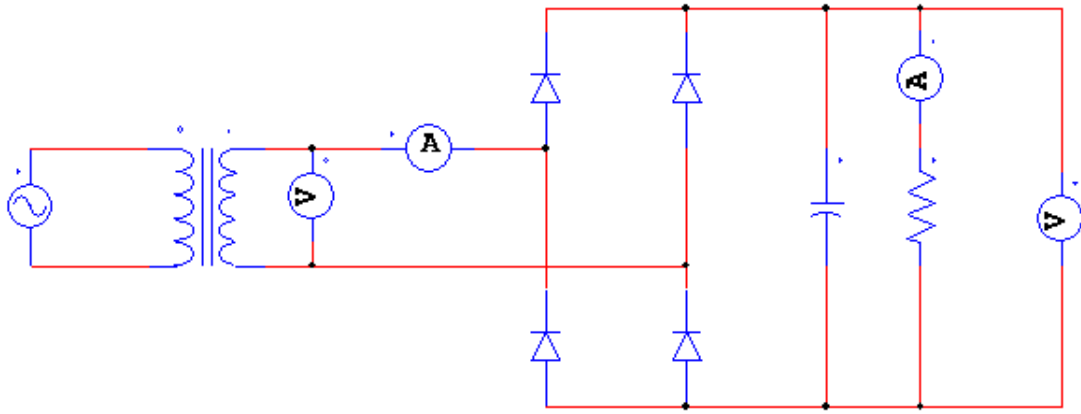


Figura 19: Retificador de onda completa com filtro capacitivo

Assim como no circuito anterior, temos um regime transitório e outro permanente. Os intervalos de tempo foram os mesmos setados anteriormente. A corrente de entrada foi multiplicada por 10 e a de saída por 100.

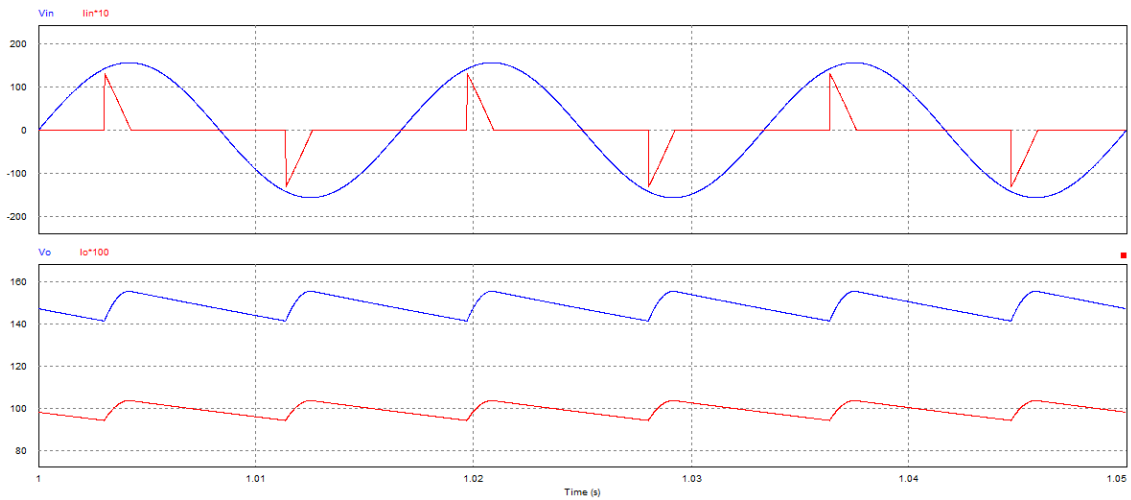


Figura 20: Tensões e correntes de entrada e saída para circuito com filtro capacitivo

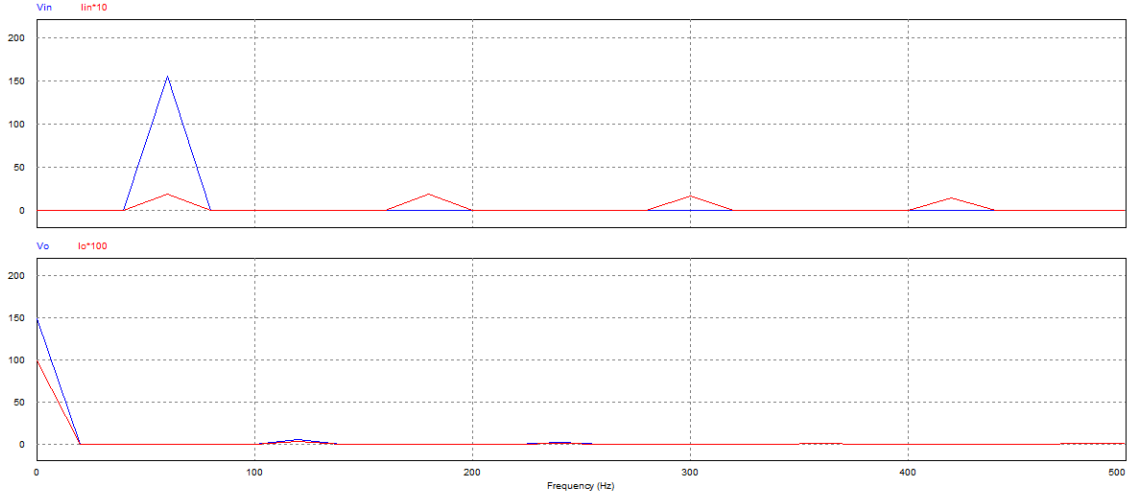


Figura 21: Transformada de Fourier para tensões e correntes de entrada e saída para circuito com filtro capacitivo

Encontramos os seguintes valores calculados pelo PSIM:

$$P_{in} = P_o = 147,2 \text{ W}$$

$$S_{in} = S_o = 325,2 \text{ VA}$$

$$FP_{in} = 0,425$$

$$FP_o = 1$$

$$THD_{V_{in}} = 1,51e - 3$$

$$THD_{I_{in}} = 1,88$$

$$THD_{V_o} = THD_{I_o} = 3774$$

Além destes resultados, encontramos o valor do fator de distorção. Pelo PSIM, os valores foram os seguintes.

$$FO_{V_o} = 0,097$$

$$FO_{I_o} = 0,095$$

$$FO_{V_{in}} \rightarrow \infty$$

$$FO_{I_{in}} \rightarrow \infty$$

## 4 EXPERIMENTO

### 4.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA R

Em nossa bancada há um transformador que já distribui 110 V eficaz em sua entrada. Também há um osciloscópio com uma ponteira para medir tensão e um medidor de corrente. Fora isso foram utilizados cabos para ligar o circuito. Foi utilizado indutores e resistores da própria bancada.

Focamos o experimento em medir a corrente, tensão e potência na entrada, para ver conceitos interessantes aplicados como THD e fator de potência.

Foi montado o circuito em questão com  $R = 75 \Omega$ , medindo a tensão e corrente na saída do transformador. Com o objetivo de extrair a potência ativa e a potência aparente, de forma a calcular o fator de potência na nossa fonte, fez-se a multiplicação dos canais 1 e 2 do osciloscópio (tensão e corrente, respectivamente), obtendo a potência instantânea. Assim, aferindo o valor RMS cíclico do canal 1 (tensão, em amarelo) e do canal 2 (corrente, em azul), assim como o valor médio cíclico do canal MTM (potência, em vermelho), temos todos os valores para a determinação das potências ativa e aparente.

Abaixo, podemos conferir os resultados no osciloscópio. Vale notar que as escalas foram escolhidas tal que temos pelo menos 1 ciclo completo na tela e as formas de onda ocupam mais de 70% da tela.

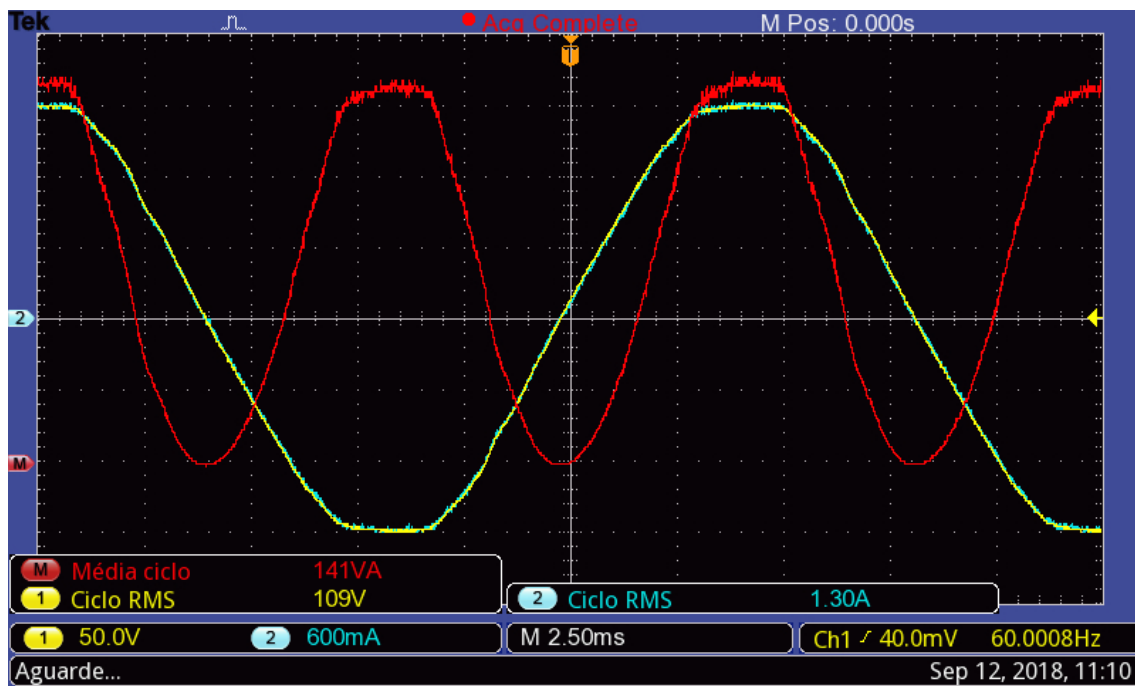


Figura 22: Tensão (amarelo), corrente (azul) e produto entre os dois (vermelho) na fonte, para carga resistiva

Aqui, o valor médio cíclico do canal MTM (vermelho) é a nossa potência ativa (valor médio da potência instantânea) e o produto entre o valor RMS do canal 1 e 2 é a nossa potência aparente. Dessa maneira, temos:

$$P = 141 \text{ W}$$

$$S = 141,7 \text{ VA}$$

O que nos dá um fator de potência de 0,9951. É interessante notar que, por coincidência, a escala utilizada para a corrente e para a tensão fizeram com que as formas de onda ficassem exatamente uma em cima da outra. Isso mostra que, para termos um fator de potência unitário, as formas de onda de tensão e corrente devem ser iguais umas as outras, com exceção de um fator de escala, e não estarem defasadas.

## 4.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA RL

Agora, adicionando um indutor  $L = 500 \text{ mH}$  à carga, fez-se as mesmas medições em nossa fonte que no experimento com a carga somente resistiva, aferindo as mesmas grandezas de forma a comparar os dois circuitos.

Abaixo, temos o resultado das medidas na tela do osciloscópio.

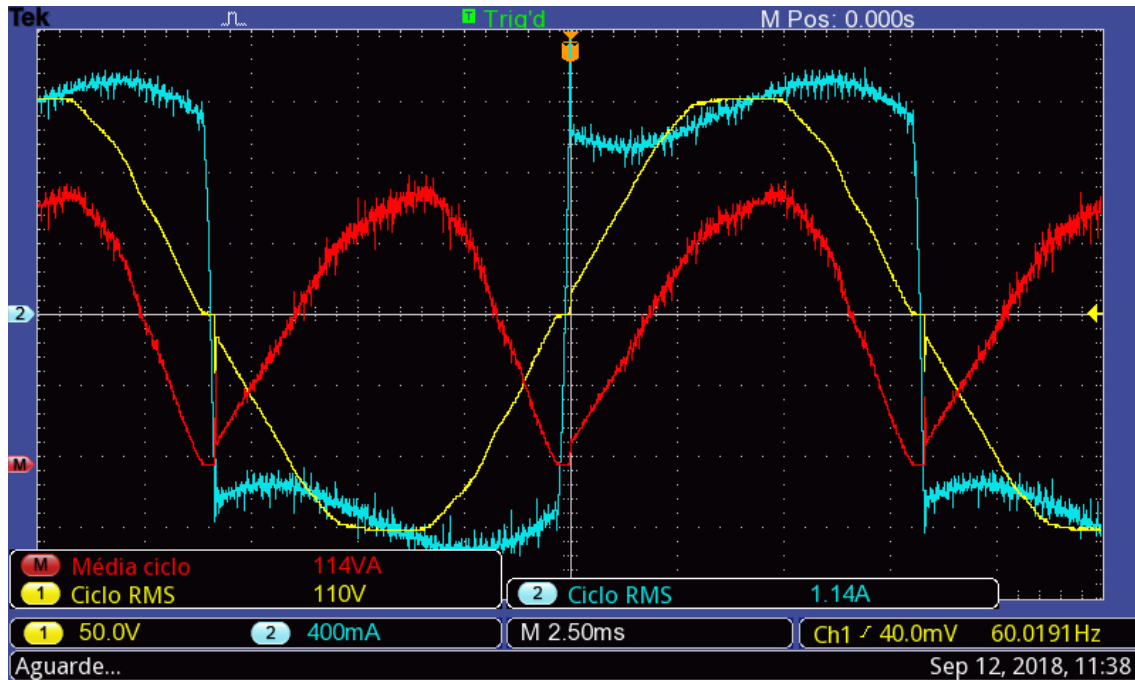


Figura 23: Tensão (amarelo), corrente (azul) e produto entre os dois (vermelho) na fonte, para carga RL

Nesse caso, temos as seguintes potências:

$$P = 114 \text{ W}$$

$$S = 125,4 \text{ VA}$$

O que nos dá um fator de potência de 0.9091. Aqui temos um fator de potência menor que 1, mas não temos uma visível defasagem entre a tensão e corrente. Isso pode ser explicado pelo fato de que a forma de onda da tensão e da corrente são diferentes, evidenciando um distorção harmônica.

Podemos calcular essa distorção harmônica fazendo  $\theta = 0$  (defasagem entre tensão e corrente nula) e portanto  $\cos(\theta) = 1$ . Assim, através da fórmula:

$$FP = \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (4)$$

Nós conseguimos calcular a THD que é 0,4582.

## 4.3 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA RC

Removendo o indutor e colocando um capacitor  $C = 500 \mu F$  em paralelo com o resistor, que agora é de  $150 \Omega$  (2 de  $75 \Omega$  em série), temos uma carga RC paralela alimentada por uma ponte completa de diodos.

Aqui, a situação é diferente do circuito RL série. No RL, o indutor forçava a corrente ser constante na carga. Agora, no RC, o capacitor força a tensão na carga ser constante. Logo, como

temos um pico de 155V na entrada de nosso retificador de onda completa em ponte, espera-se que a tensão fique um pouco abaixo desse valor em sua saída, por conta do capacitor.

Abaixo, temos a imagem da tensão e corrente no resistor, vistos com acoplamento CA, com a intenção de medir a ondulação na saída.

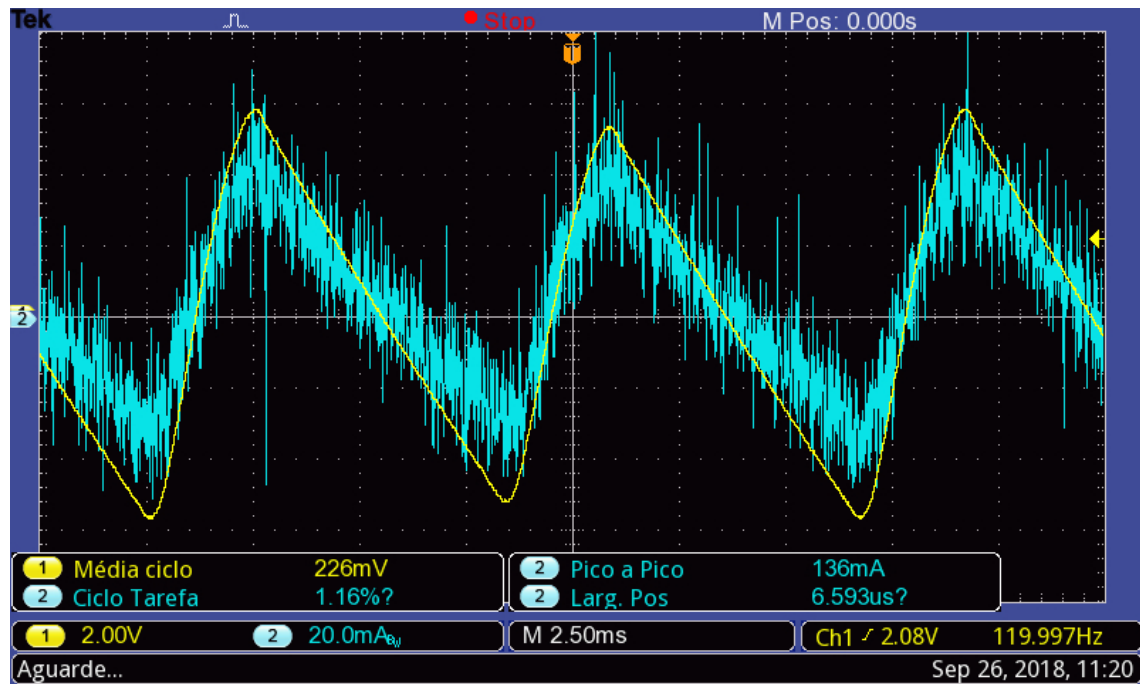


Figura 24: Tensão (amarelo), corrente (azul) no resistor paralelo ao capacitor vistos com acoplamento CA

Utilizando dos cursores de amplitude, temos uma variação pico a pico de aproximadamente 9V para a tensão e de aproximadamente 60 mA para a corrente (deve ser tal que  $\frac{9V}{150\Omega} = 60mA$ ).

De posse desses valores, mediu-se agora o valor médio da tensão e corrente no resistor. Na figura abaixo temos as formas de onda da tensão e corrente no resistor, vistos agora com o acoplamento CC.

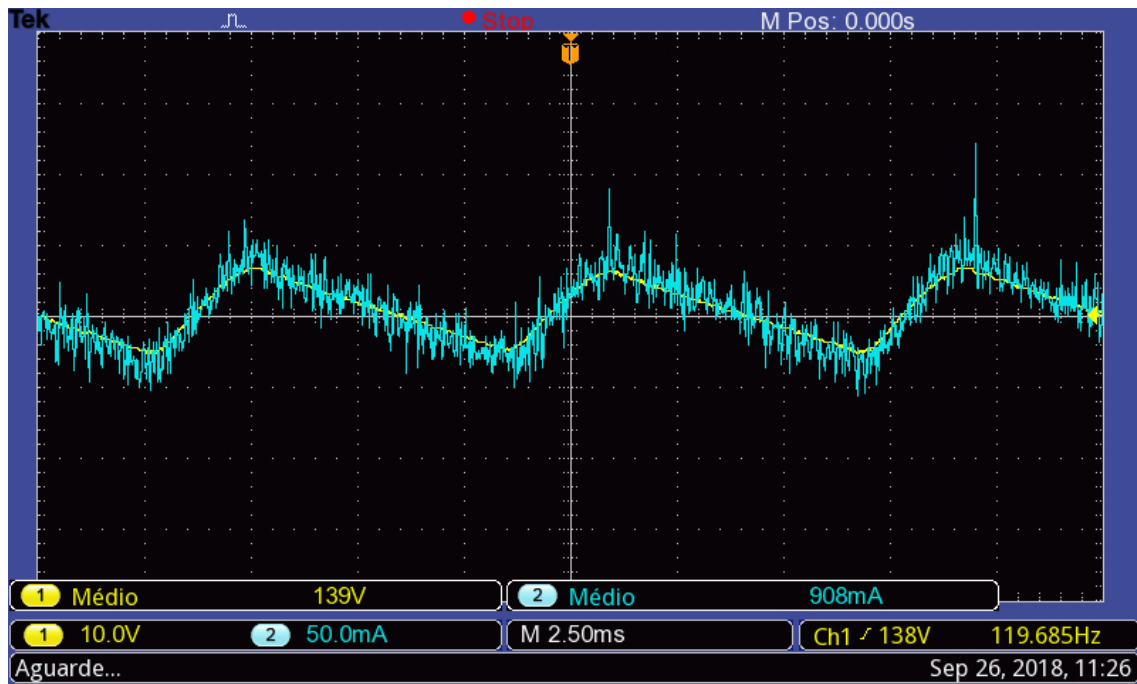


Figura 25: Tensão (amarelo), corrente (azul) no resistor paralelo ao capacitor vistos com acoplamento CC

Aqui temos pelas medições do osciloscópio um valor médio de  $139\text{ V}$  para a tensão na carga e um valor médio de  $908\text{ mA}$  para a corrente no resistor. Aqui, como a corrente média no capacitor é 0 (caso contrário sua tensão tenderia ao infinito), temos  $\frac{139\text{ V}}{150\text{ }\Omega} = 926,67\text{ mA}$  que é a corrente média no resistor. A corrente média não deu exatamente este valor por conta da precisão do osciloscópio nessa escala e do ruído na ponteira de corrente.

Como temos uma tensão média de  $139\text{ V}$  na carga e uma ondulação com  $9\text{ V}$  pico a pico, temos então um fator de ondulação de:

$$\frac{9}{139} * 100 = 6,475\%$$

Agora, colocando as ponteiras de tensão e corrente na entrada do retificador, mede-se os valores RMS de cada um e a média da multiplicação entre os 2 sinais visualizados de forma a obtermos as potências ativa e aparente, e assim calcular o fator de potência do circuito. Na imagem abaixo temos as formas de onda em questão.



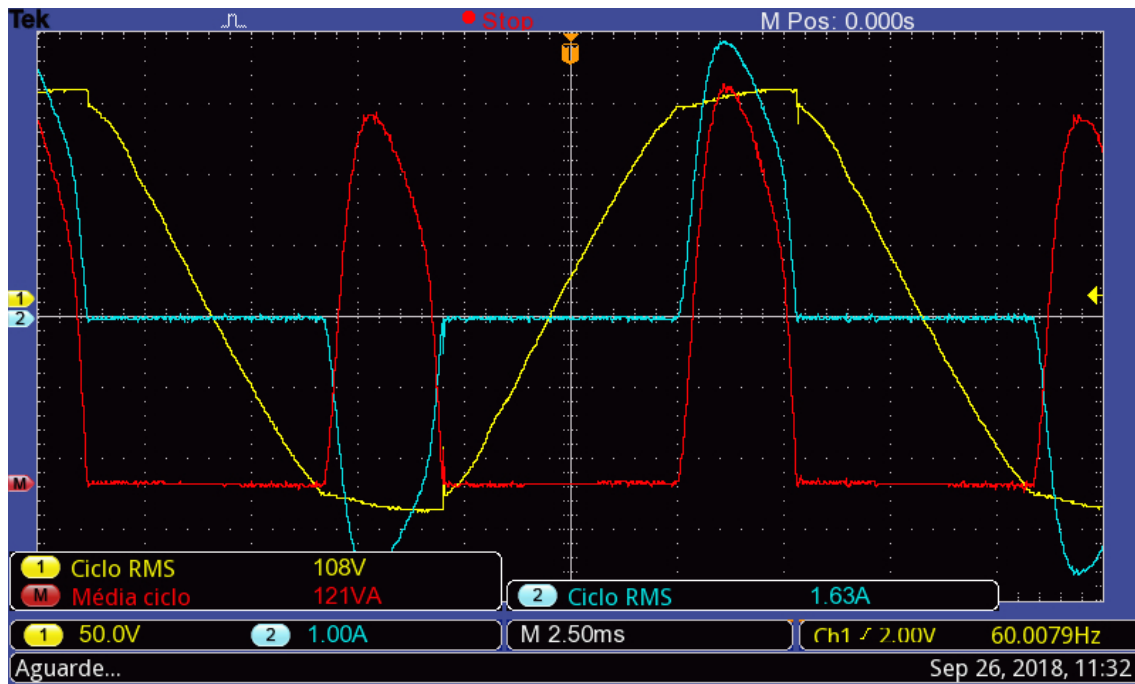


Figura 26: Tensão (amarelo), corrente (azul) e produto entre os dois (vermelho) na fonte, para carga RC

Podemos perceber que a corrente só é diferente de 0 quando a tensão de entrada está no seu valor de pico. Isso ocorre pois, quando o módulo da tensão no capacitor é maior que o módulo da de entrada, os diodos ficam abertos e então o capacitor fica livre para descarregar no resistor através de um circuito RC básico. Quando o módulo da tensão de entrada fica maior que a do capacitor, temos um caminho de diodos que ira se fechar e então estaremos impondo uma tensão no capacitor. Dessa maneira, o capacitor "carrega" com um pico de corrente, até chegar no pico de tensão da entrada novamente que teoricamente seria 155V, para então abrir os diodos e então descarregar através do RC novamente.

Podemos dizer aqui que, toda a carga  $Q$  que o capacitor descarregou no resistor durante uma parte do ciclo, é reposta pela fonte de entrada na outra parte do ciclo. Em outras palavras, quando a corrente de entrada é 0, temos o capacitor descarregando no resistor e quando a corrente na entrada está em seu pico, temos o capacitor recuperando suas cargas que foram "gastas" até o momento no resistor.

Quanto maior a capacitância, maior a relação  $C = \frac{Q}{V}$ , assim temos que para um mesmo número de cargas,  $Q$  descarregadas no resistor, temos uma menor variação de tensão no capacitor (demora mais para descarregar). Se temos uma menor variação de tensão para o descarregamento do capacitor no resistor, temos que o caminho de diodos vai fechar somente bem próximo do pico de tensão da entrada. Dessa maneira, a janela de tempo que se tem para repor essa mesma carga  $Q$  no capacitor é bem menor e como  $I = \frac{dQ}{dt}$ , temos um pico maior e mais estreito de corrente.

Esses picos de corrente distorcem a tensão de entrada como podemos ver na imagem do osciloscópio, sendo um grande criador de terceiras harmônicas no sistema.

Para o cálculo do fator de potência ( $\frac{P}{S}$ ), precisamos da potência aparente e da potência ativa. Assim, simplesmente multiplicaremos os valores "ciclo RMS" do canal 1 e do canal 2 para obtermos a potência aparente e então simplesmente pegaremos o valor "média ciclo" do canal MTM que é  $CH1 \cdot CH2$ . Dessa maneira:

$$P = 121 \text{ W}$$

$$S = 176 \text{ VA}$$

$$FP = 0,6875$$

O que é um fator de potência bem baixo. Se considerarmos que a corrente tem componente fundamental em fase com o sinal de entrada de tensão (supondo puro 60 Hz), podemos calcular

a THD utilizando a mesma fórmula utilizada no circuito RL que relaciona FP a THD do sinal. Assim, teremos:

$$THD = 1,0563$$

Evidenciando uma grande distorção harmônica. Se aumentássemos o valor do capacitor, teríamos os picos de corrente ainda maiores e mais estreitos como explicado e portanto teríamos uma maior distorção harmônica diminuindo ainda mais o fator de potência do circuito. Em outras palavras, para diminuir a ondulação na carga, paga-se com diminuição do fator de potência e grandes picos de corrente que poluem a rede elétrica com terceiras harmônicas.

## 5 ANÁLISE MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Para todas as análises numéricas utilizamos a linguagem Python, inclusive para traçar os gráficos. Os códigos utilizados em todos os laboratórios está disponível no github abertamente no seguinte link:

<https://github.com/R-P-A/EEL7074-Power-Electronics>

### 5.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA EM PONTE COM CARGA R, RL, RC

Após o experimento realizado, salvamos os dados do osciloscópio para análise numérica e verificação dos dados coletados. O osciloscópio salva além de uma captura de tela, dados de como o osciloscópio estava configurado e um arquivo CSV com o ponto a ponto de todas as curvas obtidas.

Em posse do arquivo CSV, começamos o trabalho de primeiro reproduzir o gráfico original. Para reproduzir os gráficos foi pego os vetores de pontos e plotados com Python conforme os gráficos abaixo. Foram gerados gráficos para as entradas dos três circuitos, com carga resistiva (carga R), carga resistiva e indutiva (carga RL) e carga resistiva e capacitiva (carga RC) e também para a saída do circuito com carga RC. Observar que no retificador de carga RC a capacitância está em paralelo com a resistência, servindo de filtro como apresentado na figura 9.

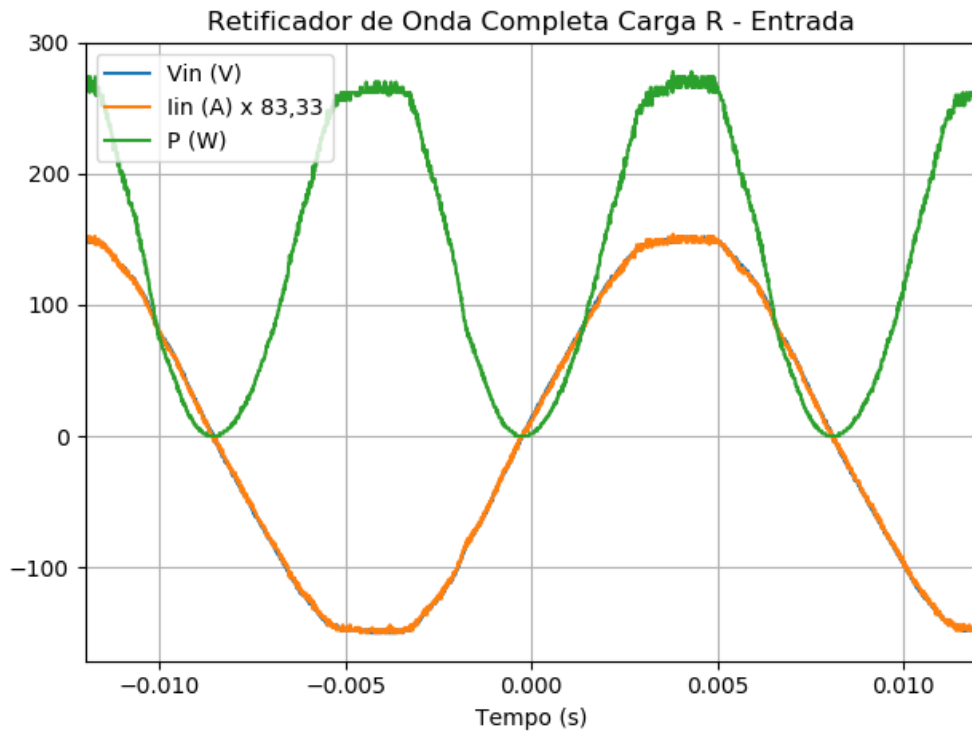


Figura 27: Tensão, Corrente e Potência na entrada para o retificador com carga resistiva.

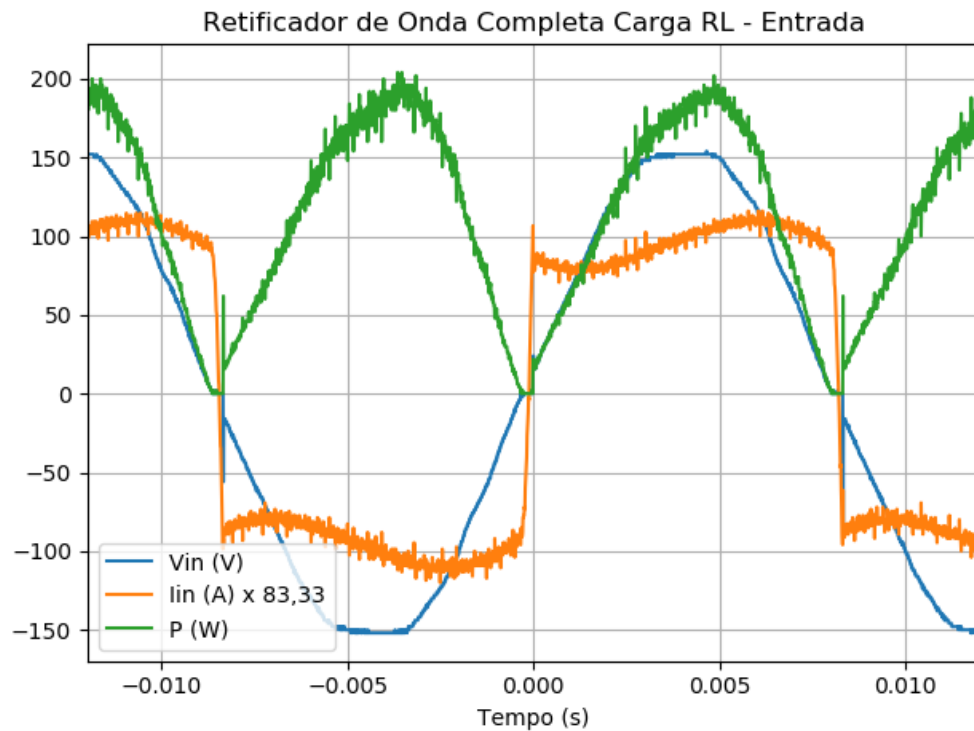


Figura 28: Tensão, Corrente e Potência na entrada para o retificador com carga resistiva e indutiva.

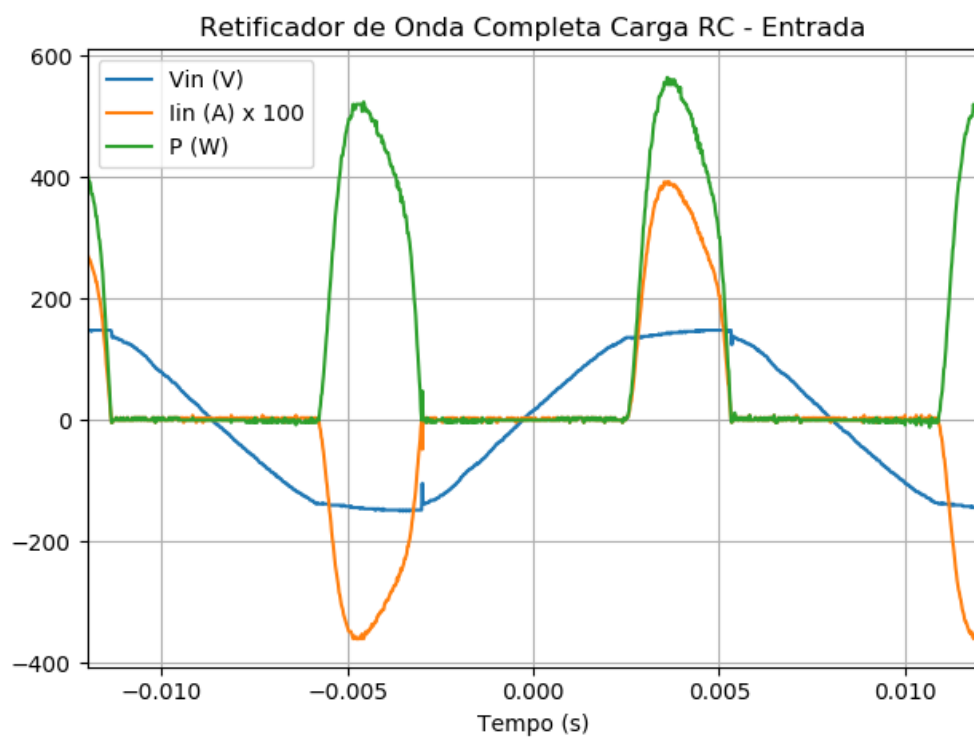


Figura 29: Tensão, Corrente e Potência na entrada para o retificador com carga resistiva e capacitiva.

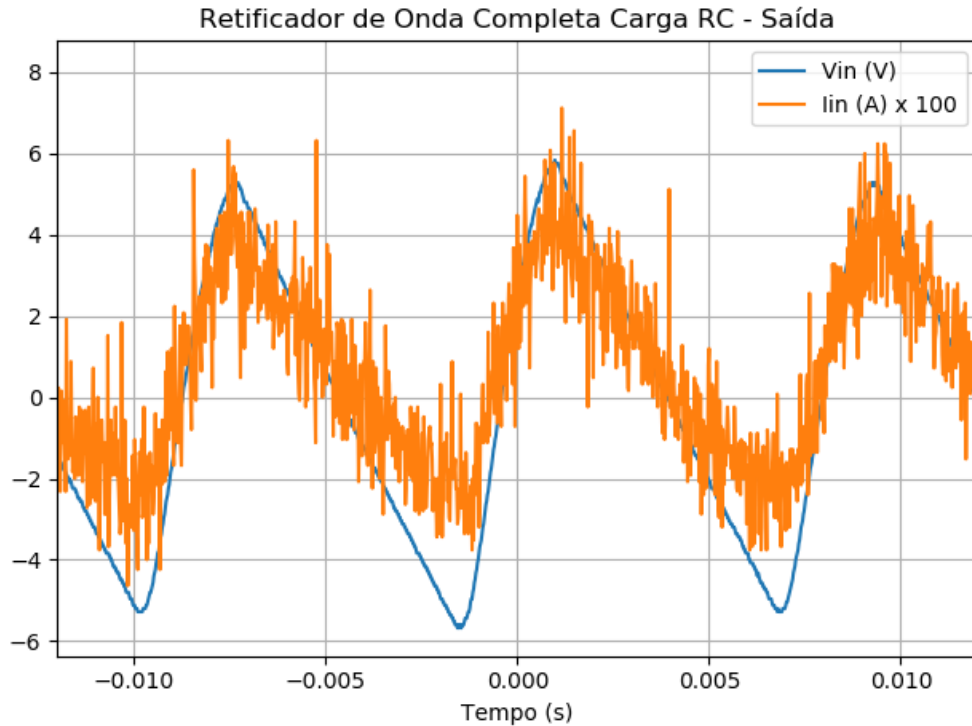


Figura 30: Tensão e Corrente na saída para o retificador com carga resistiva e indutiva.

Observar que em ambas as Figuras 27 e 28 a corrente foi multiplicada por um fator de 83,33 e na figura 29 por 100 para atender a mesma escala utilizada no osciloscópio. Na figura 30 está sendo analisado a variação da corrente e tensão de saída do circuito RC. Este é o mesmo gráfico obtido com acoplamento CA da figura 24, eliminando a componente CC de ambos os circuitos. Este gráfico foi plotado desta maneira pois o interesse do laboratório estava nos valores pico a pico de ambas as ondas. As formas de ondas plotadas com nosso algoritmo em Python estão praticamente idênticas as formas vistas no osciloscópio, cumprindo este objetivo.

A vantagem de se trabalhar com os pontos, é a praticidade para o cálculo da FFT (Fast Fourier Transform), ou seja, a transformada discreta de Fourier que é uma amostragem da transformada de Fourier em tempo discreto. Assim, escrevemos um código para realizar estes plots também, junto com cada entrada para comparação do sinal.

O osciloscópio sempre gera 2500 amostras. Utilizando um tempo de 2,5 ms por divisão do osciloscópio, como são 10 divisões de tempo, dá um tempo total de 25 ms, o que gera uma frequência de amostragem de 100 kHz e uma resolução de frequência (frequência de amostragem / amostras) de 40 Hz. Isto significa que os pontos de nossa FFT serão calculados de 40 Hz em 40 Hz, o que gerará um erro muito grande, já que nosso sinal tem frequência fundamental em 60 Hz. Assim para conseguir acertar este erro, pegamos um número de amostras até a resolução ser maior que 40 (diminuindo o número de amostras) e divisor de 60 que neste caso é 1667 amostras que nos dá uma resolução de frequência de 60 Hz.

Para o experimento com carga resistiva capacitiva, nós utilizamos 5 ms por divisão, o que nos dá um tempo total de 50 ms. Assim a frequência de amostragem é 50 kHz o que nos dá uma resolução de frequência de 20 Hz. Como 20 é divisor de 60, que é a frequência fundamental (60 Hz) do nosso circuito, podemos pegar todos os pontos para realizar a fft, já que os valores da transformada andarão de 20 Hz em 20 Hz, dando maior resolução no nosso gráfico.

Para calcular as transformadas utilizamos função do Python que nos entrega um vetor não normalizado com todos os pontos da transformada. Com este vetor, normalizamos a energia do sinal e então plotamos os gráficos como vistos abaixo.

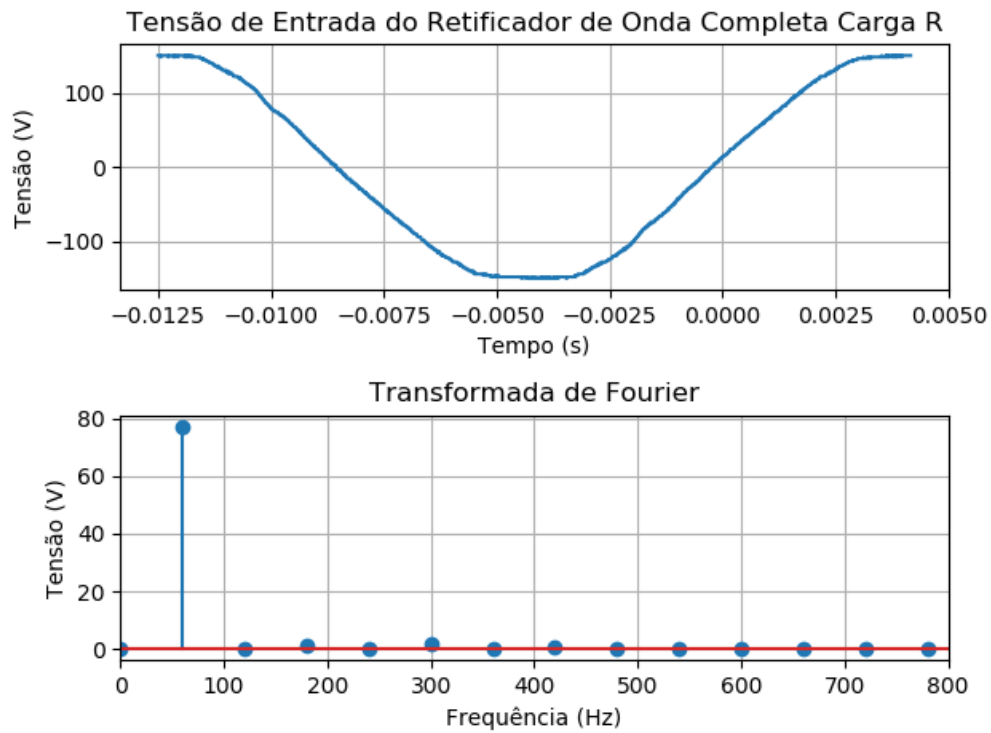


Figura 31: Transformada de Fourier da Tensão de Entrada para o retificador com carga resistiva

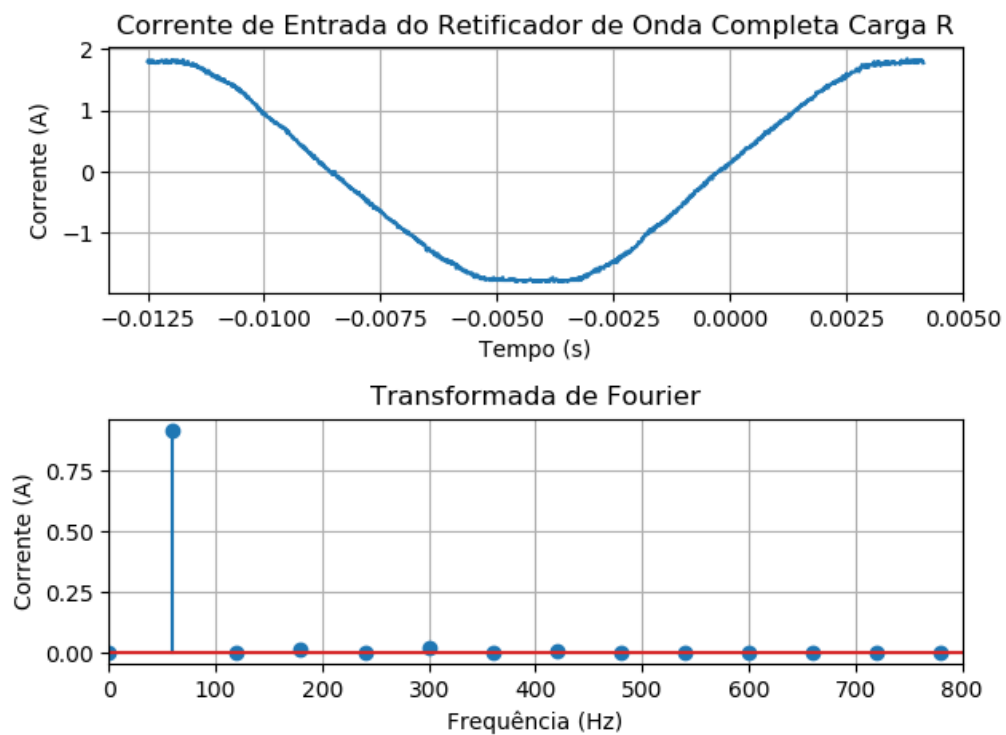


Figura 32: Transformada de Fourier da Corrente de Entrada para o retificador com carga resistiva

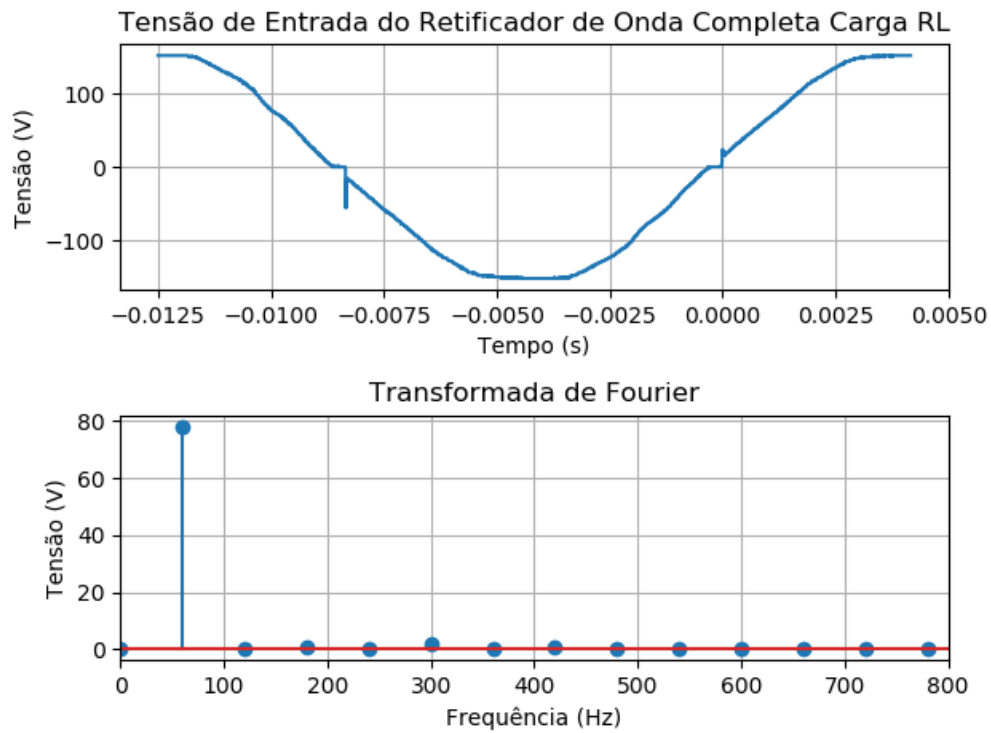


Figura 33: Transformada de Fourier da Tensão de Entrada para o retificador com carga resistiva e indutiva

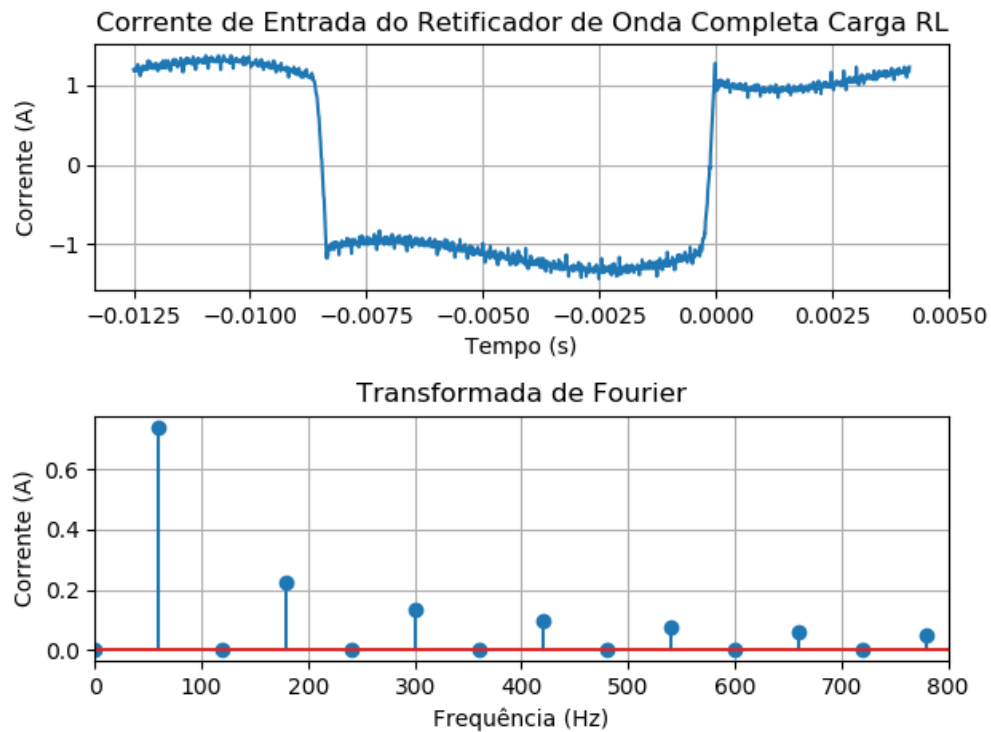


Figura 34: Transformada de Fourier da Corrente de Entrada para o retificador com carga resistiva e indutiva

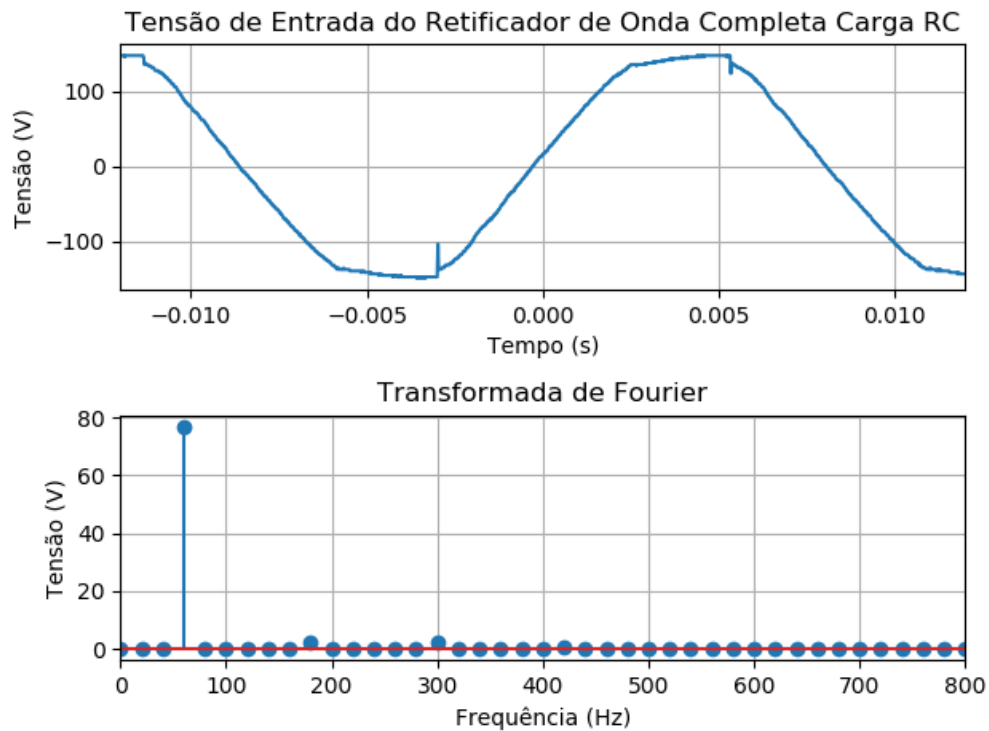


Figura 35: Transformada de Fourier da Tensão de Entrada para o retificador com carga resistiva e capacitiva

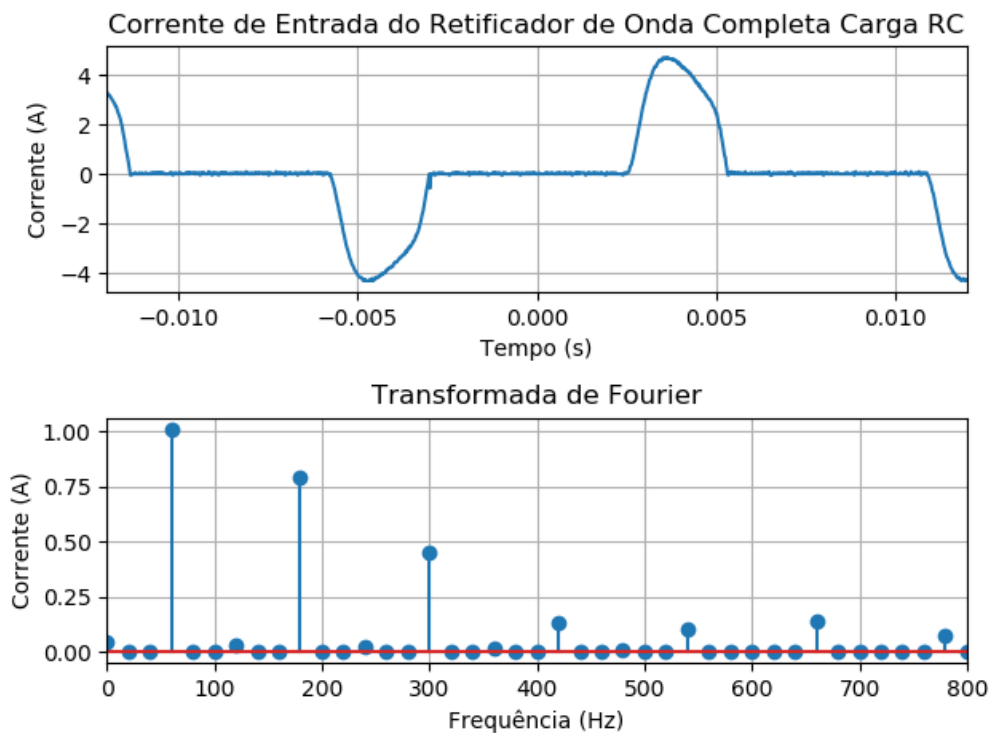


Figura 36: Transformada de Fourier da Corrente de Entrada para o retificador com carga resistiva e capacitiva

Após calculadas as transformadas, vamos calcular a distorção harmônica total (THD) do sinal



para verificar o fator de potência de cada retificador. Para calcular a THD, assim como visto acima na seção 2.1, é só calcular a raiz da soma de todos os valores ao quadrado das harmônicas e dividir pela raiz do quadrado do valor da fundamental como na equação abaixo.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{\sqrt{I_1^2}} \quad (5)$$

Fazendo os cálculos de forma numérica, calculamos a THD de cada sinal visto acima para as 50 primeiras harmônicas. Os resultados estão abaixo.

$$THD I_{in} \text{ Carga } R = 0.02921368654189477$$

$$THD I_{in} \text{ Carga } RL = 0.41940826119236524$$

$$THD I_{in} \text{ Carga } RC = 0.930597062844219$$

Como esperado, o THD da carga R é bem próximo de 0, pois a corrente na entrada é senoidal. Nos outros casos se esperava uma THD bem maior que a anterior, devido a distorção na corrente da entrada o que se concretiza. Observar também que como a distorção no caso RC é muito grande, a THD é maior ainda do que a do caso RL. Com os valores acima, calculamos também os fatores de potência assumindo que a defasagem entre tensão e corrente é nula. Também assumimos distorções nula na tensão de entrada.

$$FP = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1 + THD^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (6)$$

$$FP \text{ Carga } R = 0.9995735531998132$$

$$FP \text{ Carga } RL = 0.9221768111557245$$

$$FP \text{ Carga } RC = 0.7320536538375827$$

Também como esperado, o fator de potência com carga R é unitário e os outros são abaixo de um, novamente devido as distorções na corrente de entrada.

## 5.2 CONCLUSÃO

No circuito de carga R, podemos observar que a corrente se comporta conforme o esperado tanto na simulação quanto no experimento. No entanto, tem uma pequena diferença na potência ativa do circuito e uma diferença maior na potência aparente, resultando numa diferença do fator de potência também. Possivelmente, isso ocorre em função da instabilidade da rede e das perdas no transformador. O  $\beta$  está com um valor bem próximo, mas era esperado que seu valor não fosse exato, visto que a fórmula utilizada é apenas uma aproximação.

Já no circuito de carga RL, os valores encontrados foram mais parecidos com os valores da simulação. Aparentemente, as variações encontradas anteriormente não afetaram tanto nessa montagem. O mesmo vale para o circuito RC.

Foi interessante observar os cálculos numéricos realizados com as mesmas ondas, chegando em conclusões parecidas com as experimentais a respeito de THD e fator de potência. Também foi interessante calcular e plotar as transformadas de fourier e ver que os valores batem com o que vemos na teoria da matéria.