



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EEL7074 - ELETRÔNICA DE POTÊNCIA I  
RELATÓRIO 2

# Retificadores de Onda Completa com Diodos e carga R e RL

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

Professor André Luís Kirsten

3 de Outubro de 2018

# 1 INTRODUÇÃO

Este experimento tem como objetivo estudar um retificador de onda completa com cargas R (resistor) e carga RL (resistor e indutor). 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.

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

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.

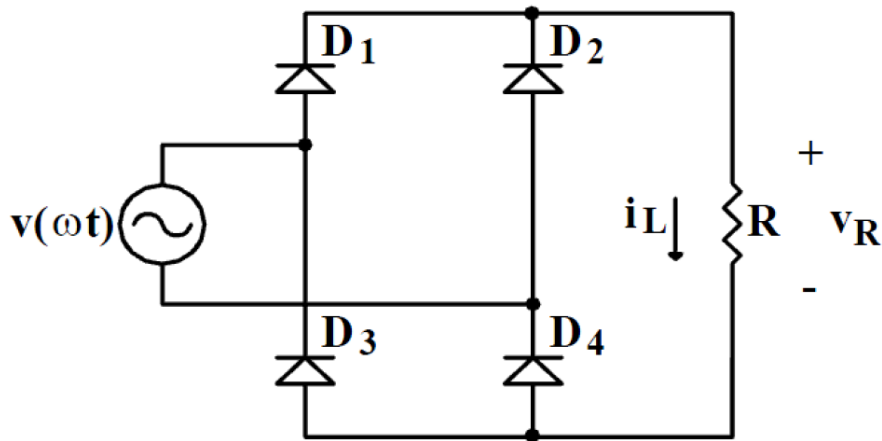


Figura 1: Retificador de onda completa com carga R

Considerando a forma de onda  $v$  senoidal, quando a tensão  $v_D$  for positiva, os diodos 1 e 4 ( $D_1$  e  $D_4$ ) estarão conduzindo (diretamente polarizados), já os diodos 2 e 3 ( $D_2$  e  $D_3$ ) estarão em aberto. Por outro lado quando a tensão  $v$  for negativa, os diodos 2 e 3 ( $D_2$  e  $D_3$ ) estarão conduzindo e os diodos 1 e 4 ( $D_1$  e  $D_4$ ) estarão em aberto. Este funcionamento está mostrado nas figuras 2 e 3.

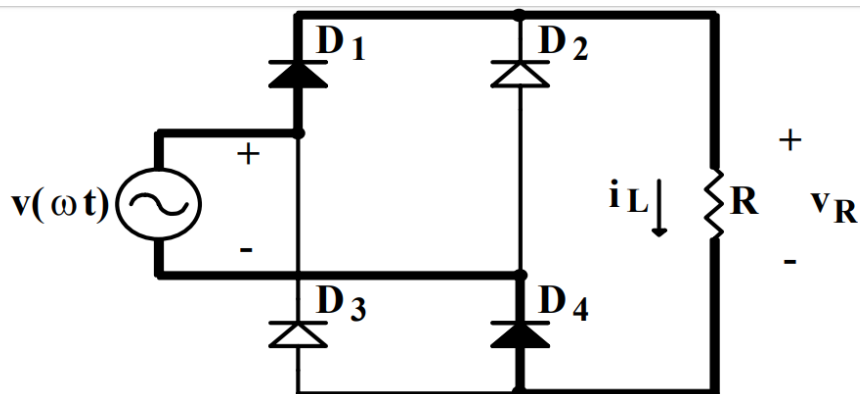


Figura 2: Ciclo positivo de um retificador de onda completa com carga R

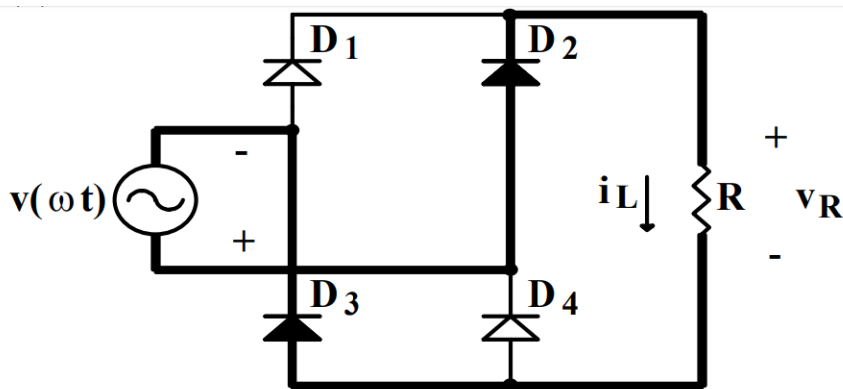


Figura 3: Ciclo negativo de um retificador de onda completa com carga R

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.

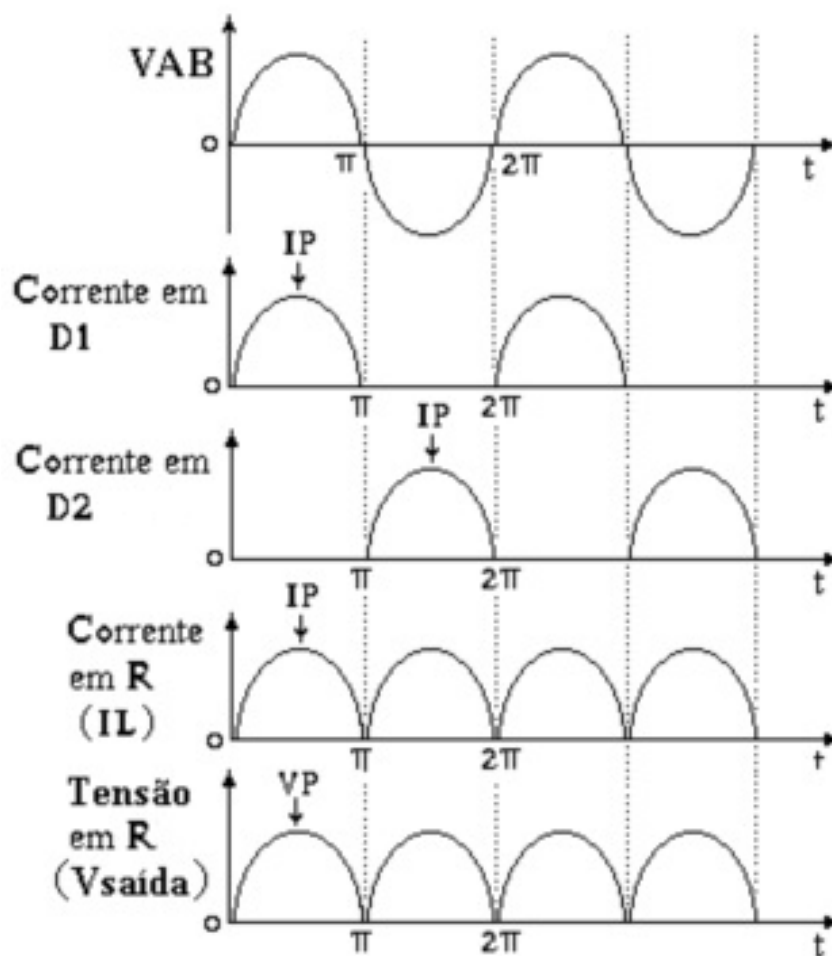


Figura 4: Formas de onda da tensão na fonte e na carga, da corrente no diodo 1, no diodo 2 e na carga

## 1.2 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.

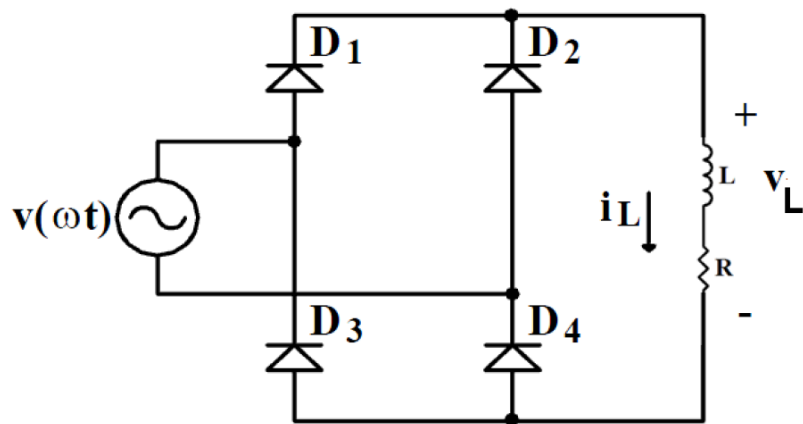


Figura 5: Retificador de onda completa com carga RL

Considerando a forma de onda  $v$  senoidal, quando a tensão  $v_L$  for positiva, os diodos 1 e 4 ( $D_1$  e  $D_4$ ) estarão conduzindo (diretamente polarizados), já os diodos 2 e 3 ( $D_2$  e  $D_3$ ) estarão em aberto. Por outro lado quando a tensão  $v$  for negativa, os diodos 2 e 3 ( $D_2$  e  $D_3$ ) estarão conduzindo e os diodos 1 e 4 ( $D_1$  e  $D_4$ ) estarão em aberto. Este funcionamento está mostrado nas figuras 6 e 7.

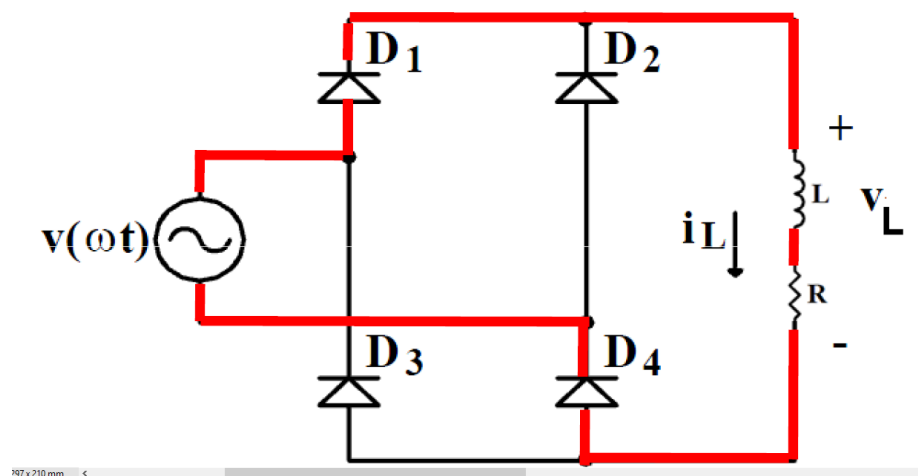


Figura 6: Ciclo positivo de um retificador de onda completa com carga RL

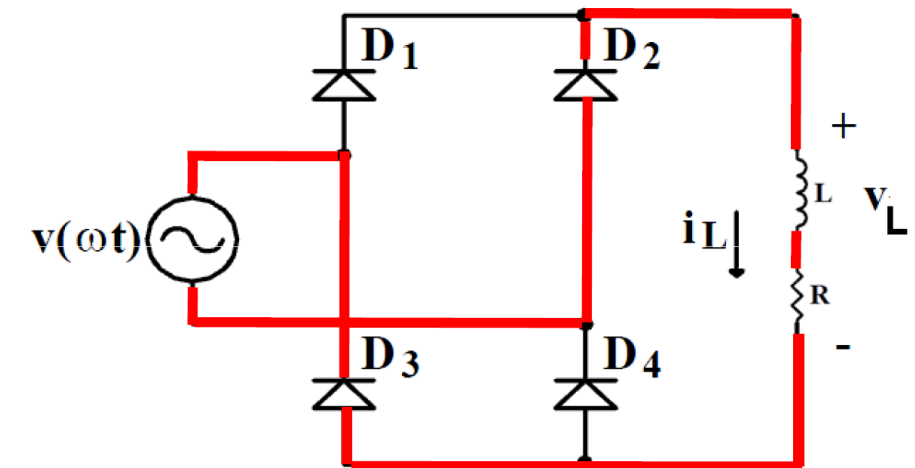


Figura 7: Ciclo negativo de um retificador de onda completa com carga RL

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 em uma potência reativa no sistema, 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.

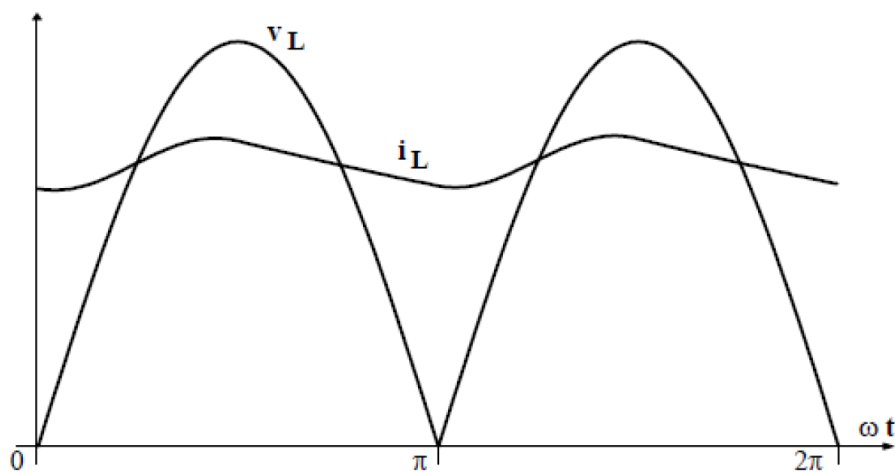


Figura 8: Formas de onda: tensão e corrente na carga RL

### 1.3 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 SIMULAÇÃO

### 2.1 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 311,127V e frequência 60Hz, 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.

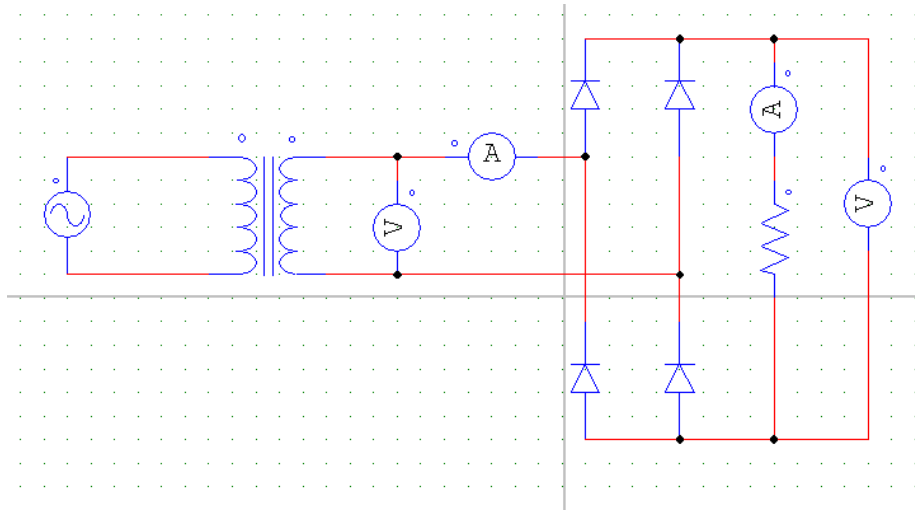


Figura 9: Retificador de onda completa em ponte com carga R

Depois de montar o circuito, simulamos o mesmo para um período de 25ms. 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.

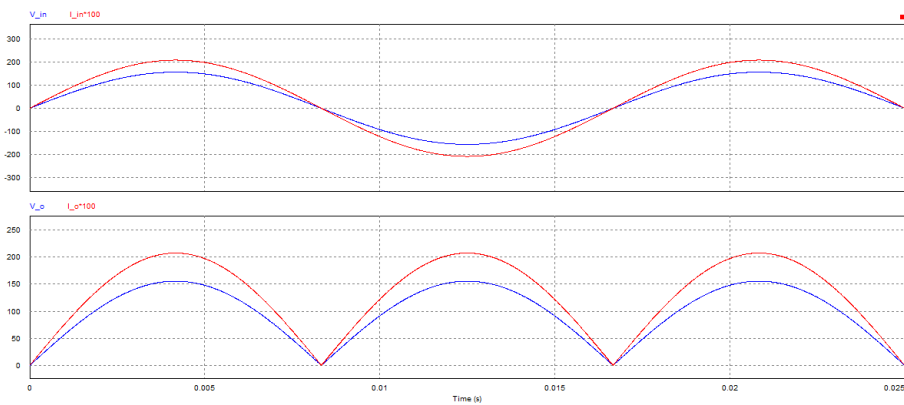


Figura 10: Tensões e correntes de entrada e saída para carga R



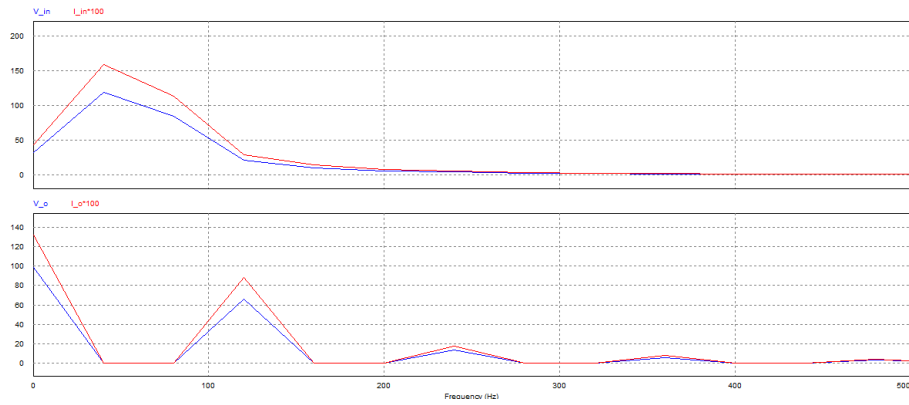


Figura 11: Transformada de Fourier para tensões e correntes de entrada e saída para carga R

Encontramos os seguintes valores calculados pelo PSIM:

$$P_{in} = P_o = 161,3W$$

$$S_{in} = S_o = 161,3VA$$

$$FP_{in} = FP_o = 1$$

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

$$THD_{V_o} = THD_{I_o} = 797$$

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

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

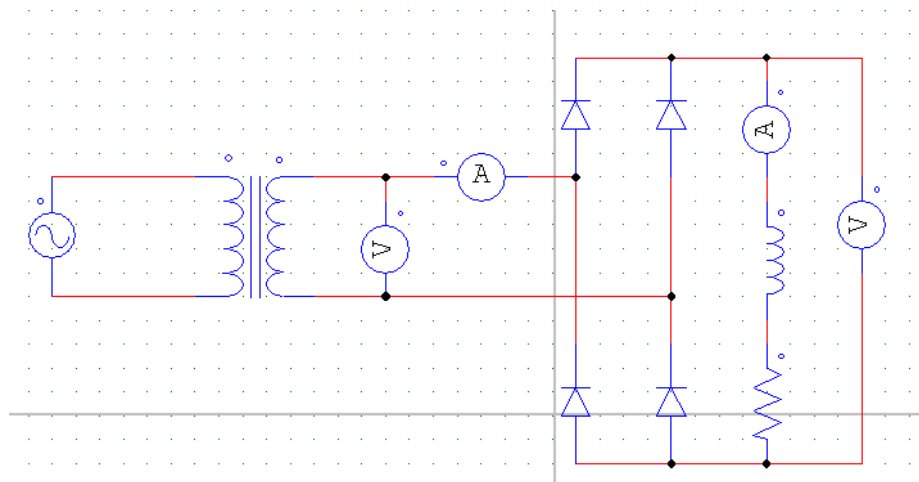


Figura 12: Retificador de onda completa em ponte com carga RL

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 1,025s. A partir disso, fizemos o mesmo procedimento anterior.

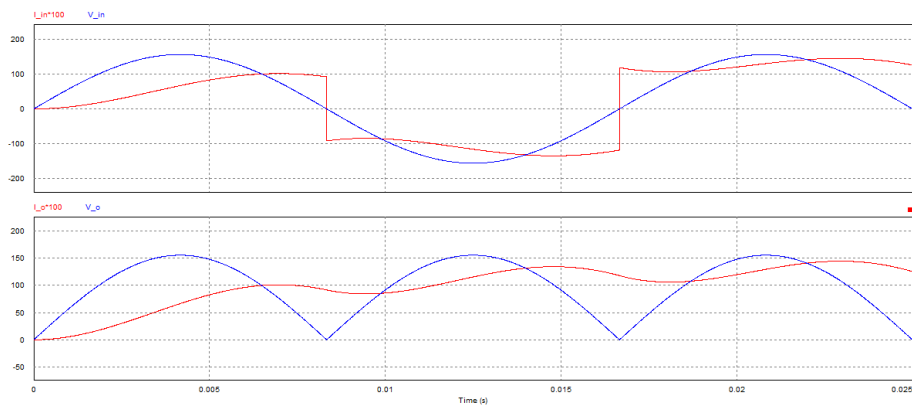


Figura 13: Tensões e correntes de entrada e saída para carga RL em regime transitório

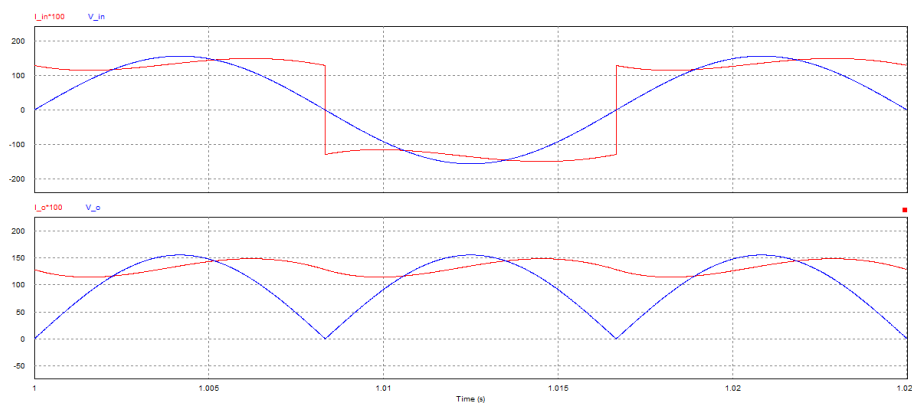


Figura 14: Tensões e correntes de entrada e saída para carga RL em regime permanente

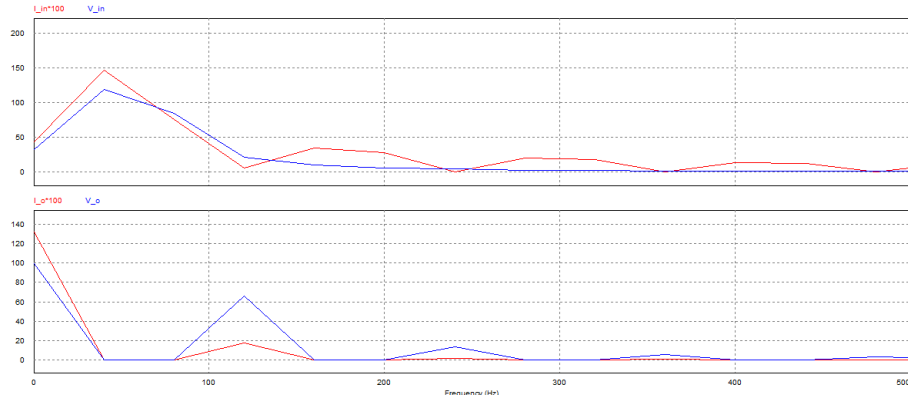


Figura 15: Transformada de Fourier para tensões e correntes de entrada e saída para carga RL

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 EXPERIMENTO

#### 3.1 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.

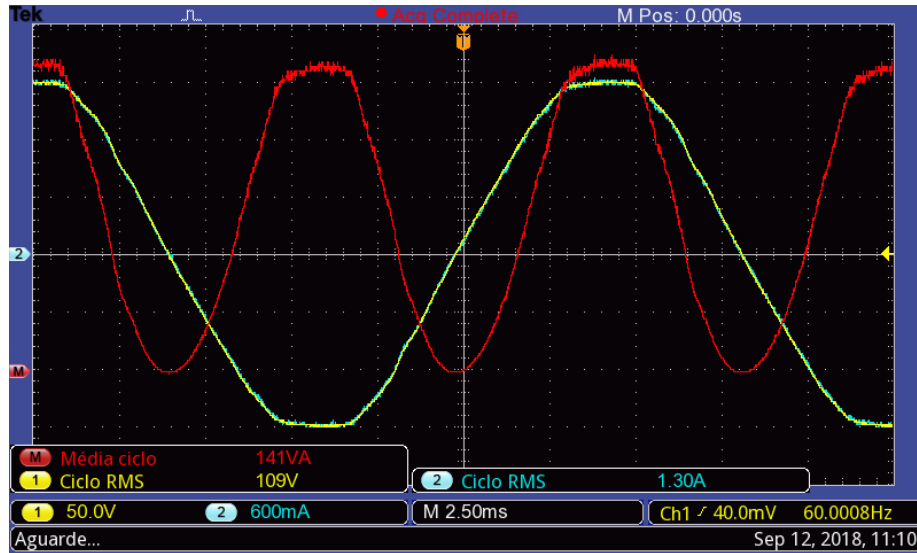


Figura 16: Tensão (amarelo), corrente (azul) e produto entre os dois (vermelho) na fonte, para carga resistiva

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:

$$P = 141W$$

$$S = 141,7VA$$

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.

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

Agora, adicionando um indutor  $L = 500mH$  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.

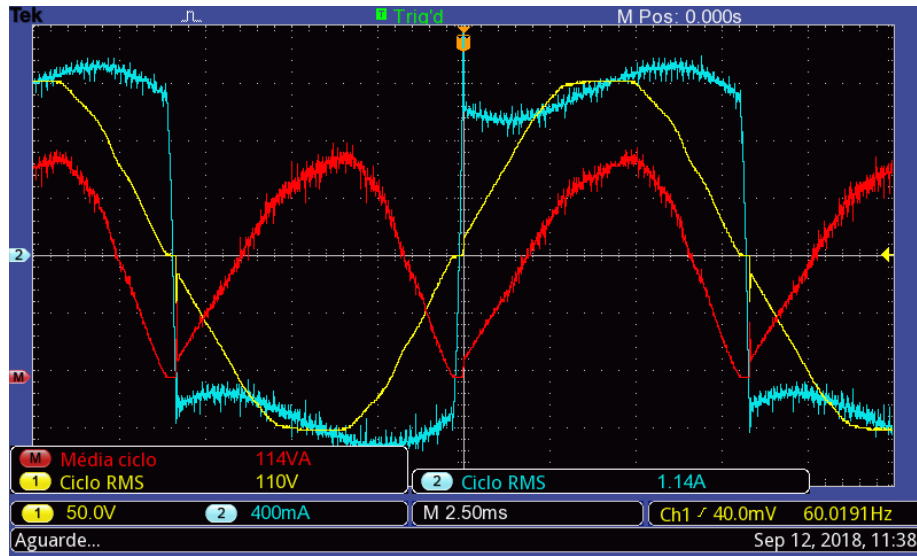


Figura 17: Tensão (amarelo), corrente (azul) e produto entre os dois (vermelho) na fonte, para carga RL

Nesse caso, temos as seguintes potências:

$$P = 114W$$

$$S = 125,4VA$$

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 uma 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.

### 3.3 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.

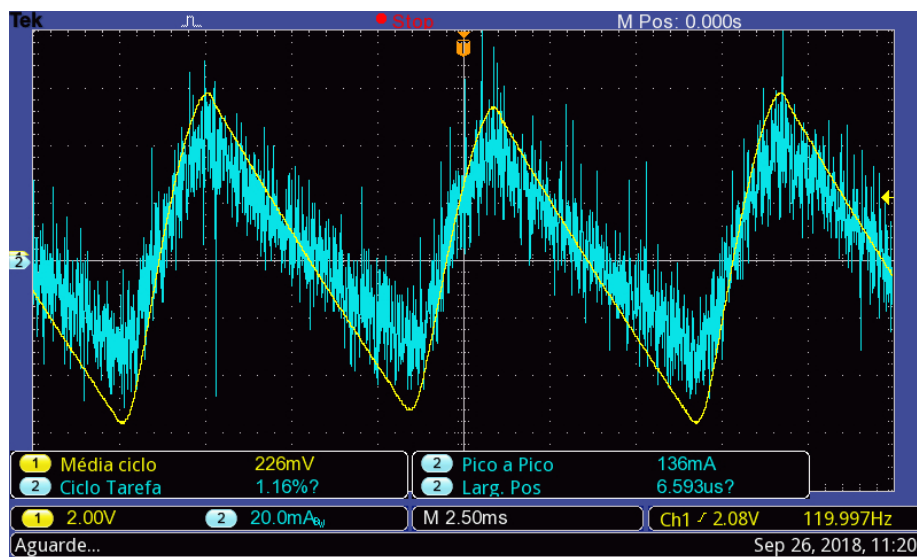


Figura 18: Tensão (amarelo), corrente (azul) no resistor paralelo ao capacitor vistos com acoplamento CA

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

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.

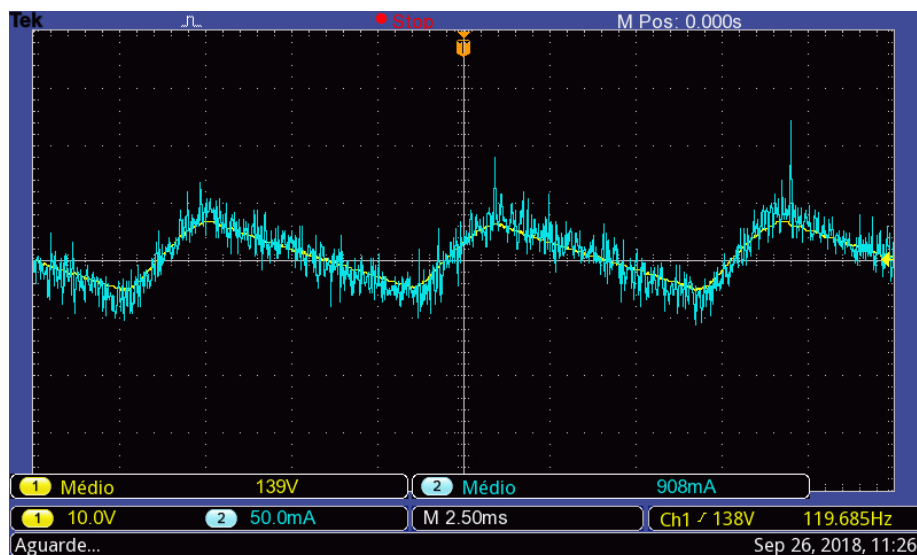


Figura 19: Tensão (amarelo), corrente (azul) no resistor paralelo ao capacitor vistos com acoplamento CC

Aqui temos pelas medições do osciloscópio um valor médio de 139V para a tensão na carga e um valor médio de 908mA para a corrente no resistor. Aqui, como a corrente média no capacitor é 0 (caso contrário sua tensão tenderia ao infinito), temos  $139V/150\Omega = 926,67mA$  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 139V na carga e uma ondulação com 9V 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.

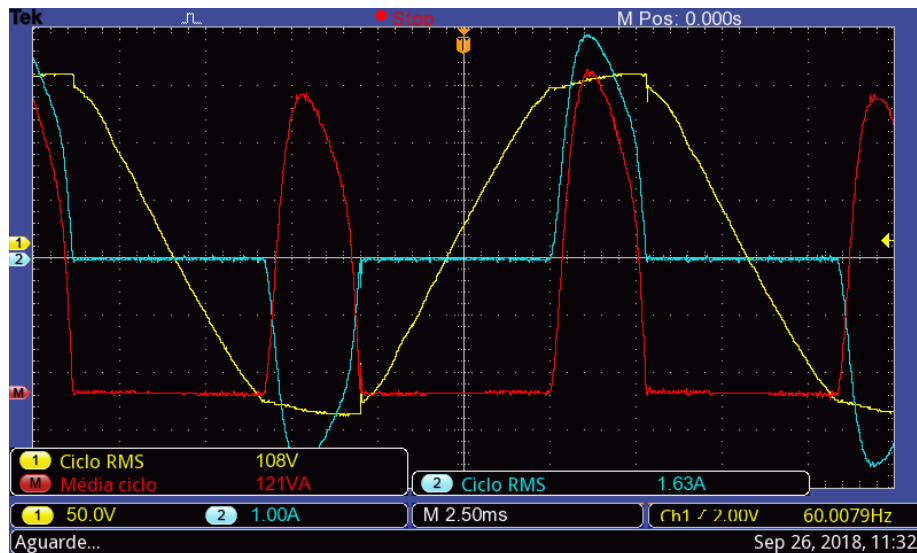


Figura 20: Tensão (amarelo), corrente (azul) e produto entre os dois (vermelho) na fonte, para carga RC

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 repostada 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  $C = Q/V$ , 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  $I = dQ/dt$ , 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 ( $P/S$ ), 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:

$$P = 121W$$

$$S = 176VA$$

$$FP = 0,6875$$

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 60Hz), 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 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.

## 4 VERIFICAÇÃO NUMÉRICA

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. Os gráficos gerados se encontram abaixo.



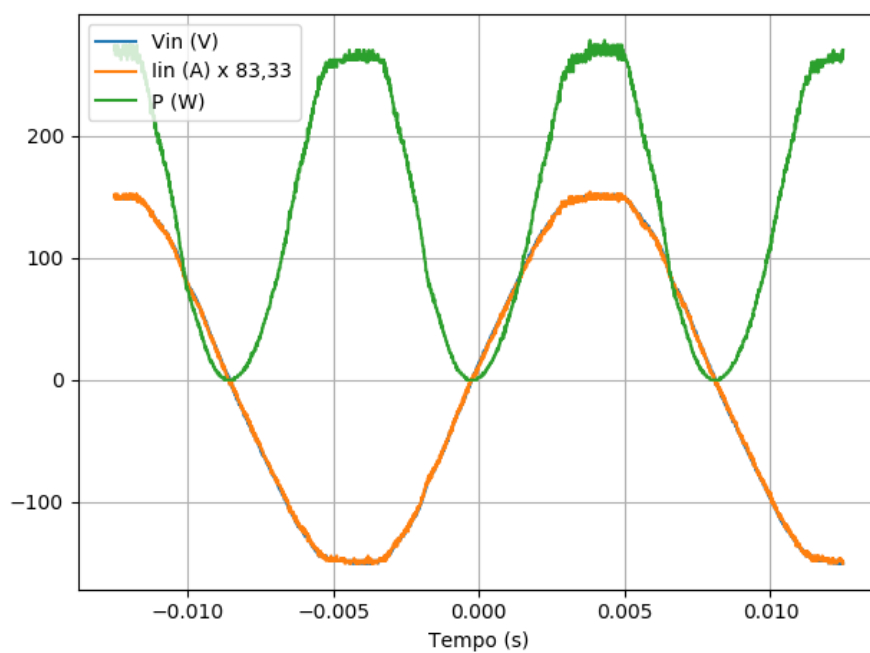


Figura 21: Tensão, Corrente e Potência para o retificador com carga resistiva.

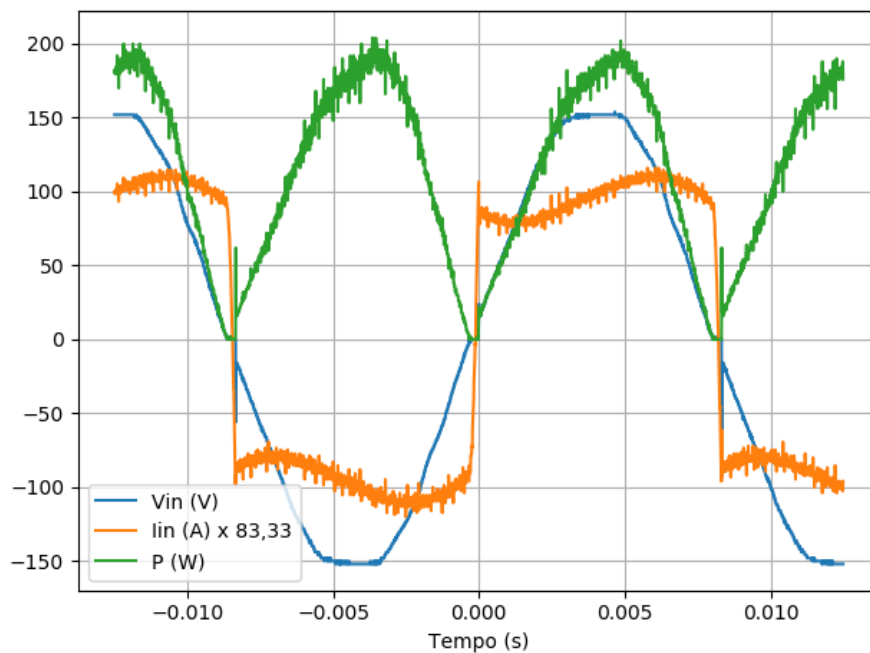


Figura 22: Tensão, Corrente e Potência para o retificador com carga resistiva e indutiva.

Observar que em ambas as Figuras 18 e 19 a corrente foi multiplicada por um fator de 83,33 para atender a mesma escala utilizada no osciloscópio. O objetivo foi atendido, já que a forma de onda está praticamente idêntica a vista no osciloscópio.

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.

Pelo CSV, nos foi dado 2500 pontos, porém para conseguir fazer uma FFT sem distorção, precisávamos utilizar o tempo igual a múltiplos de um período completo da função original, que sabemos ser periódica. Assim para resolver isso foram utilizados 1667 pontos para o cálculo da FFT o que resulta em um período completo e assim não haverá distorção nos cálculos. Como a frequência de amostragem foi de 10 MHz, temos uma resolução de frequência de 59,99 Hz com 1667 amostras, o que nos dá uma precisão suficiente para o cálculo da THD, visto a seguir.

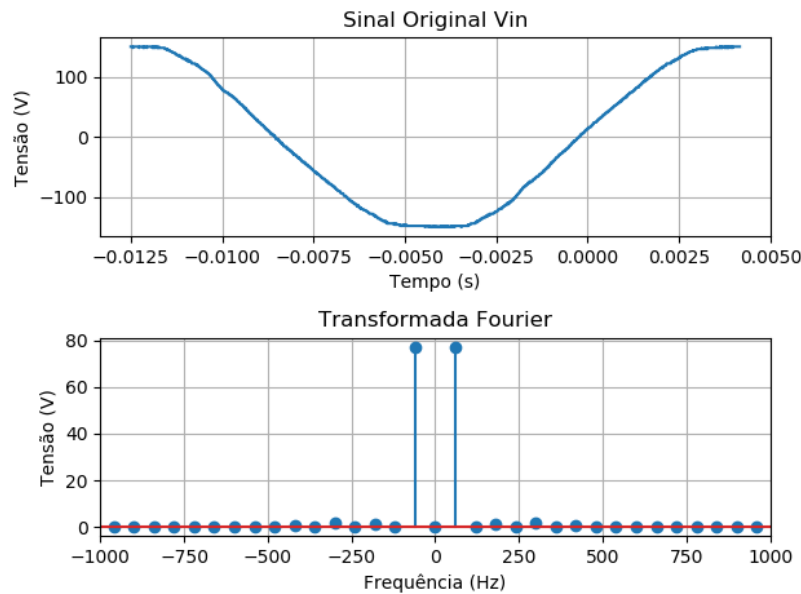


Figura 23: Transformada de Fourier da Tensão de Entrada para o retificador com carga resistiva

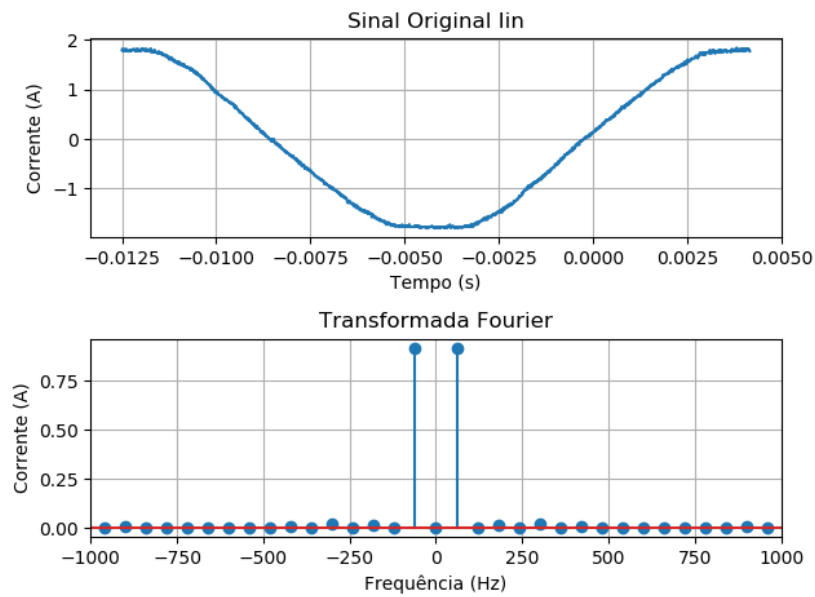


Figura 24: Transformada de Fourier da Corrente de Entrada para o retificador com carga resistiva

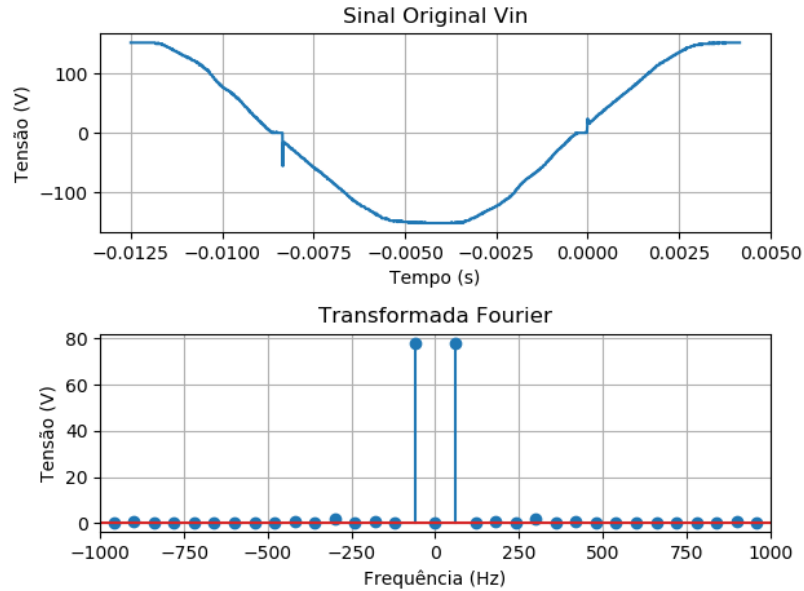


Figura 25: Transformada de Fourier da Tensão de Entrada para o retificador com carga resistiva e indutiva

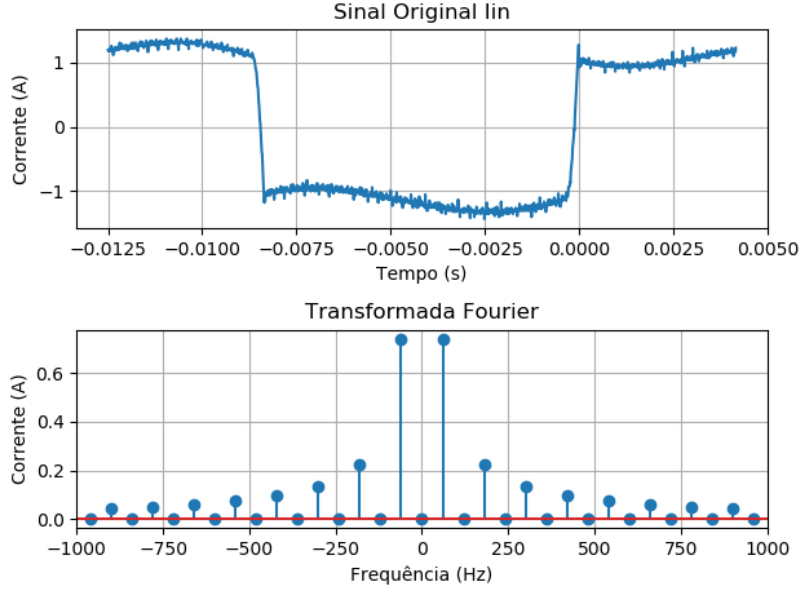


Figura 26: Transformada de Fourier da Corrente de Entrada para o retificador com carga resistiva e indutiva

Após calculadas as transformadas, como nossa resolução de frequência é próxima de 60 Hz, cada ponto no gráfico da transformada é múltiplo de 60 Hz, sendo assim são a frequência fundamental e suas harmônicas. Para calcular a THD, assim como visto acima, só calcular soma de todos os valores RMS das harmônicas e dividir pelo RMS da fundamental. 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.

$$THD V_{in} Entrada Carga R = 0,028544828540936866$$

$$THD I_{in} Carga R = 0,029213686541894775$$

$$THD V_{in} Carga RL = 0,029906324981207193$$

$$THD I_{in} Carga RL = 0,41940826119236524$$

Como esperado, o único THD bem diferente de 0 é o da corrente na entrada com carga RL, pois é a única forma de onda distorcida observada acima. 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, como se pode observar em ambos os casos.

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

$$FP \text{ Carga } R = 0,9995735531998132$$

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

Também como esperado, o fator de potência com carga R é unitário e o de carga RL é 0,92, um pouco abaixo de 1.

## 5 CONCLUSÃO

No primeiro circuito, podemos observar que a corrente se comporta conforme o esperado. 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 segundo circuito, os valores encontrados foram mais parecidos com os valores da simulação. Aparentemente, as variações encontradas anteriormente não afetaram tanto nessa montagem.

Também foi interessante observar os cálculos numéricos realizados com as mesmas ondas, chegando em conclusões parecidas com a do osciloscópio a respeito de THD e fator de potência.