



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EEL7074 - ELETRÔNICA DE POTÊNCIA I
RELATÓRIO 4

**Retificadores de Onda Completa Trifásico
com Cargas R, RL e RC**

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

Professor André Luís Kirsten

26 de Outubro de 2018

1 INTRODUÇÃO

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

- Retificador de Onda Completa Trifásico com Carga R
- Retificador de Onda Completa Trifásico com Carga RL
- Retificador de Onda Completa Trifásico 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 trifásico gera uma onda resultante de 6 ciclos, assim como apresentado no restante deste documento. 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
- Conclusão - Comparação de todos os resultados obtidos com os esperados na teoria.
- Apêndice - Documentos extras.

2 ANÁLISE TEÓRICA

Retificadores trifásicos são comumente usados na indústria para produzir uma tensão e corrente DC para grandes cargas. O retificador trifásico de ponte completa é mostrado na Figura 1. A fonte de tensão trifásica é balanceada e tem a sequência de fase a-b-c. A fonte e os diodos são considerados ideais na análise inicial do circuito. Este circuito também é conhecido como Ponte de Graetz.

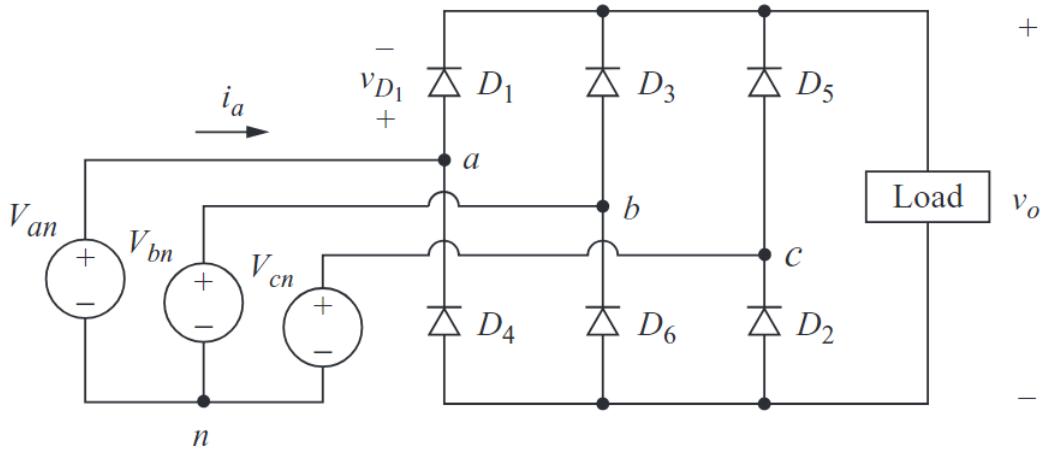


Figura 1: Retificador Trifásico

Analizando o circuito, vemos que apenas um diodo na metade da ponte pode conduzir de uma só vez (D1, D3 ou D5). O diodo que está conduzindo terá seu anodo conectado à tensão de fase que é a mais alta naquele instante. Também percebemos que apenas um diodo na metade inferior da ponte pode conduzir de uma só vez (D2, D4 ou D6). O diodo que está conduzindo terá seu cátodo conectado à tensão de fase que é mais baixa naquele instante.

Assim, não poderão estar conduzindo ao mesmo tempo os seguintes pares de diodos: D1 e D4, D3 e D6, D5 e D2.

Existem seis combinações de voltagem linha a linha (três fases tomadas duas vezes). Por causa das seis transições que ocorrem para cada período da tensão da fonte, o circuito é chamado de retificador de seis pulsos. A frequência fundamental da tensão de saída é 6Ω , onde Ω é a frequência da fonte trifásica.

A Figura 2 mostra as tensões de fase e as combinações resultantes de tensões de linha para linha de uma fonte trifásica平衡ada.

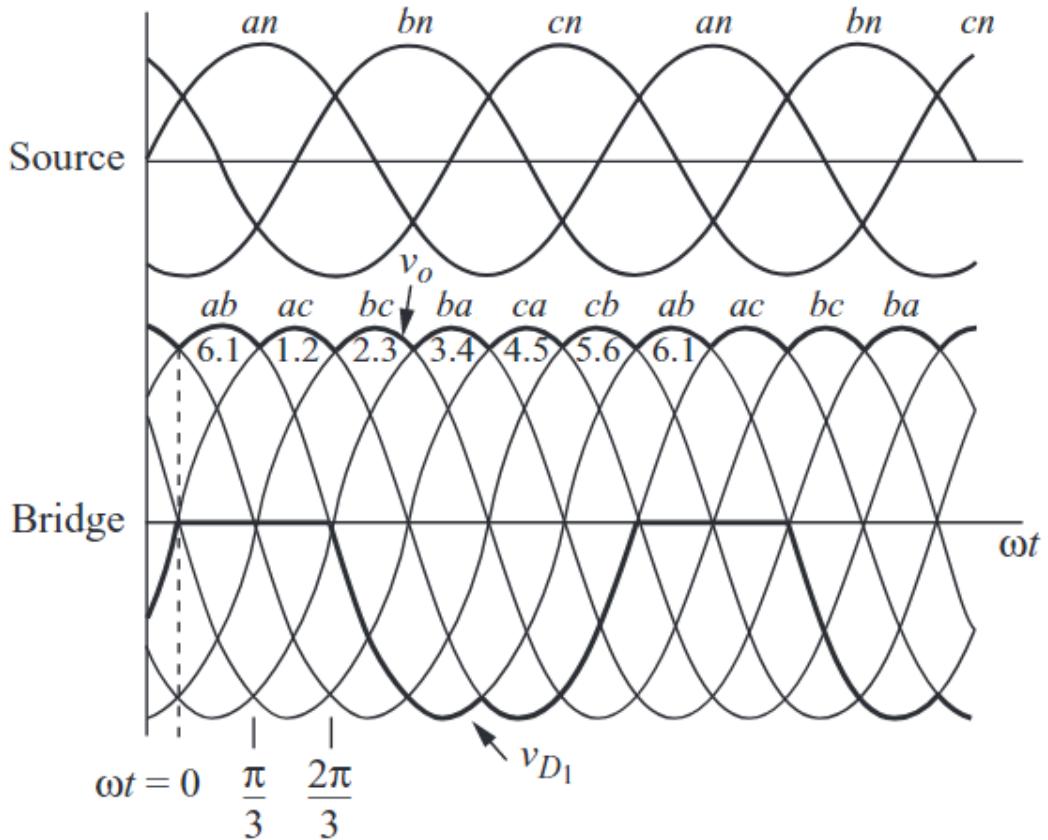


Figura 2: Ondas de um Retificador Trifásico

2.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM CARGA R

O retificador de onda completa trifásico com carga puramente resistiva está representado na Figura 3. A corrente em cada um dos diodos da ponte para uma carga resistiva é mostrada na Figura 4. A corrente em um diodo condutor é a mesma que a corrente de carga. i_D é a corrente que passa na carga. E i_a é a corrente fornecida pela fonte de tensão da fase a.

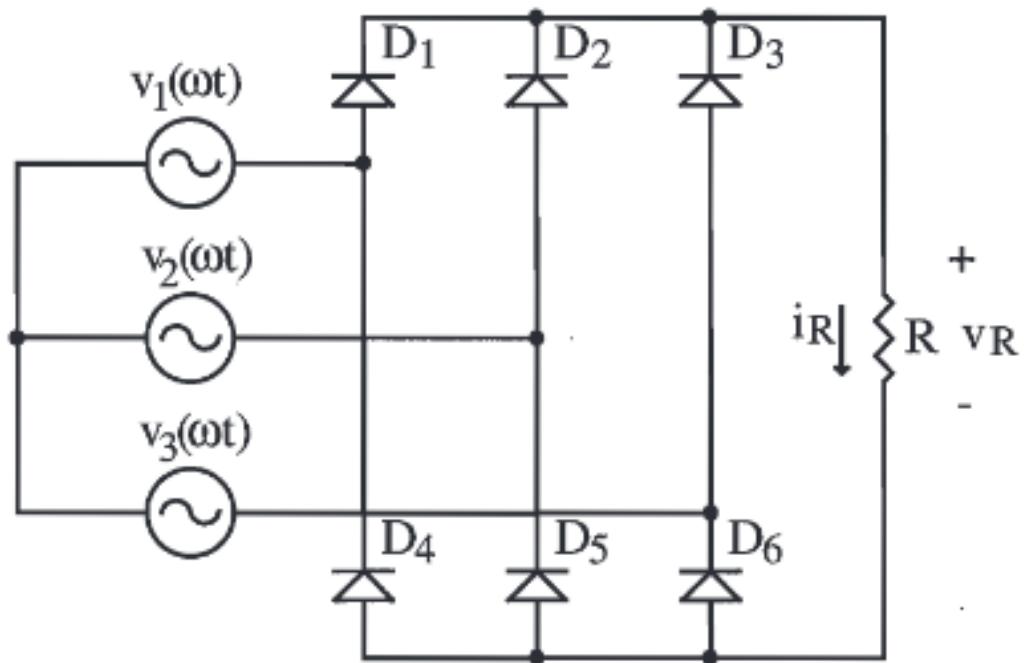


Figura 3: Retificador de Onda Completa Trifásico com Carga R

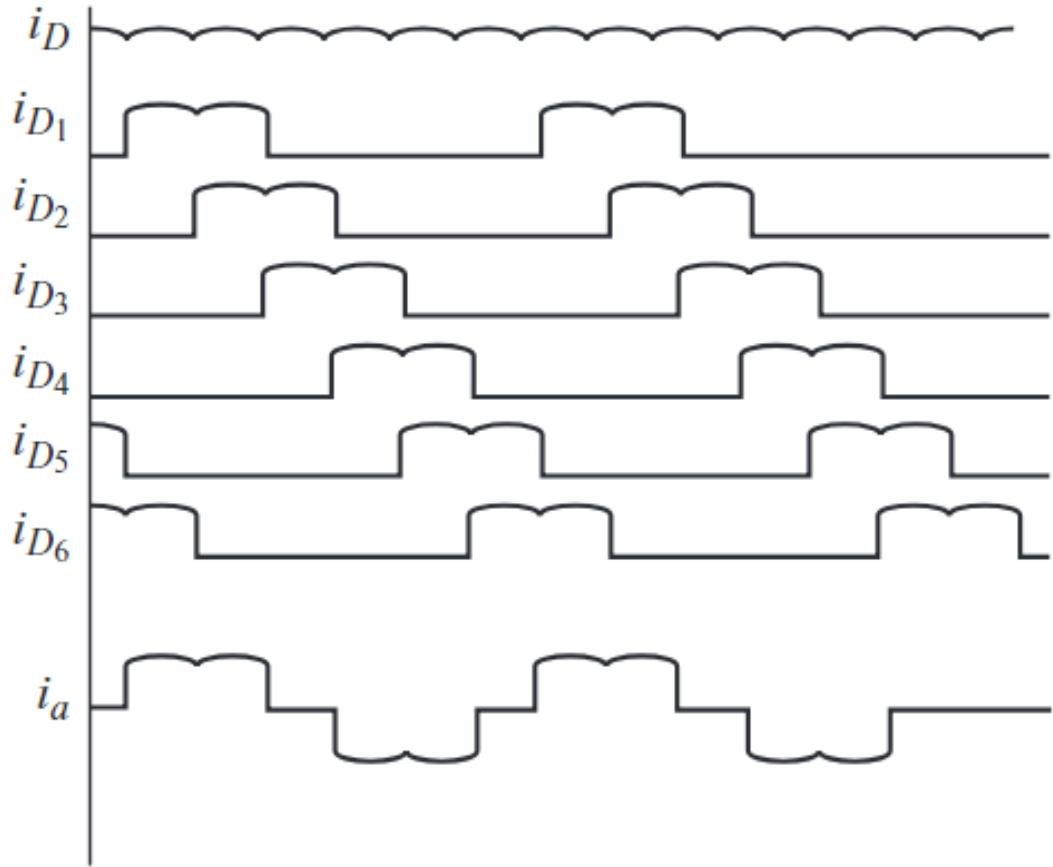


Figura 4: Ondas de um Retificador Trifásico Carga R

2.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM CARGA RL

O retificador de onda completa trifásico com carga resistiva e indutiva está representado na figura 5. A carga resistor e indutor pode ser representada por uma fonte de corrente. Assim a corrente na carga tende ser constante. Como mostrado na figura 6. i_D é a corrente que passa na carga e i_a é a corrente fornecida pela fonte de tensão da fase a.

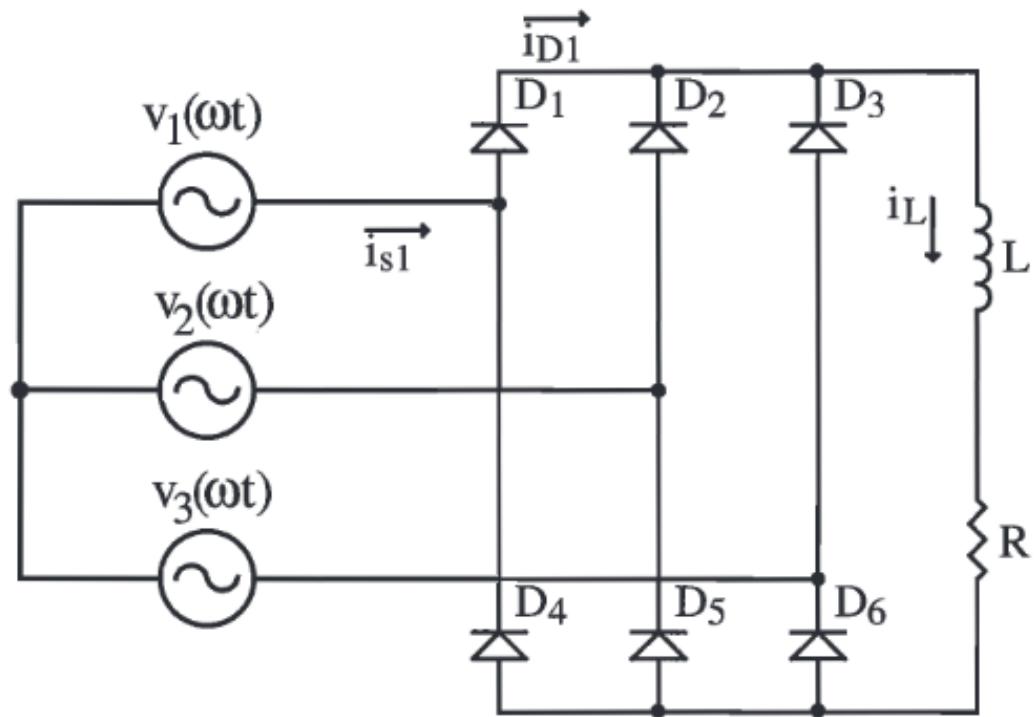


Figura 5: Retificador de Onda Completa Trifásico com Carga RL

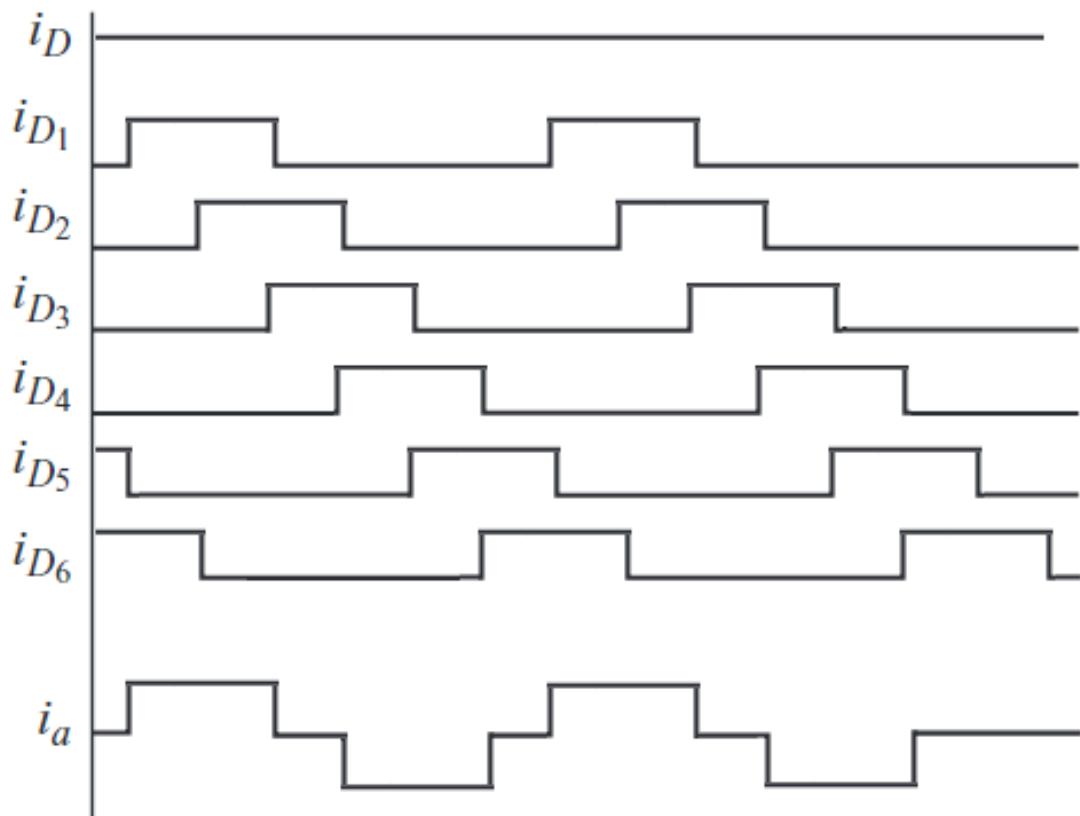


Figura 6: Ondas de um Retificador Trifásico Carga RL

2.3 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM CARGA RC

O retificador de onda completa trifásico com carga resistiva e indutiva está representado na figura 7. A carga resistor e capacitor pode ser representada por uma fonte de tensão. Assim a tensão na carga tende ser constante (V_{max}). Como mostrado na figura 8.

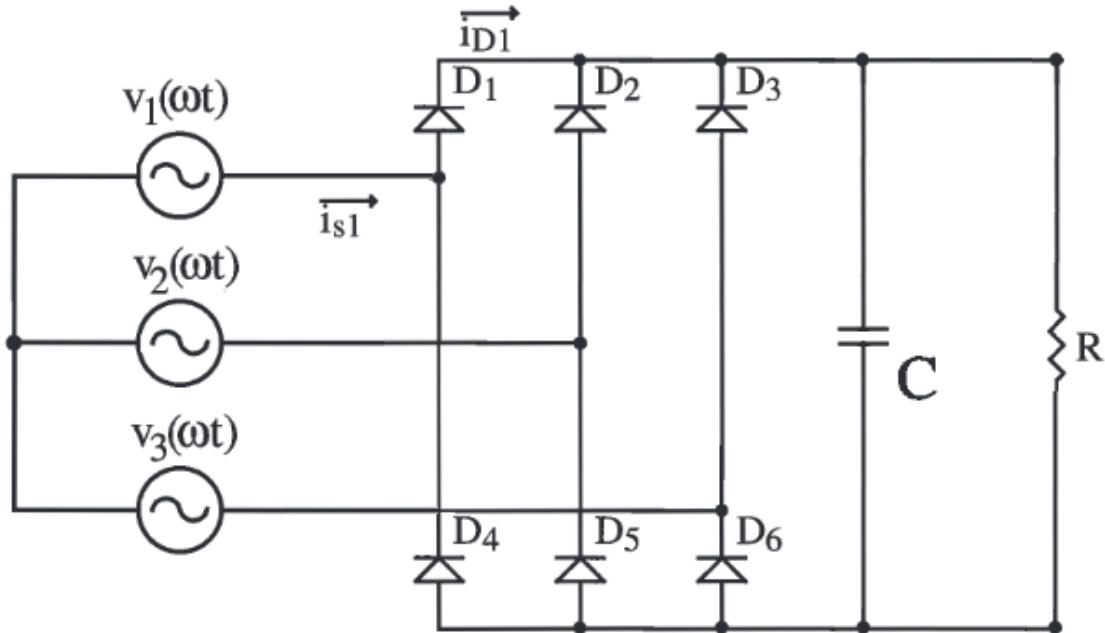


Figura 7: Retificador de Onda Completa Trifásico com Carga RC

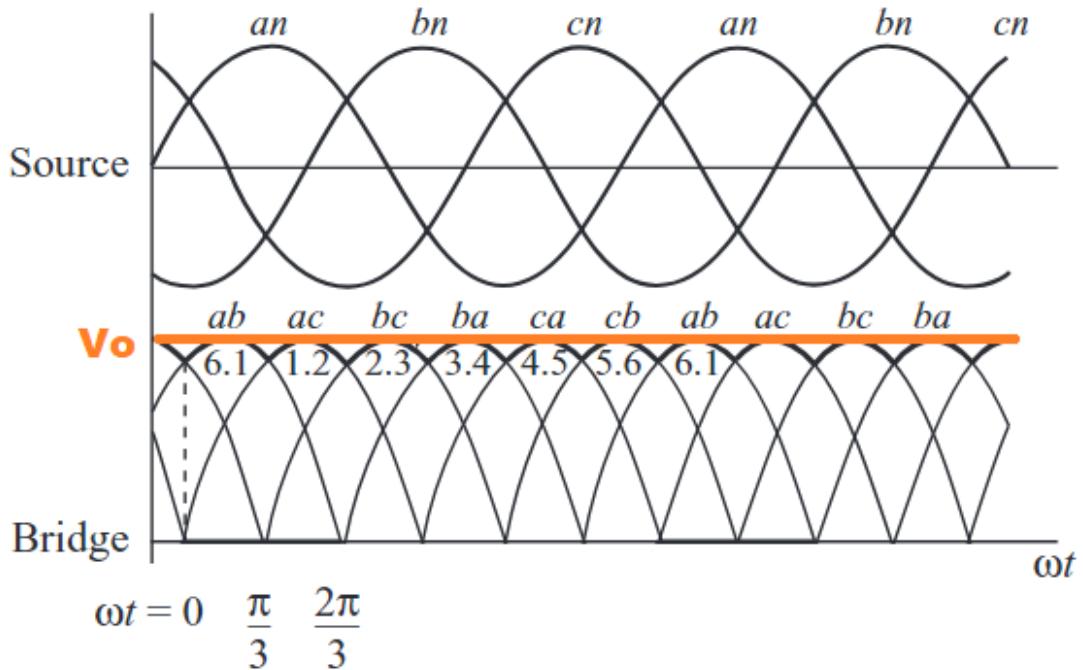


Figura 8: Ondas de um Retificador Trifásico Carga RC

3 SIMULAÇÃO

3.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM CARGA R

Montamos o circuito no PSIM *Professional Version 9.0.3.400*, o qual pode ser visto na figura abaixo. Consideramos o transformador e os diodos ideais. A fonte tem frequência de 60 Hz e tensão 381,051 V_{rms} de linha. O resistor utilizado foi de 150 Ω e a relação de transformação é de 2:1.

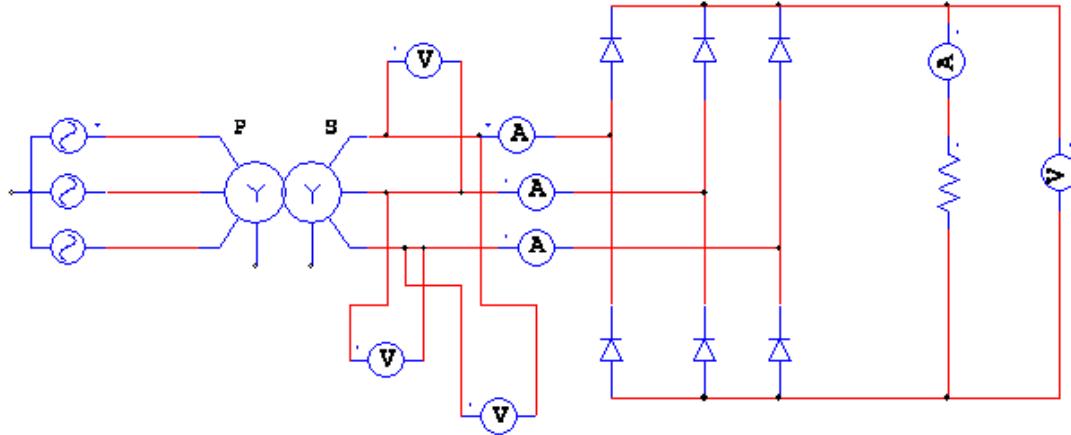


Figura 9: Retificador de Onda Completa Trifásico com Carga R

Podemos ver as tensões e correntes de entrada e saída nas imagens a seguir:

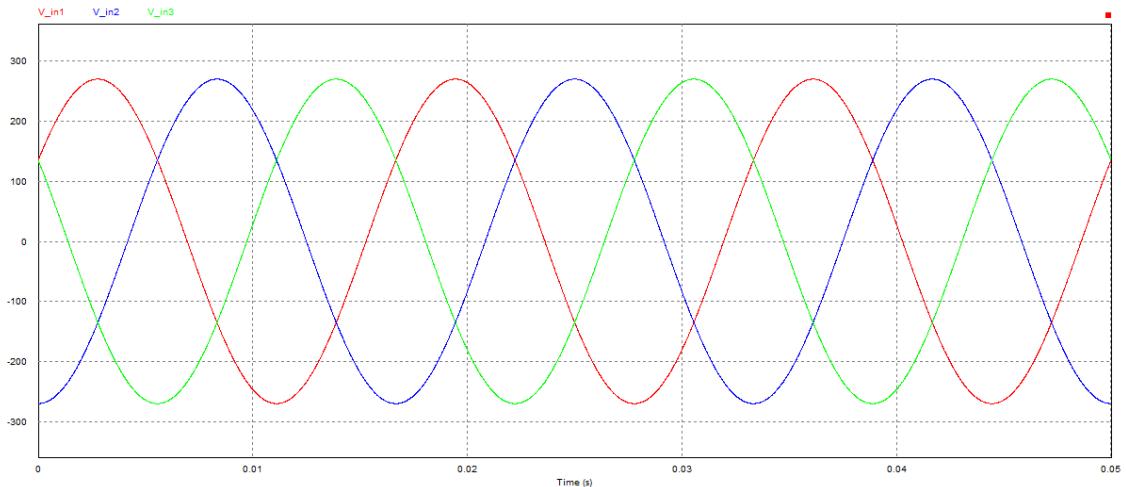


Figura 10: Tensão de Entrada do Retificador com Carga R

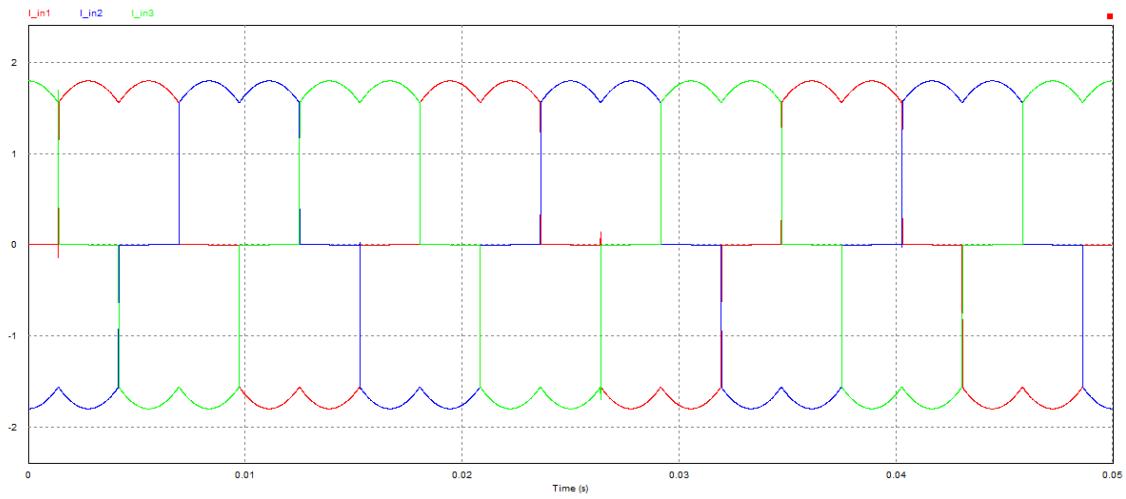


Figura 11: Corrente de Entrada do Retificador com Carga R

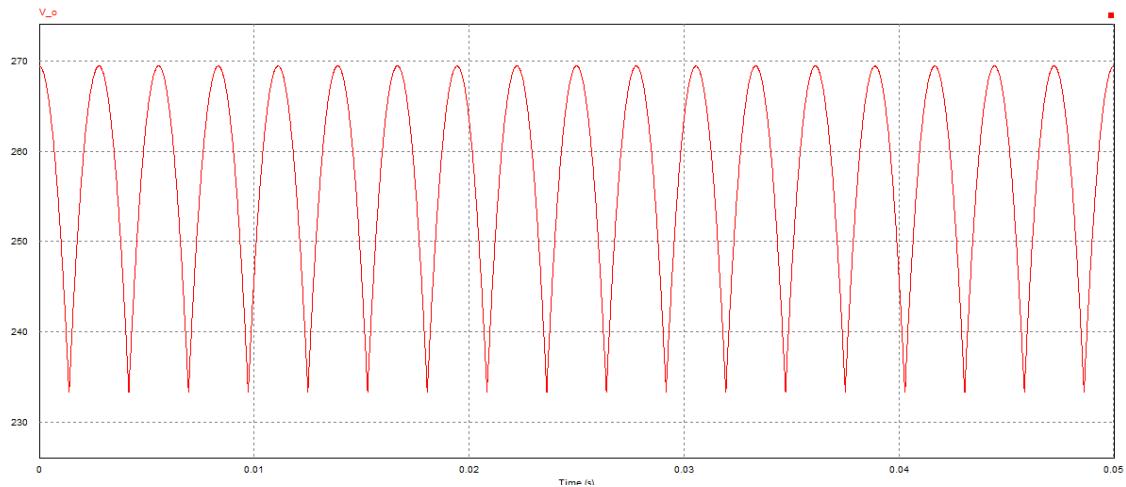


Figura 12: Tensão de Saída do Retificador com Carga R

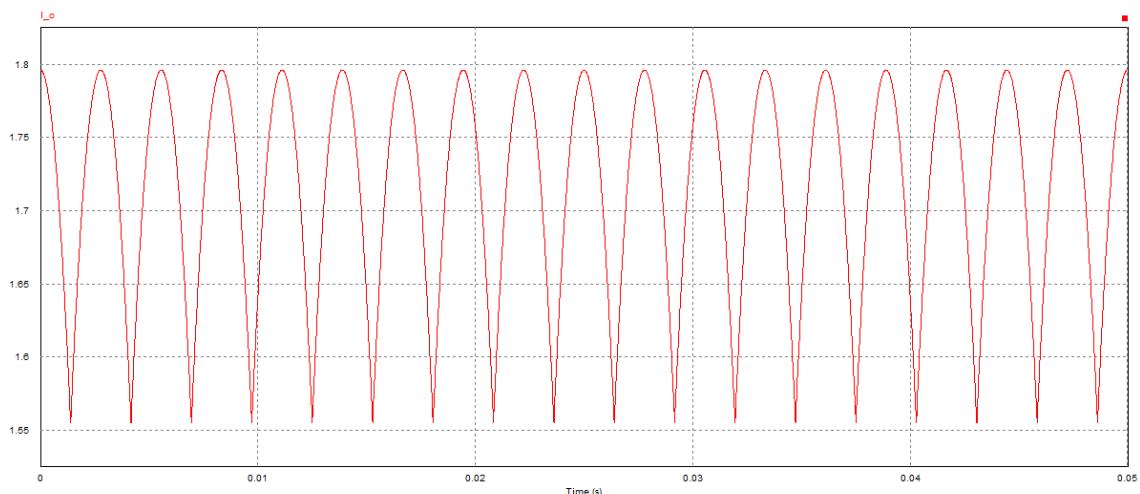


Figura 13: Corrente de Saída do Retificador com Carga R

Podemos ver as transformadas de Fourier nas imagens a seguir:

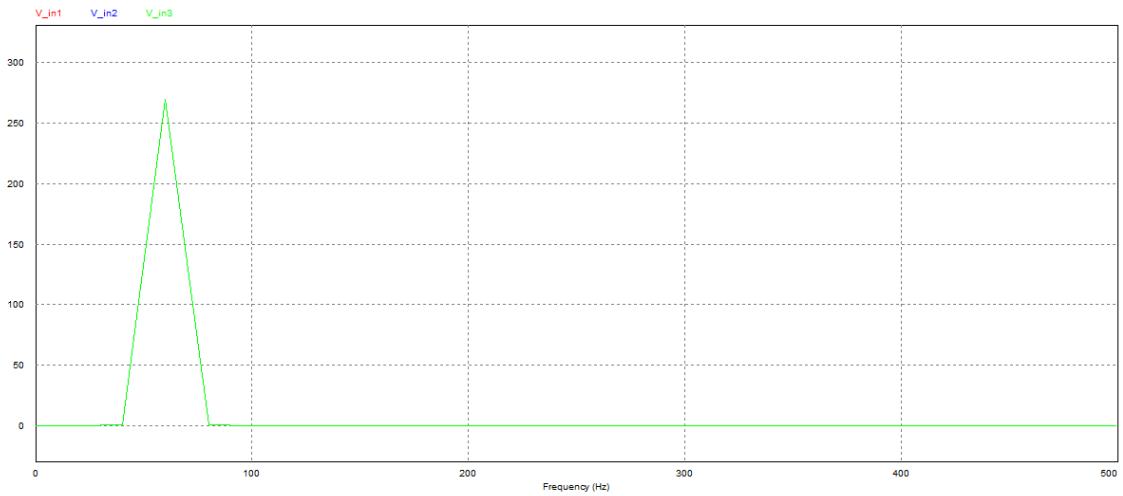


Figura 14: Transformada de Fourier para Tensão de Entrada do Retificador com Carga R

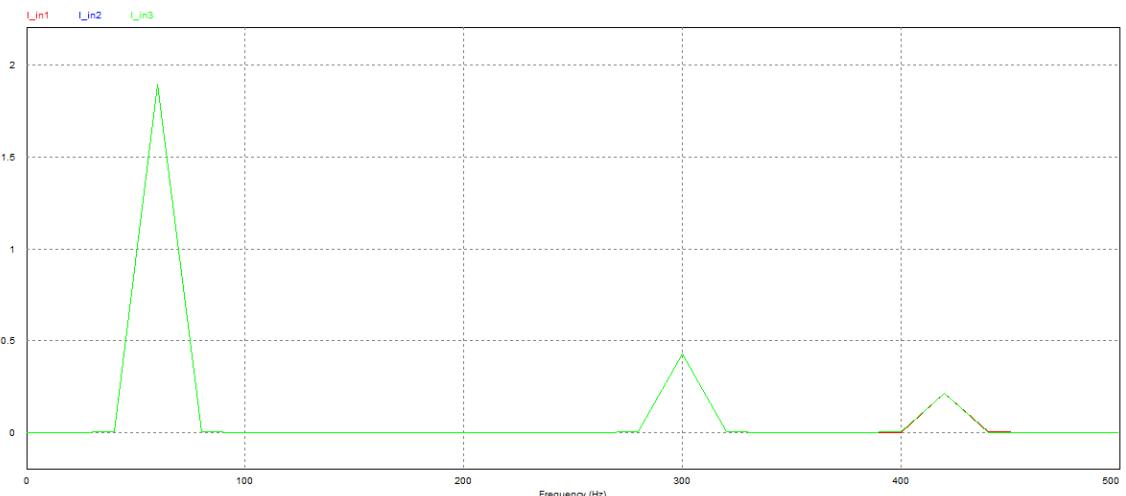


Figura 15: Transformada de Fourier para Corrente de Entrada do Retificador com Carga R

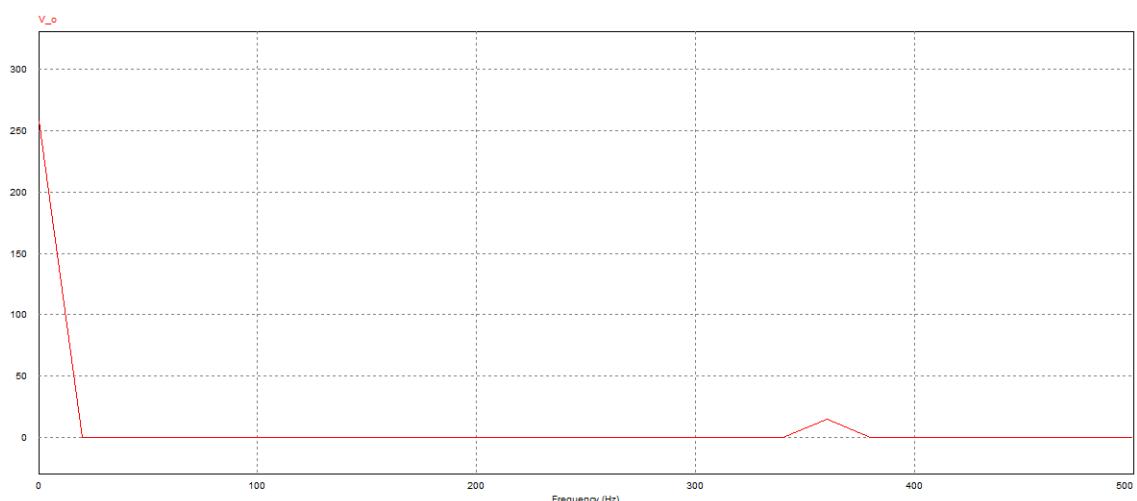


Figura 16: Transformada de Fourier para Tensão de Saída do Retificador com Carga R

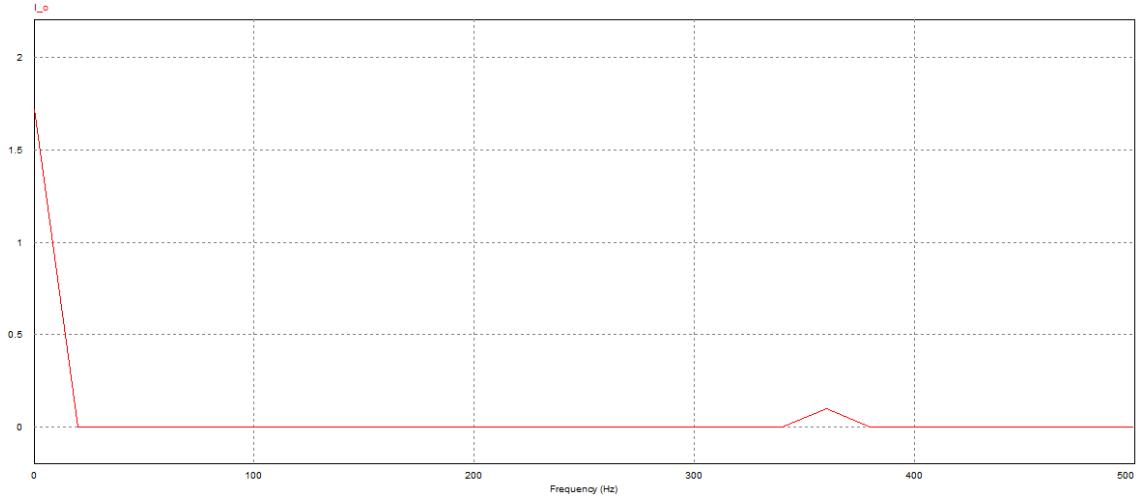


Figura 17: Transformada de Fourier para Corrente de Saída do Retificador com Carga R

Encontramos os seguintes valores a partir do PSIM:

$$P_{in} = 220,62W$$

$$S_{in} = 266,99VA$$

$$FP_{in} = 0,826$$

$$P_o = 442,11W$$

$$S_o = 442,11VA$$

$$FP_o = 1$$

$$THD_{V_{in}} = 1,47e - 3$$

$$THD_{I_{in}} = 3,07e - 1$$

$$THD_{V_o} = 17452$$

$$THD_{I_o} = 17452$$

Detalhe que os valores calculados pelo PSIM da THD de entrada em cada fase foram diferentes. No entanto, seus valores teóricos são os mesmos e só houve essa diferença em função dos métodos numéricos utilizados pelo software. Além disso, suas diferenças eram mínimas. Portanto, optamos por adicionar apenas um de seus valores no relatório.

3.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM CARGA RL

O circuito é semelhante ao anterior, com a adição de um indutor de 100 mH em série com o resistor.

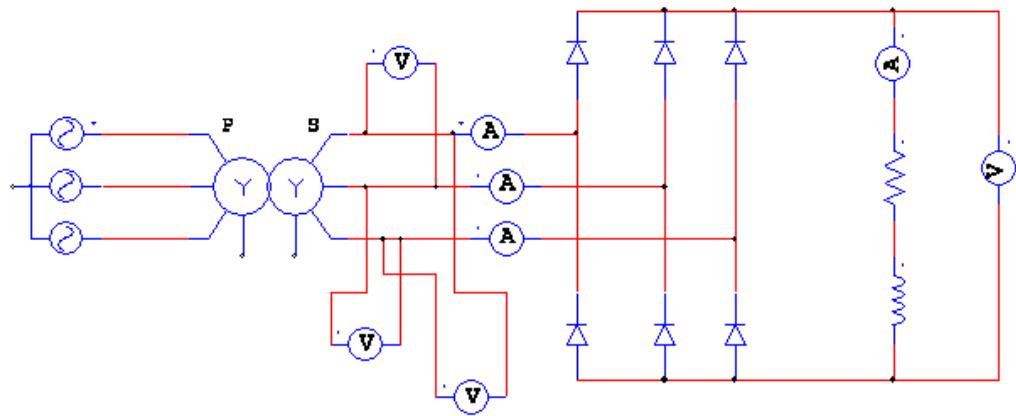


Figura 18: Retificador de Onda Completa Trifásico com Carga RL

Podemos ver as tensões e correntes de entrada e saída nas imagens a seguir:

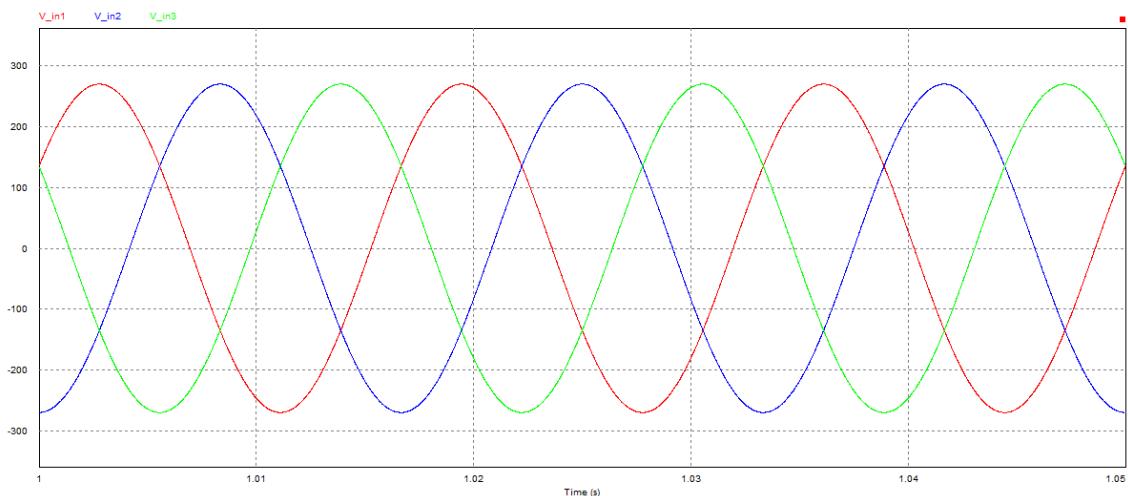


Figura 19: Tensão de Entrada do Retificador com Carga RL

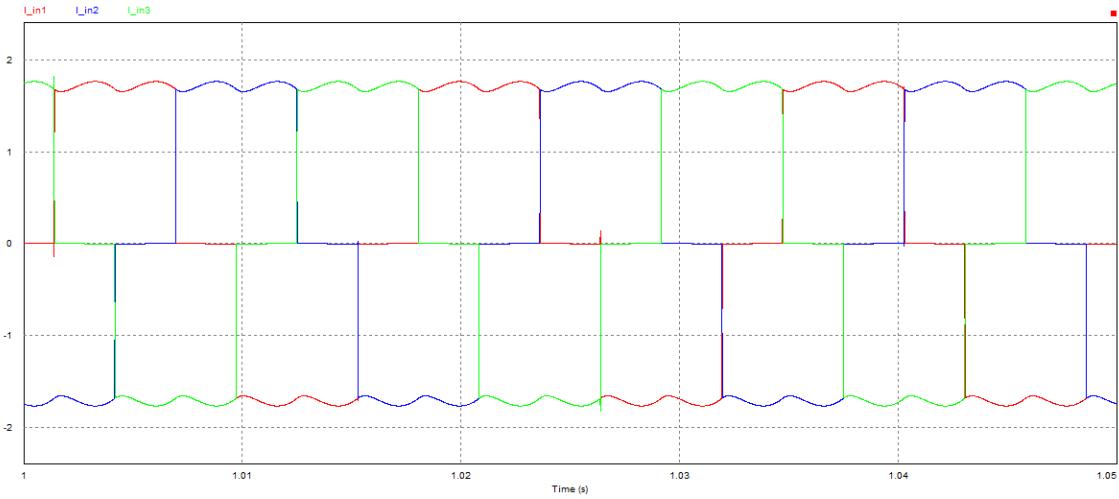


Figura 20: Corrente de Entrada do Retificador com Carga RL

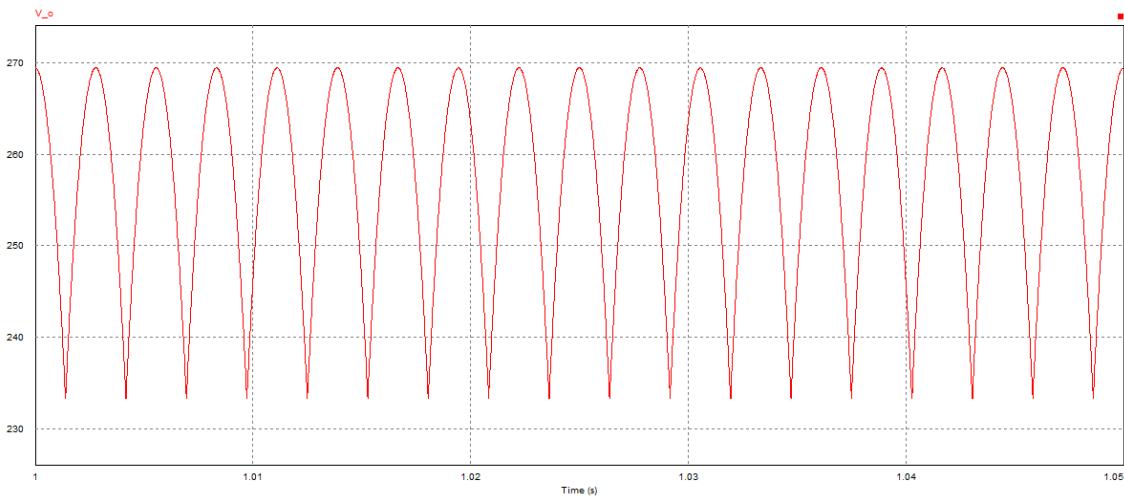


Figura 21: Tensão de Saída do Retificador com Carga RL

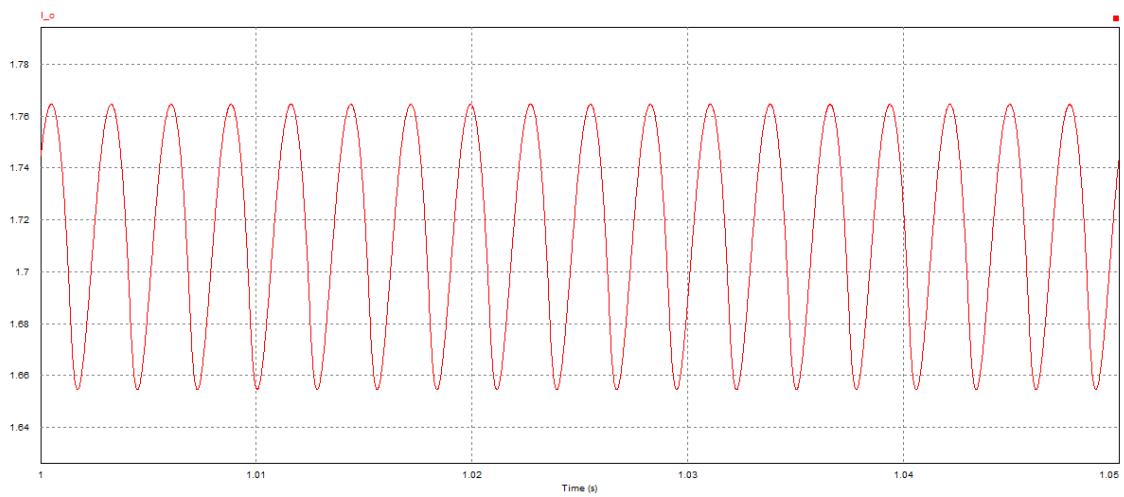


Figura 22: Corrente de Saída do Retificador com Carga RL

Podemos ver as transformadas de Fourier nas imagens a seguir:

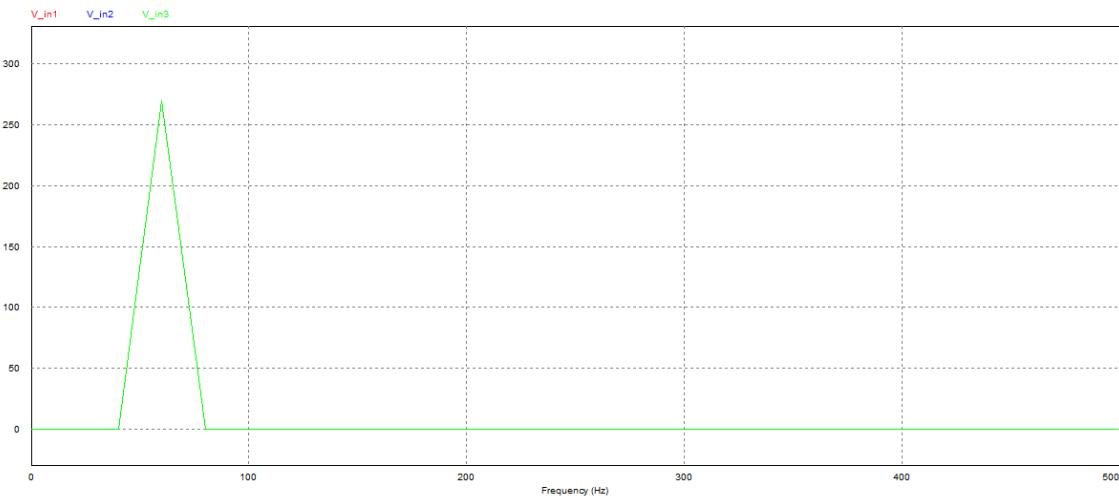


Figura 23: Transformada de Fourier para Tensão de Entrada do Retificador com Carga RL

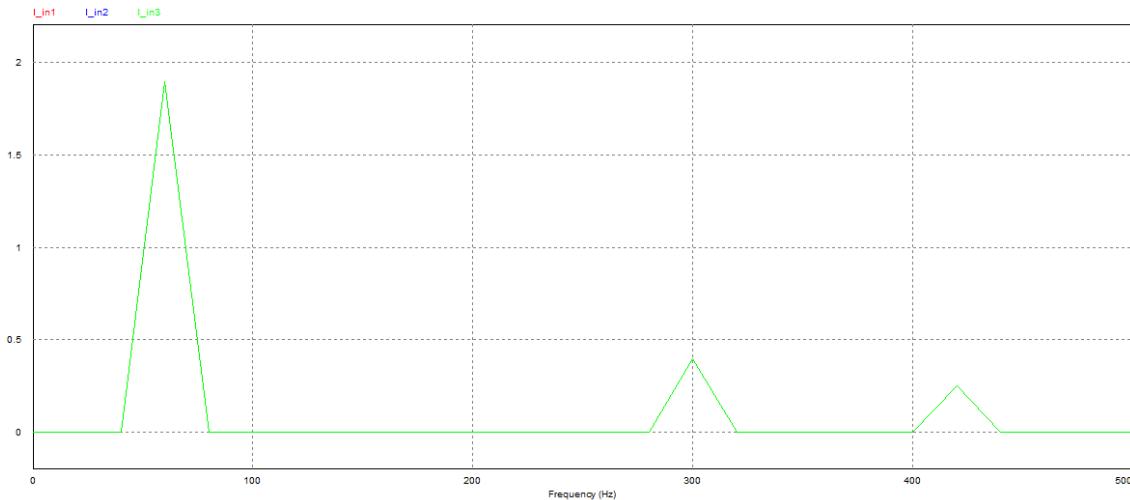


Figura 24: Transformada de Fourier para Corrente de Entrada do Retificador com Carga RL

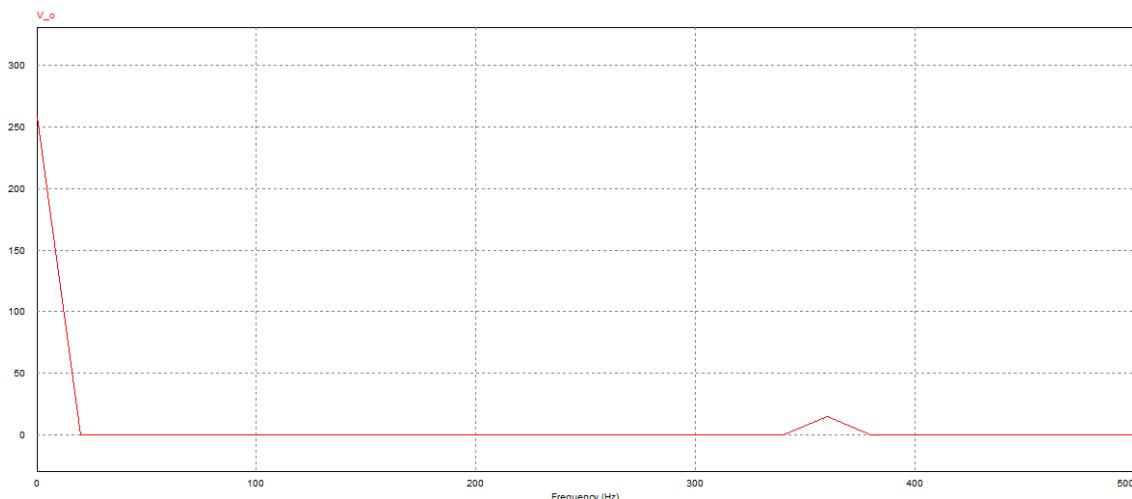


Figura 25: Transformada de Fourier para Tensão de Saída do Retificador com Carga RL

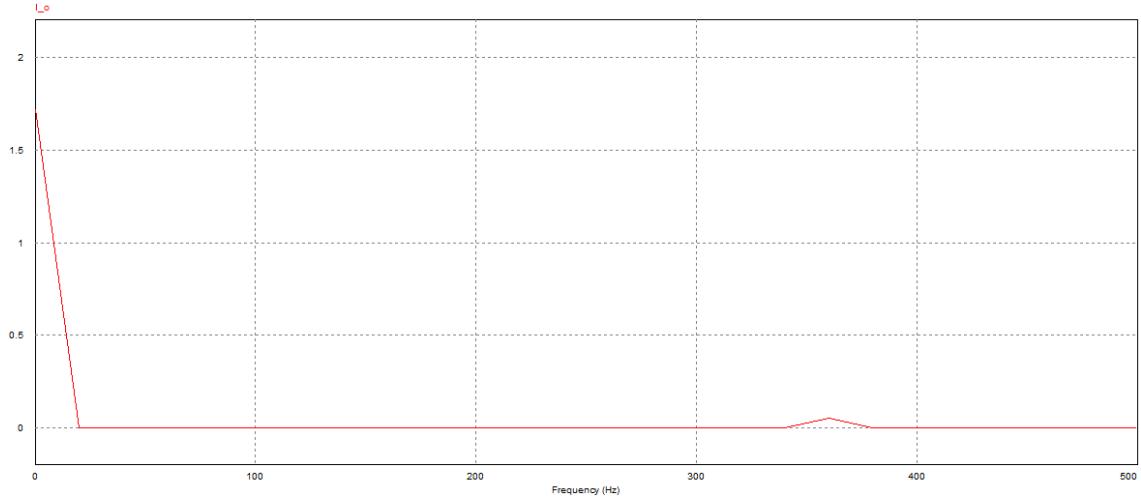


Figura 26: Transformada de Fourier para Corrente de Saída do Retificador com Carga RL

Encontramos os seguintes valores a partir do PSIM:

$$P_{in} = 219,70W$$

$$S_{in} = 266,84VA$$

$$FP_{in} = 0,823$$

$$P_o = 441,55W$$

$$S_o = 441,83VA$$

$$FP_o = 0,999$$

$$THD_{V_{in}} = 1,47e - 3$$

$$THD_{I_{in}} = 3,09e - 1$$

$$THD_{V_o} = 17440$$

$$THD_{I_o} = 51260$$

3.3 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM FILTRO CAPACITIVO

O circuito é semelhante ao anterior, com a adição de um capacitor de $500 \mu F$ em paralelo com o resistor.

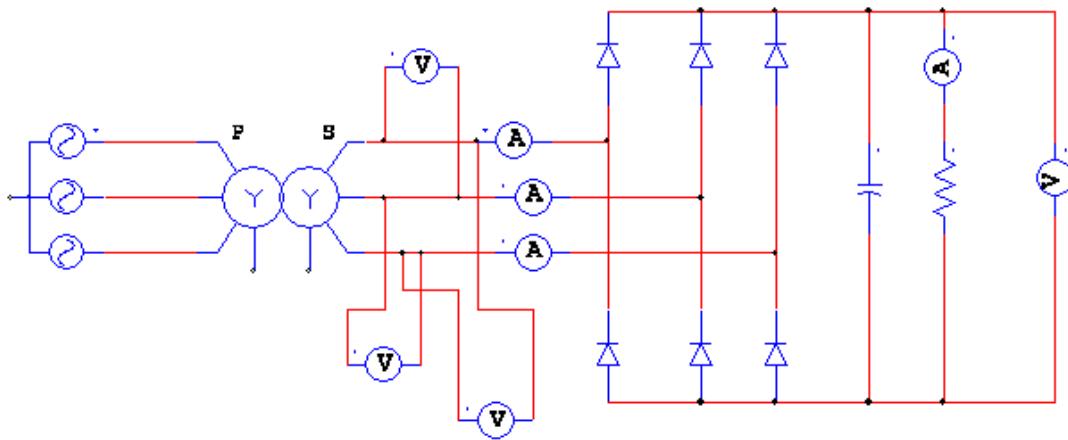


Figura 27: Retificador de Onda Completa Trifásico com Carga RC

Podemos ver as tensões e correntes de entrada e saída nas imagens a seguir:

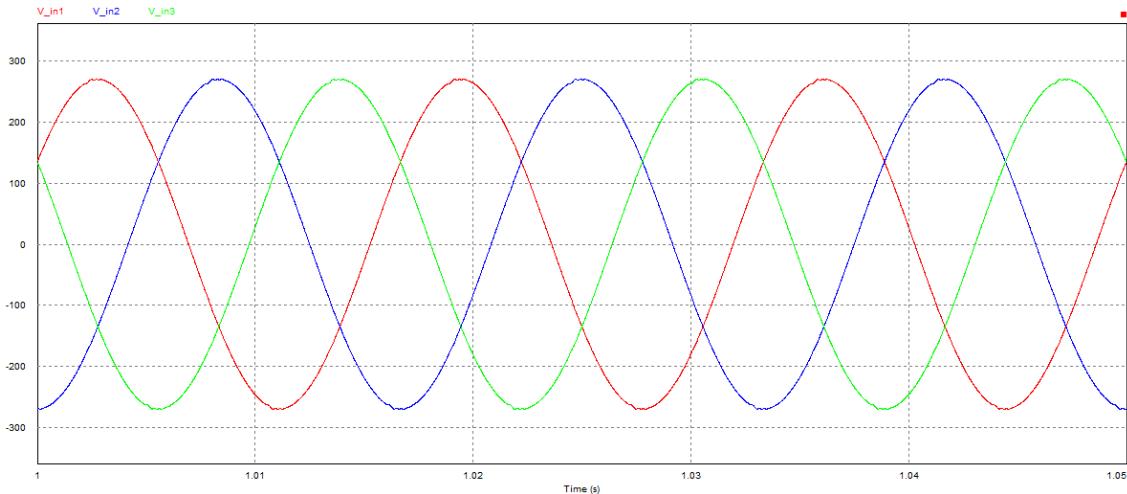


Figura 28: Tensão de Entrada do Retificador com Carga RC

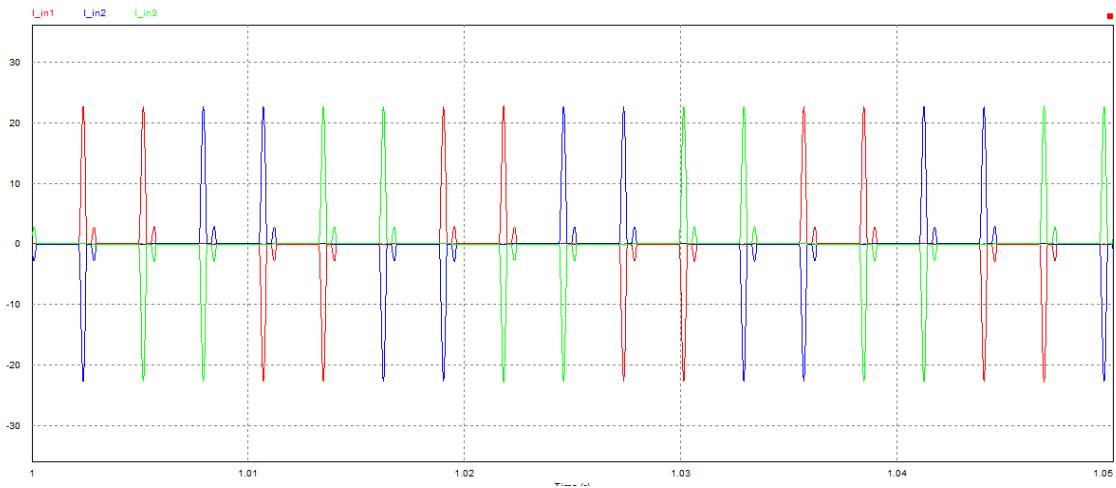


Figura 29: Corrente de Entrada do Retificador com Carga RC

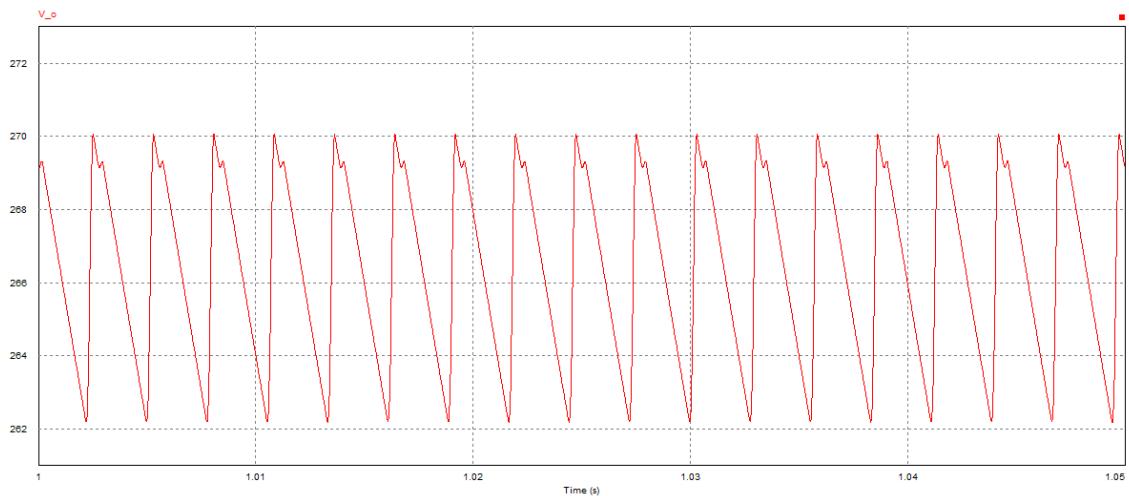


Figura 30: Tensão de Saída do Retificador com Carga RC

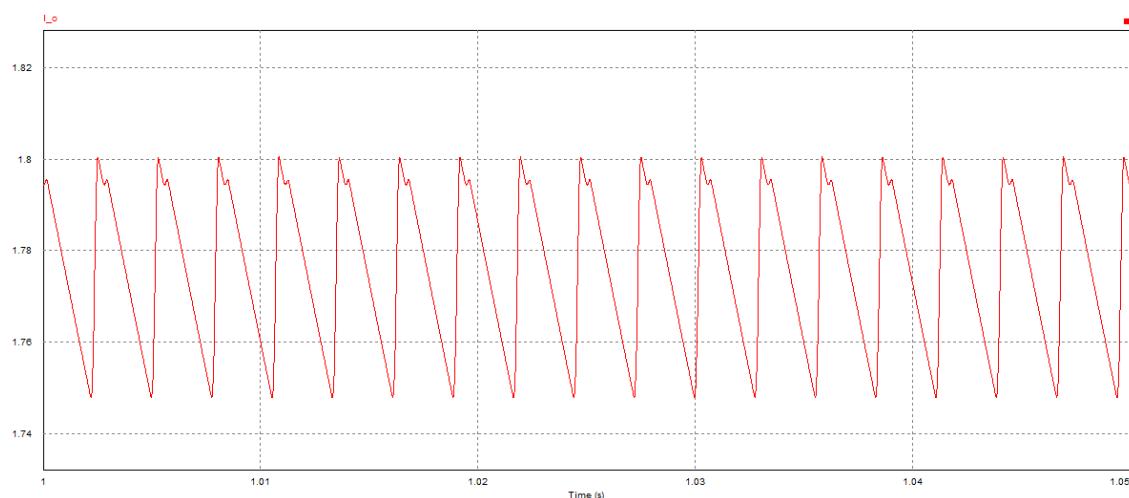


Figura 31: Corrente de Saída do Retificador com Carga RC

Podemos ver as transformadas de Fourier nas imagens a seguir:

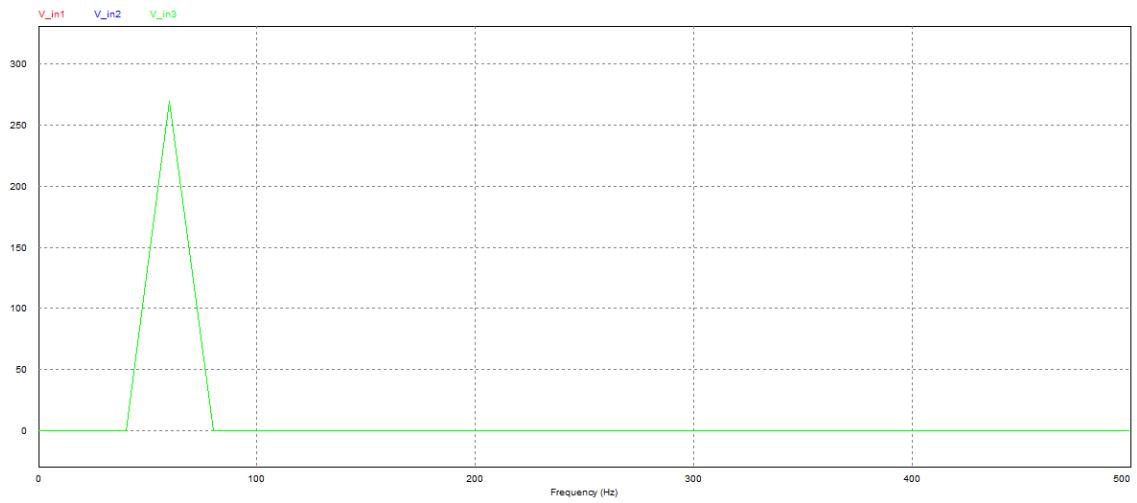


Figura 32: Transformada de Fourier para Tensão de Entrada do Retificador com Carga RC

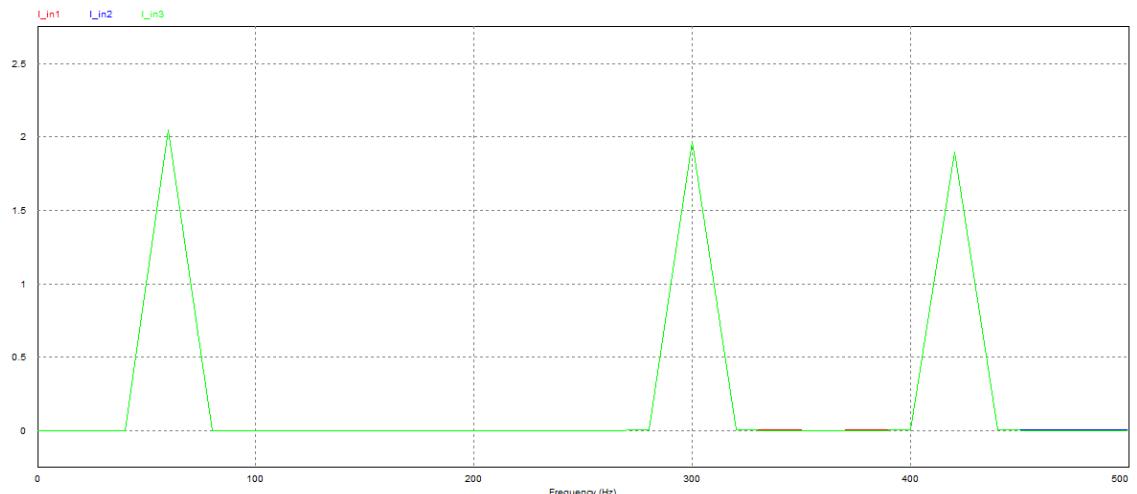


Figura 33: Transformada de Fourier para Corrente de Entrada do Retificador com Carga RC

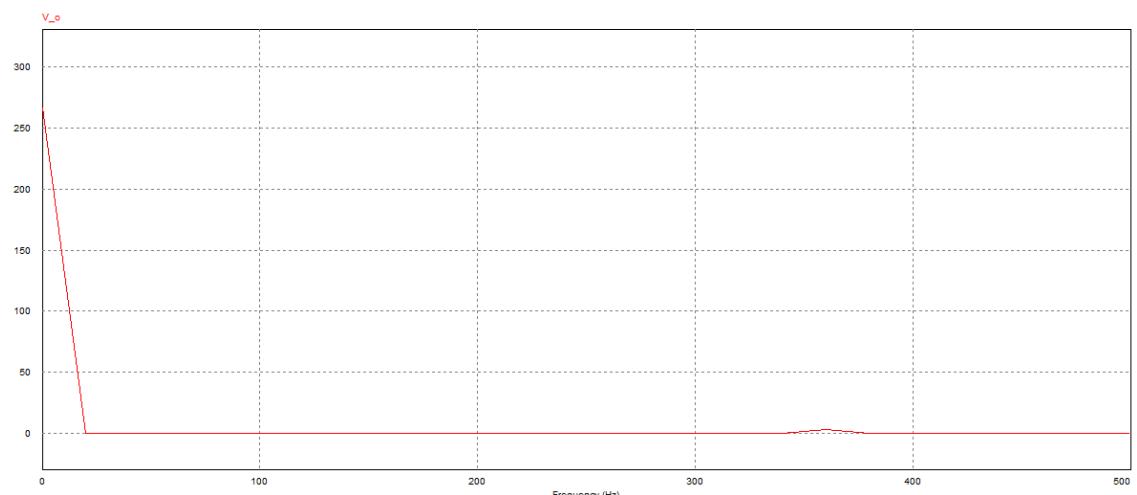


Figura 34: Transformada de Fourier para Tensão de Saída do Retificador com Carga RC

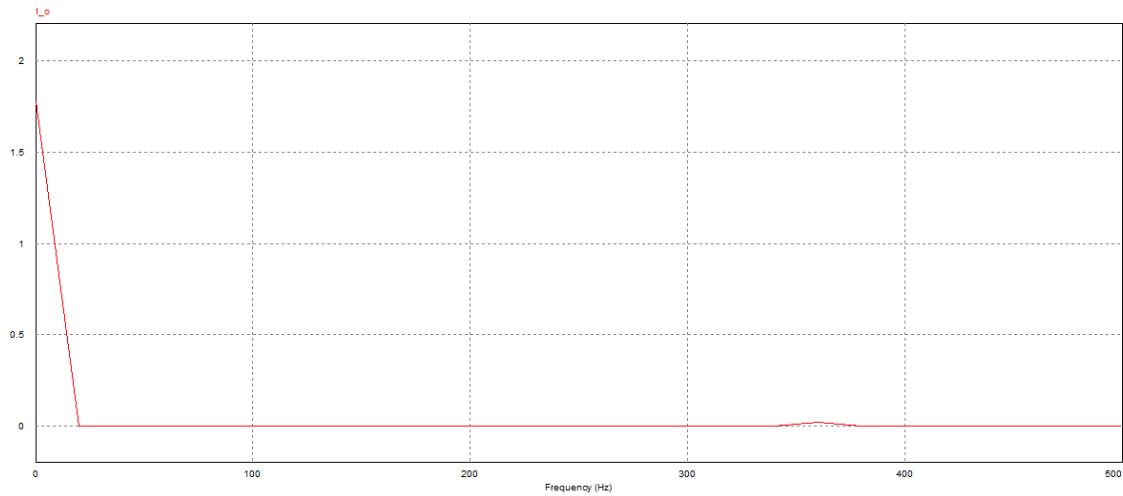


Figura 35: Transformada de Fourier para Corrente de Saída do Retificador com Carga RC

Encontramos os seguintes valores a partir do PSIM:

$$P_{in} = 255,80W$$

$$S_{in} = 829,66VA$$

$$FP_{in} = 0,308$$

$$P_o = 472,92W$$

$$S_o = 472,92VA$$

$$FP_o = 1$$

$$THD_{V_{in}} = 2,37e - 3$$

$$THD_{I_{in}} = 2,84$$

$$THD_{V_o} = 90966$$

$$THD_{I_o} = 90966$$

4 EXPERIMENTO

4.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM CARGA R

Foi montada a ponte de Graetz alimentando uma carga resistiva de $150\ \Omega$ (2 resistores de $300W$ e $75\ \Omega$ em série). A tensão que alimenta o retificador é proveniente de um transformador trifásico cujo secundário utilizado está ligado em "Y", de forma a termos acesso ao terminal neutro. A montagem física do circuito pode ser visualizada na figura abaixo.

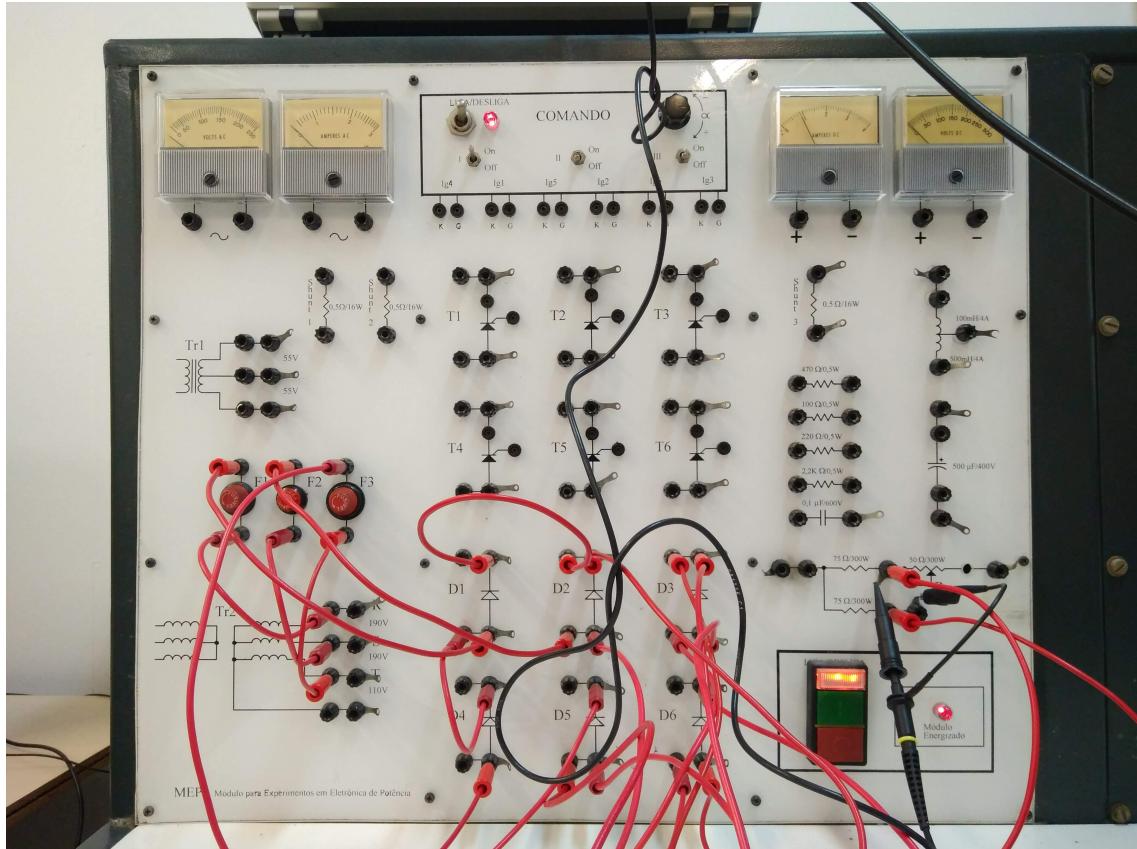


Figura 36: Montagem da Ponte Graetz com Carga Resistiva

Na figura, as ponteiras estão posicionadas com a intenção de medir alguns valores da carga R. Com $110\ V_{rms}$ para cada fase, temos as formas de onda da corrente e da tensão na carga na próxima imagem.

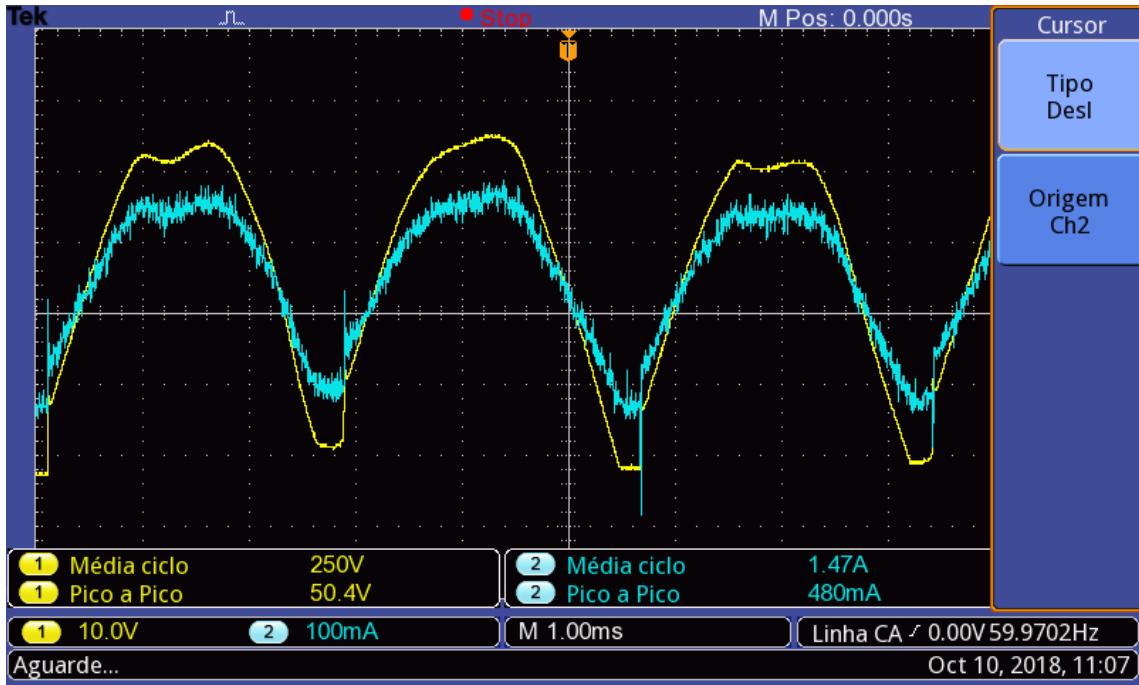


Figura 37: Tensão (amarelo) e Corrente (azul) na Carga Resistiva saída-carga-r

A primeira coisa que podemos notar é que a escala de tempo está em 1ms e pela tela do osciloscópio, cada pulso tem aproximadamente 2,8ms de duração. Como a tensão da rede é 60Hz, ou seja, tem um período de 16,67ms, temos um total de 6 pulsos ($6 \times 2,8\text{ms} \approx 16,67\text{ms}$) ao longo de um ciclo de tensão monofásica da rede. Isso ocorre pois a ponte retificadora em questão coloca sempre a maior tensão monofásica instantânea menos a menor tensão monofásica instantânea em sua saída, ou seja, vemos na saída a envoltória de todas as tensões de linha possíveis, são elas (supondo V_a , V_b e V_c as tensões de fase): V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} , V_{ba} , V_{cb} e V_{ac} , que são 6, dando origem aos 6 pulsos observados (apenas 3 aparecem na tela do osciloscópio).

Com a intenção de encontrar o fator de ondulação da tensão e da corrente na carga, mediu-se os valores pico-a-pico (I_{p-p} e V_{p-p}) e médio (I_m e V_m) da tensão e corrente. Foi utilizado os cursores para medição do valor pico-a-pico de corrente para evitar uma leitura equivocada do osciloscópio por conta dos picos de corrente causados por algum fator parasítico do circuito em questão. Os valores encontrados foram:

$$I_{p-p} = 278 \text{ mA}$$

$$I_m = 1,47 \text{ A}$$

$$V_{p-p} = 50,4 \text{ V}$$

$$V_m = 250 \text{ V}$$

O que nos dá um fator de ondulação na carga para a corrente e para a tensão de cerca de:

$$\Delta I = 0,1891$$

$$\Delta V = 0,2016$$

Claro que aqui os valores deveriam ser iguais, já que aquilo que difere a tensão da corrente é apenas um fator multiplicativo, mas como a precisão aqui não é muito grande, os valores são apenas próximos.

Agora com a intenção de medir as características de entrada do circuito, ou seja, da fonte, moveu-se as ponteiras de tensão e corrente para o secundário do transformador de forma a visualizar as formas de onda de tensão e corrente de fase (utilizando do terminal neutro para medição da

tensão). Temos a seguir, as formas de onda da tensão, corrente e potência (multiplicação dos 2 canais, em vermelho) na entrada do nosso circuito.

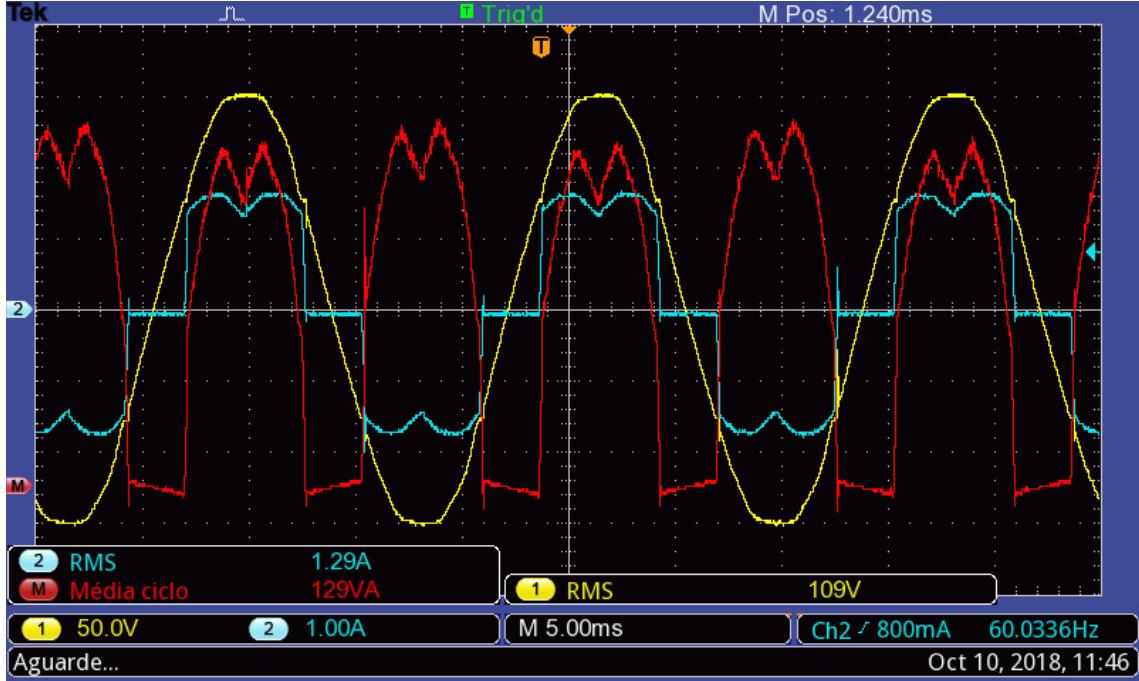


Figura 38: Tensão (amarelo), Corrente (azul) e Potência (vermelho) na Entrada do Circuito com Carga Resistiva

Temos então os seguintes valores para as potências monofásicas no secundário do transformador:

$$P = 129 \text{ W}$$

$$S = 140,61 \text{ VA}$$

Logo, os resultados trifásicos são:

$$P = 387 \text{ W}$$

$$S = 421,83 \text{ VA}$$

$$FP = 0,917$$

Podemos notar que o fator de potência aqui não é unitário mesmo com a carga resistiva, já que há uma distorção harmônica diferente de 0 (claramente a forma da onda da corrente não é a mesma que a da tensão). No entanto, como a forma de onda da corrente tem uma forte componente fundamental de 60Hz em fase com a onda de tensão, o fator de potência acaba sendo um tanto quanto alto (0,917).

4.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM CARGA RL

Temos a seguir a montagem física do retificador em questão, agora com uma carga RL, tal que $R = 150 \Omega$ e $L = 100 \text{ mH}$.

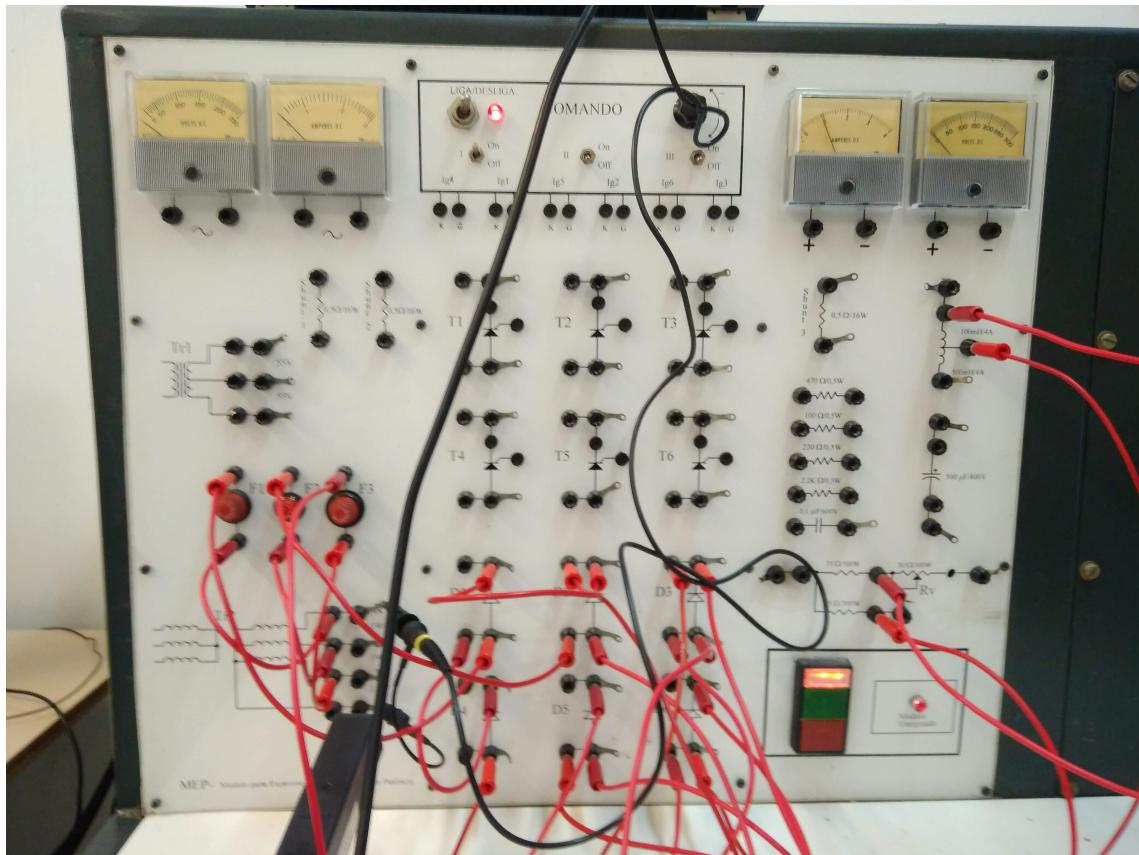


Figura 39: Montagem da Ponte Graetz com Carga RL

Na figura temos as ponteiras posicionadas a fim de se medir alguns valores na entrada do circuito, mas para manter o padrão, vamos primeiro à análise da tensão e corrente na nossa carga. Aqui, a nossa "carga" é simplesmente a resistência em série com o indutor, o que seria uma simulação de motor, nesse caso. Em seguida, temos as formas de onda de tensão e corrente na carga.

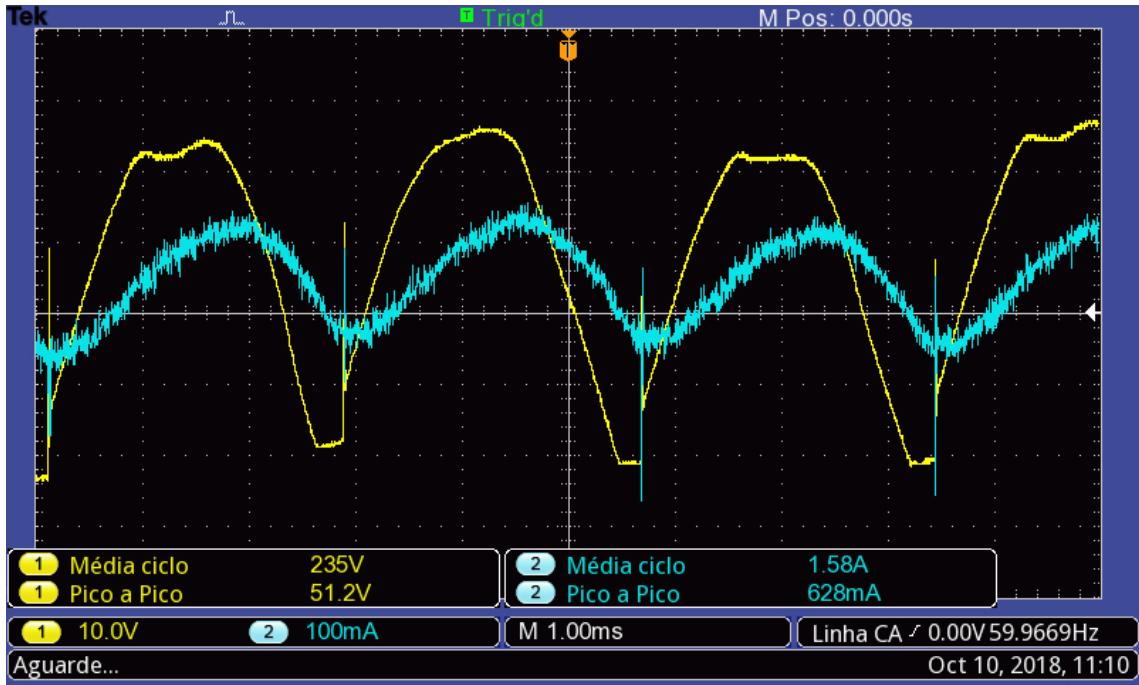


Figura 40: Tensão (amarelo) e Corrente (azul) na Carga RL

Já podemos perceber a deformação típica na corrente causada pelo indutor. Vale notar também que, como o transformador usado não é perfeitamente equilibrado, as tensões de fase podem ter seus valores de pico diferentes entre si, ainda mais as tensões de linha, onde aqui temos as suas envoltórias como forma de onda da tensão. Dessa maneira, como estamos usando média ciclo, e nenhum ciclo é exatamente igual ao outro, temos uma "média ciclo" onde não se sabe de qual pulso presente na tela veio.

Novamente, medindo os valores pico-a-pico e médio da tensão e corrente, temos os seguintes resultados:

$$Ip - p = 164 \text{ mA}$$

$$Im = 1,58 \text{ A}$$

$$Vp - p = 51,2 \text{ V}$$

$$Vm = 235 \text{ V}$$

O que nos dá um fator de ondulação na carga para a corrente e para a tensão de cerca de:

$$\Delta I = 0,1038$$

$$\Delta V = 0,2179$$

Claro que, como a nossa carga é RL, é de se esperar que o valor médio na carga seja o mesmo que na carga puramente resistiva, e como estamos medindo tensão e corrente em toda a carga RL, teremos o efeito do indutor apenas na corrente, reduzindo seu fator de ondulação.

A seguir, temos a imagem do osciloscópio com as formas de onda de corrente, tensão e potência na entrada do circuito montado (secundário do transformador).

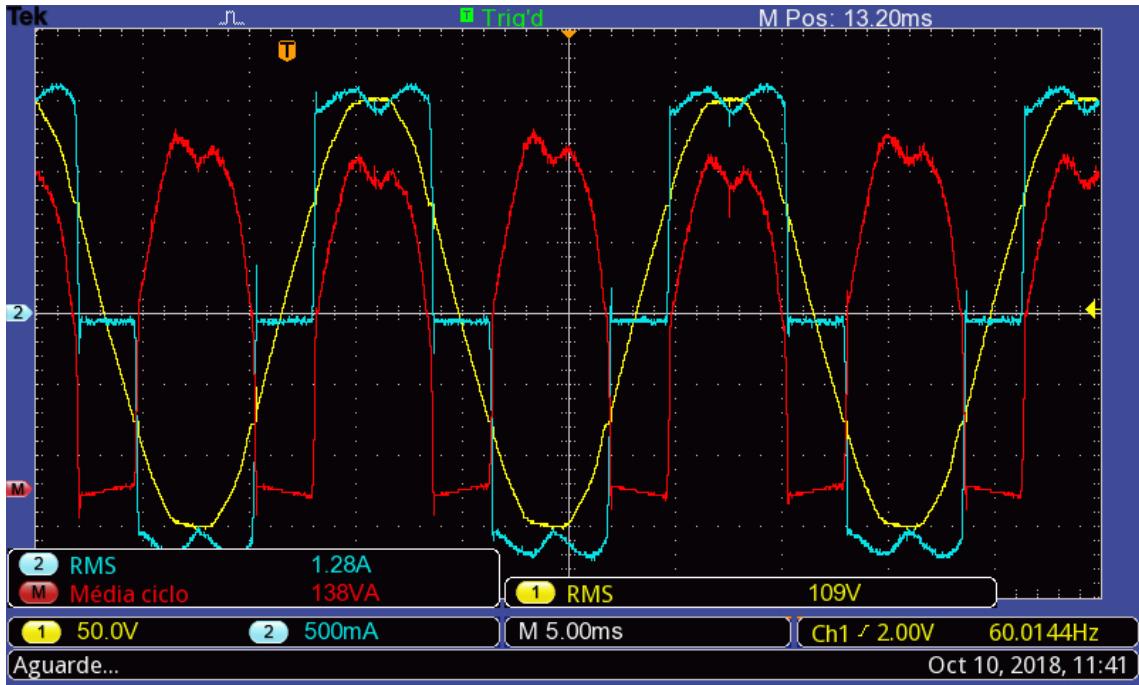


Figura 41: Tensão (amarelo), Corrente (azul) e Potência (vermelho) na Entrada do Circuito com Carga RL

Temos então os seguintes valores para as potências monofásicas no secundário do transformador:

$$P = 138 \text{ W}$$

$$S = 139,52 \text{ VA}$$

Logo, os resultados trifásicos são:

$$P = 414 \text{ W}$$

$$S = 418,56 \text{ VA}$$

$$FP = 0,989$$

Esse resultado não é muito preciso pois, assim como nas medidas da carga resistiva, usamos para o cálculo da potência média, a "média ciclo", ou seja, estamos pegando a média do PRIMEIRO ciclo completo que aparece na tela do osciloscópio. Aqui, temos que o primeiro ciclo completo que aparece na tela para o canal MTM (vermelho) é o maior na tela inteira. Dessa maneira, a média ciclo é maior que a média total e o fator de potência tende a resultar em um valor maior que o esperado (pois estamos pegando um "P" maior para um mesmo "S"). No caso da carga resistiva, o primeiro ciclo completo é o mais baixo da tela, diminuindo a "média ciclo" e assim, fazendo com que o fator de potência resulte num mais baixo que o esperado.

Tomando os valores médios do canal MTM para a entrada dos circuitos com carga R e RL pelo matlab (utilizando do .CSV), temos que para a carga R a média é 134,5432 W e para a carga RL a média é 133,5072 W. Recalculando os fatores de potência com base nesses novos "P", temos os seguintes fatores de potência:

$$\text{Carga R} = 0,957$$

$$\text{Carga RL} = 0,964$$

O que diminui um pouco a discrepância dos resultados observados para a carga R e carga RL. Mostra também que de fato, o fator de potência para a carga R acaba sendo maior e para a carga RL acaba sendo menor (analisando a média da tela inteira ao invés de um ciclo que é diferente dos outros).

4.3 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA TRIFÁSICO COM CARGA RC

Temos a seguir a montagem física do retificador com carga RC.

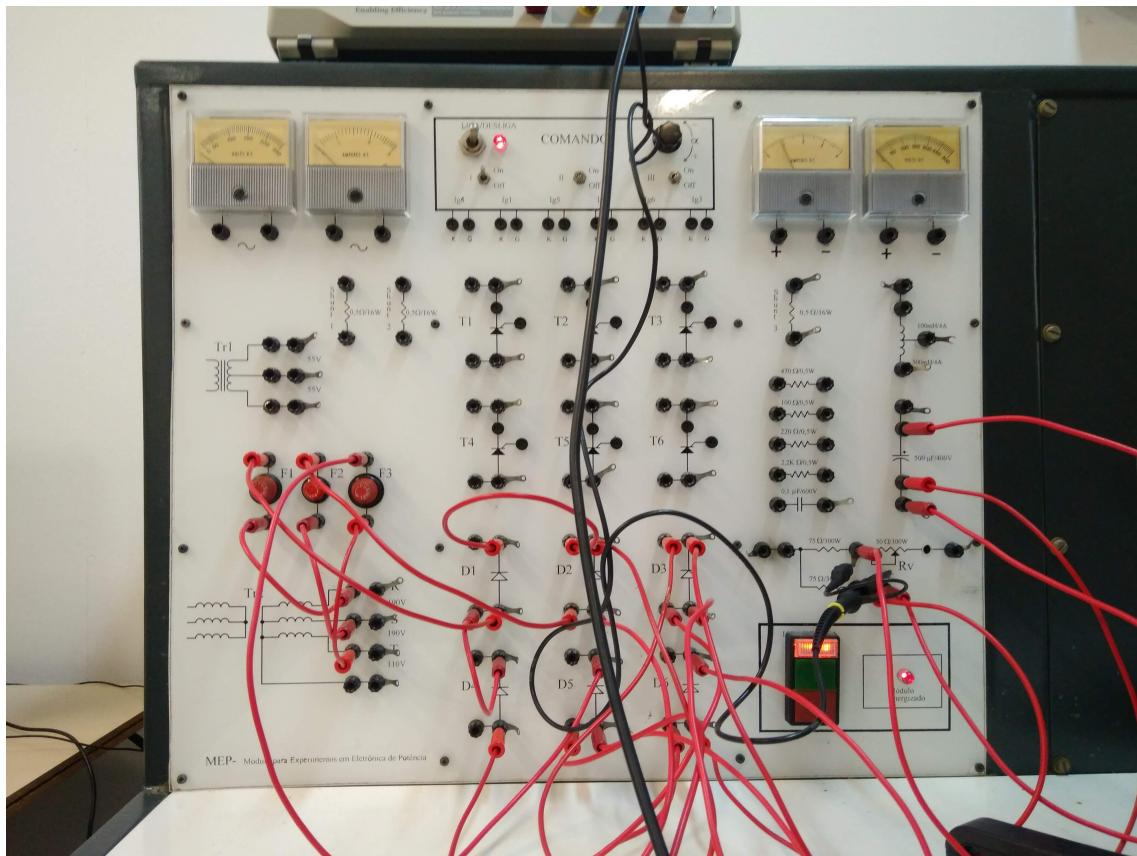


Figura 42: Montagem da Ponte Graetz com Carga RC

Aqui foi utilizado um resistor de $150\ \Omega$ e capacitor de $500\ \mu F$ como "carga", no entanto, a nossa verdadeira carga aqui é somente o resistor, pois estamos pensando em algo parecido como uma fonte de alimentação CC com um capacitor na saída conectada a uma carga resistiva.

As ponteiras na imagem estão colocadas de tal maneira a medir os valores na carga (resistor), isto é, corrente no resistor e tensão no resistor (que também é a mesma que no capacitor). As formas de onda da tensão e corrente no resistor estão na figura a seguir.

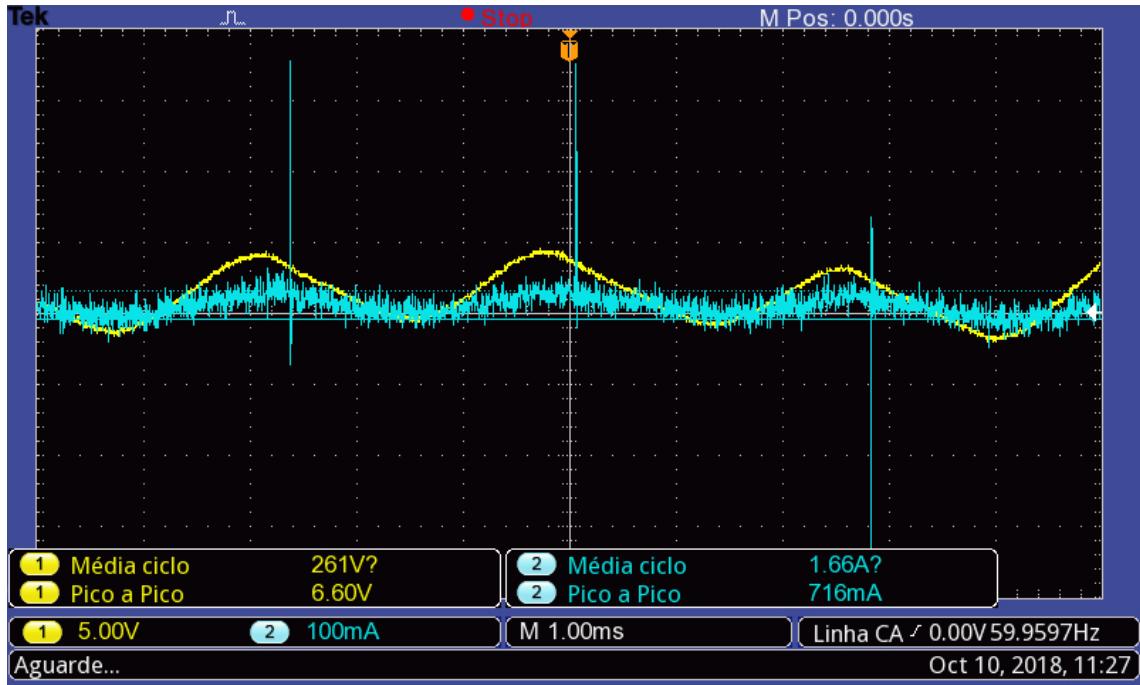


Figura 43: Tensão (amarelo) e Corrente (azul) na Carga RC

Medindo os valores pico-a-pico e médio da tensão e corrente, temos os seguintes resultados:

$$Ip - p = 40 \text{ mA}$$

$$Im = 1,66 \text{ A}$$

$$Vp - p = 6,60 \text{ V}$$

$$Vm = 261 \text{ V}$$

O que nos dá um fator de ondulação na carga para a corrente e para a tensão de cerca de:

$$\Delta I = 0,0241$$

$$\Delta V = 0,0254$$

Ressaltando que a precisão das medidas não é muito boa, já que além de termos o problema da "média ciclo" aqui, temos também o problema do ruído na ponteira de corrente, que nesse caso é quase maior que a própria variação pico-a-pico que se utilizou o cursor para medir.

É interessante que temos aqui basicamente uma fonte CC que está fornecendo 261 V e 1,6 A à carga com um fator de ondulação menor que 3 %.

A seguir temos as formas de onda de corrente tensão e potência para a entrada deste circuito.

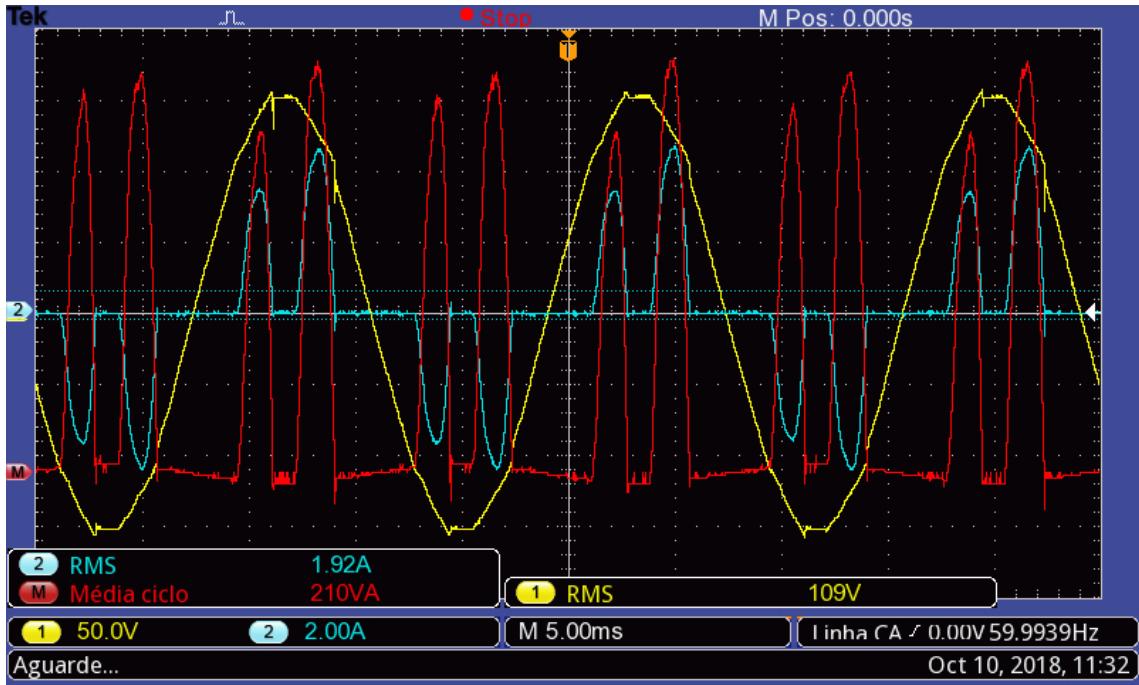


Figura 44: Tensão (amarelo), Corrente (azul) e Potência (vermelho) na Entrada do Circuito com Carga RC

Aqui podemos ver o quanto grave é o problema da "média ciclo" nesse caso. Pelas medidas temos:

$$P = 210 \text{ W}$$

$$S = 209,28 \text{ VA}$$

Logo, os resultados trifásicos são:

$$P = 630 \text{ W}$$

$$S = 627,84 \text{ VA}$$

$$FP = 1,003$$

Claro que o fator de potência não pode ser maior que 1. Por esse motivo, recalcula-se o "P" utilizando agora o valor médio da tela inteira para o canal MTM (vermelho) através do matlab e o arquivo .CSV gerado dessa imagem.

Fazendo o mesmo que no caso R e RL, chega-se a um valor médio de 145,8896 W, mostrando que fica muito longe do valor visto com o "média ciclo" por motivos já explicados. Recalculando o fator de potência usando esse valor de "P" e o valor antigo de "S", chega-se num novo fator de potência que é:

$$FP = 0,6971$$

O que faz muito mais sentido pois dos 3 circuitos, o que mais deveria distorcer a corrente de entrada é o RC, já que temos picos de corrente para carregar o capacitor e isso causa uma grande distorção harmônica diminuindo bastante o fator de potência do circuito. Na verdade, quanto mais aumentássemos o valor de "C", mais distorção iríamos causar na corrente de entrada e menor ainda seria o fator de potência do circuito.

Vale notar também a distorção na tensão de entrada causada pelos picos de corrente de cerca de 4 A. Essa distorção fica ainda mais evidente quando analisamos a corrente de partida desse circuito, que está na imagem a seguir.

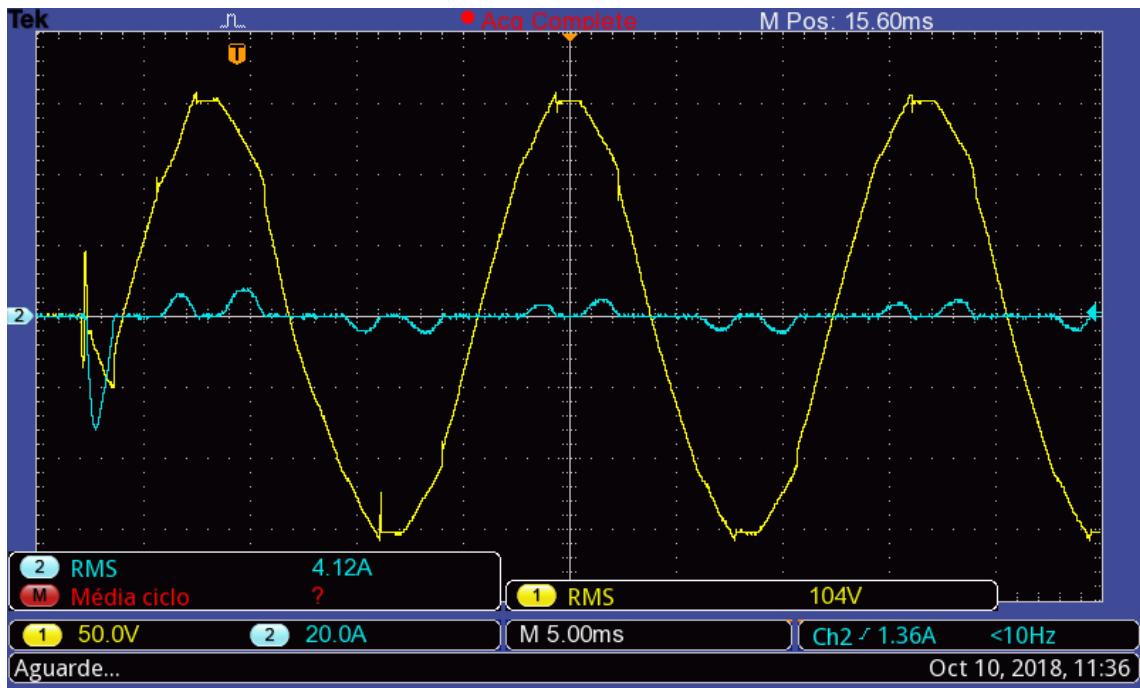


Figura 45: Corrente de Partida Circuito RC. Corrente em azul e Tensão em amarelo

Aqui, percebemos que o circuito parte quando a tensão da rede é bem diferente de 0, no entanto, quando o circuito parte assim, temos um capacitor descarregado em paralelo com uma fonte de tensão. Esse evento faz com que uma corrente de curto-círcuito circule de forma a "encher" o capacitor o mais rápido possível (corrente medida tem cerca de 30 A), porém, como temos indutâncias e resistências não desejadas ao longo do circuito, a corrente é tão elevada que faz o módulo da tensão cair para próximo de 0 e depois lentamente subir (depois do capacitor estar carregado). Após esse acontecimento, temos o regime permanente do circuito onde existem os picos repetitivos de corrente de 4 A.

Essa corrente de partida não existe quando o circuito é com carga puramente resistiva ou RL, já que não temos motivo nenhum para termos uma corrente de curto-círcuito quando ligamos o circuito (não há 2 fontes de tensão em paralelo como no caso do capacitor, que pode ser visto como uma fonte de tensão).

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>

O código utilizado neste laboratório também estará em um apêndice no final deste relatório.

5.1 INTRODUÇÃO E REPRODUÇÃO DOS ORIGINAIS DO OSCILOSCÓPIO

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 e saídas dos três circuitos, com carga resistiva (carga R), carga resistiva e indutiva (carga RL) e carga resistiva e capacitativa (carga RC). Observar que no retificador de carga RC a capacitância está em paralelo com a resistência, servindo de filtro como apresentado na figura 7.

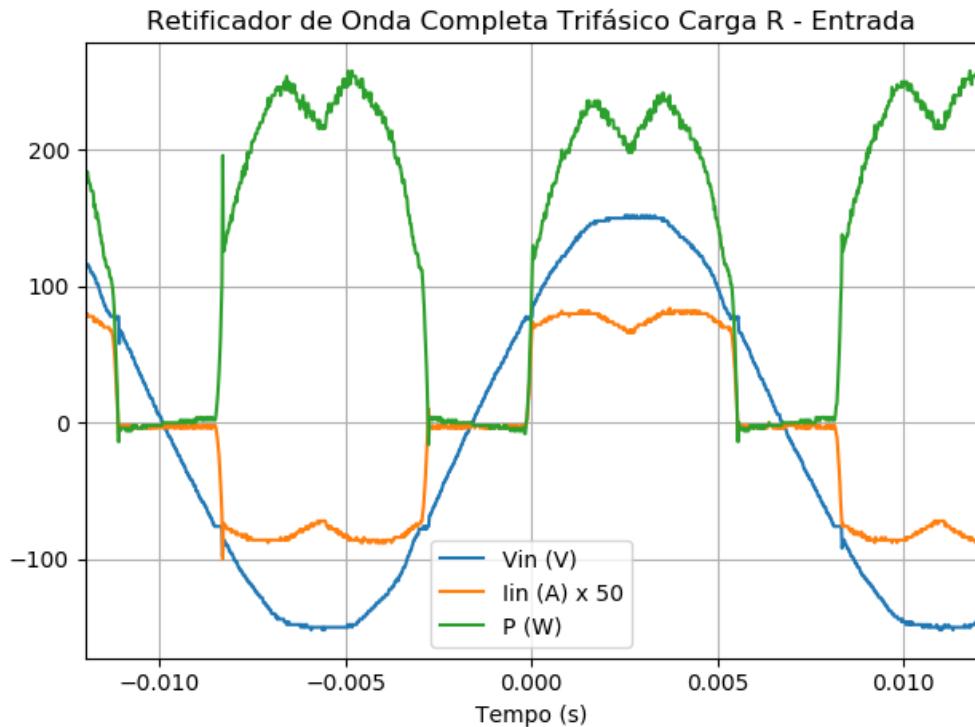


Figura 46: Tensão, Corrente e Potência na Entrada para o Retificador com Carga R.

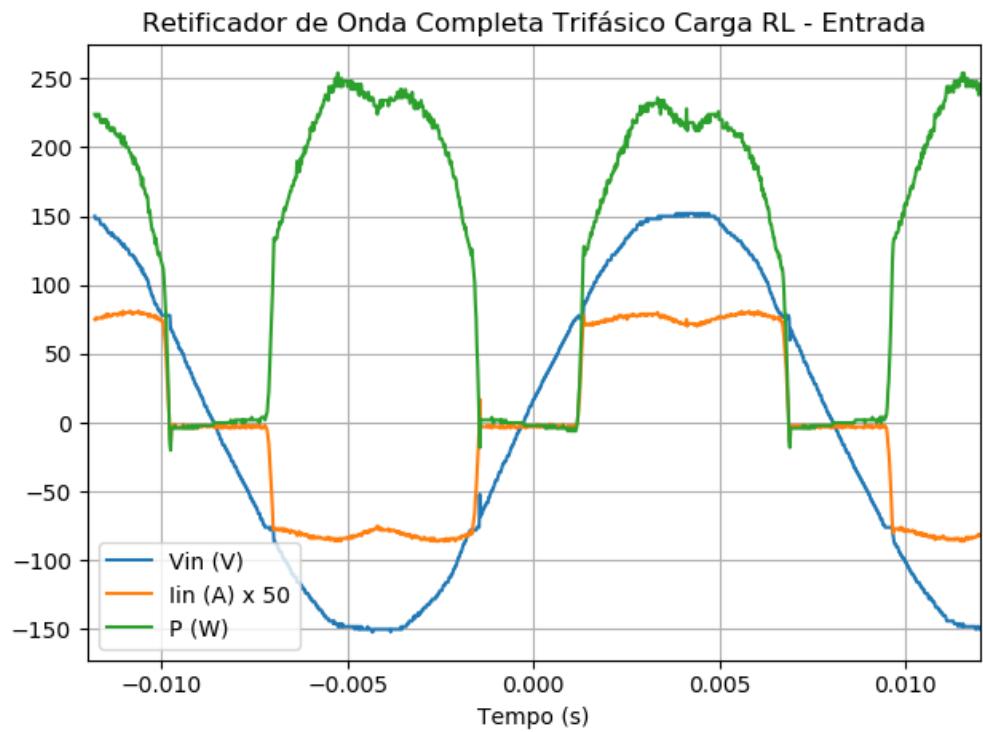


Figura 47: Tensão, Corrente e Potência na Entrada para o Retificador com Carga RL.

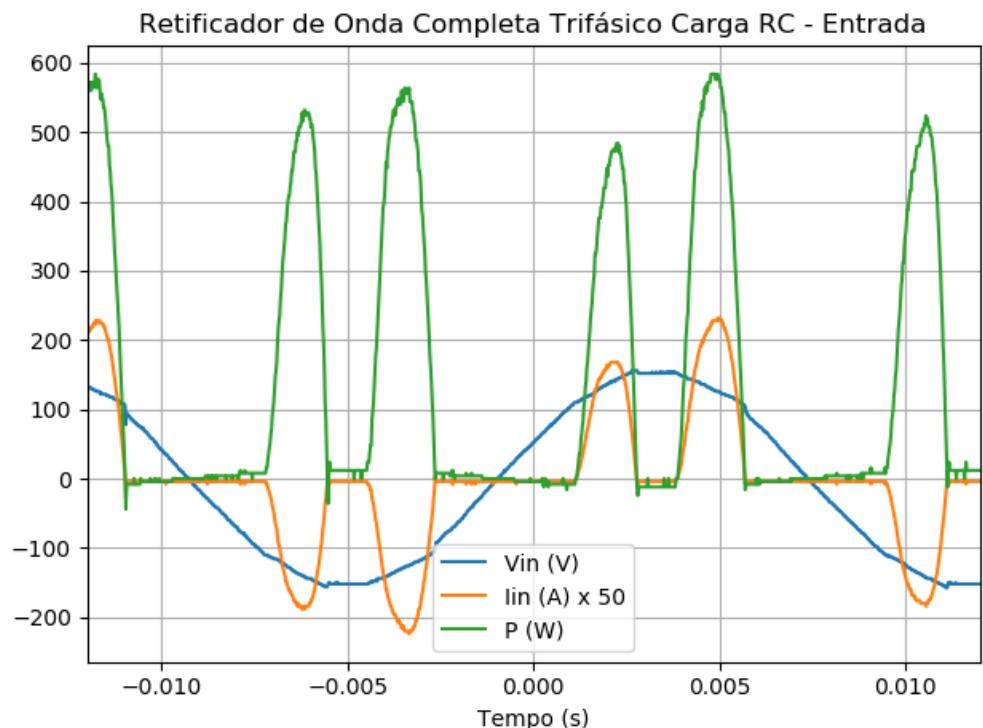


Figura 48: Tensão, Corrente e Potência na Entrada para o Retificador com Carga RC.

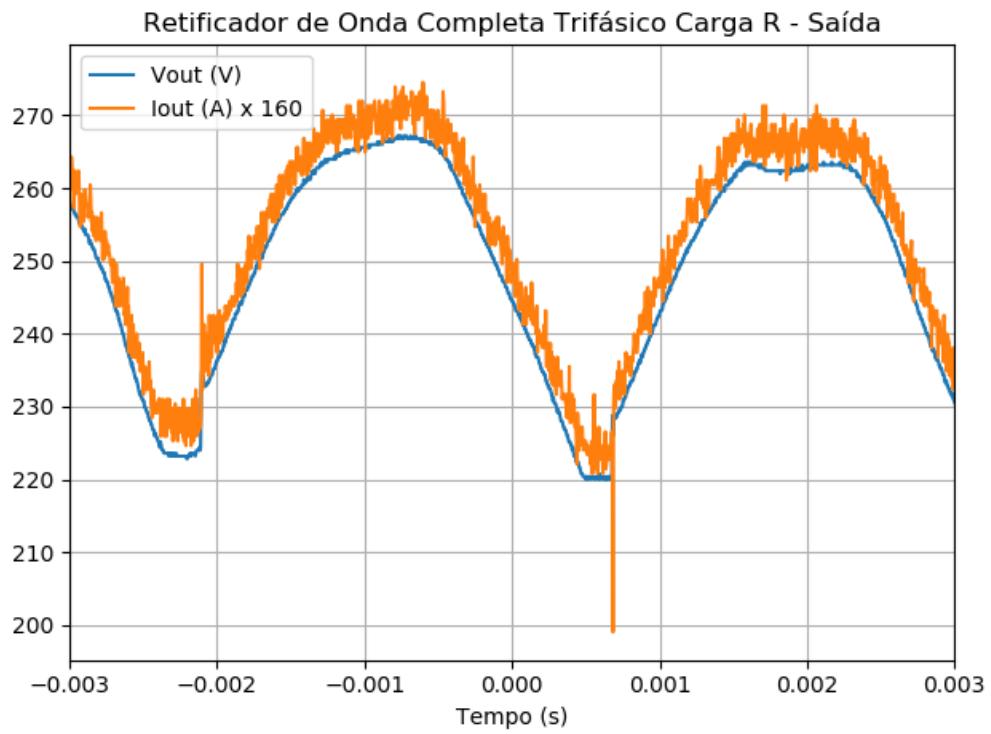


Figura 49: Tensão e Corrente na Saída para o Retificador com Carga R.

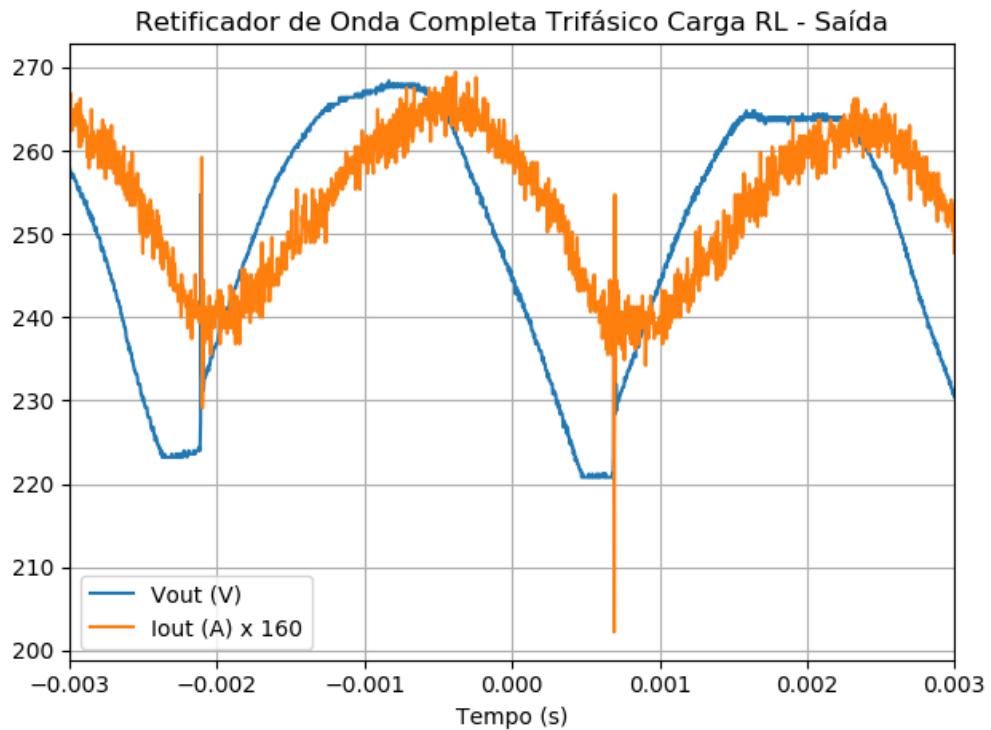


Figura 50: Tensão e Corrente na Saída para o Retificador com Carga RL.

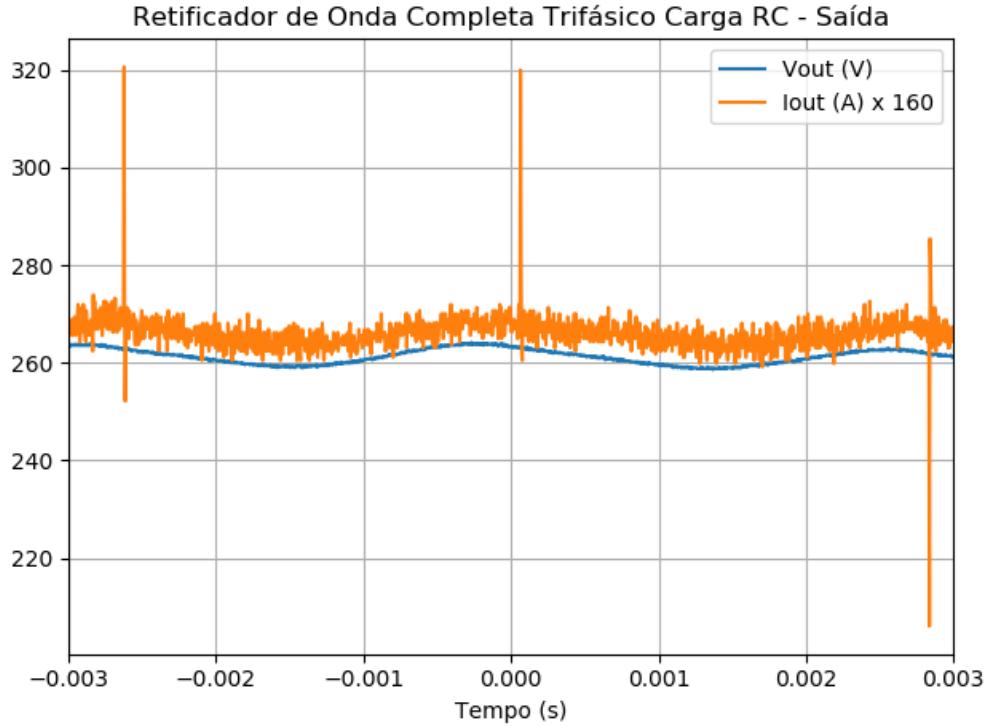


Figura 51: Tensão e Corrente na Saída para o Retificador com Carga RC.

Observar que nas Figuras 46, 47 e 48 a corrente foi multiplicada por um fator 50 para atender a mesma escala utilizada no osciloscópio. Nas figuras 49, 50 e 51 está sendo analisado a variação da corrente e tensão de saída dos circuitos. Observar a semelhança de todos com os gráficos com o esperado na teoria. A corrente de entrada do circuito RL teve um achatamento em seu pico como esperado e a corrente do RC ficou com picos apenas onde o capacitor está sendo carregado. Também é interessante observar a redução dos valores de pico a pico na saída do circuito RC que funciona como um filtro, ficando praticamente o valor constante das ondas. As formas de ondas plotadas com nosso algoritmo em Python estão praticamente idênticas as formas vistas no osciloscópio, cumprindo este objetivo.

5.2 CÁLCULO E PLOT DAS TRANSFORMADAS DE FOURIER

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. 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. Este código pode ser conferido no link do github acima ou no apêndice.

O osciloscópio sempre gera 2500 amostras. Utilizando um tempo de 2,5 ms por divisão do osciloscópio, como são 10 divisões de tempo, da 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. O ideal é sempre pegar uma resolução de frequência que seja divisor da frequência original, isto é análogo a você pegar múltiplos de um período completo no tempo. Assim utilizamos 5 ms por divisão do osciloscópio nas entradas, que em 60 Hz da exatamente 3 períodos completos, ou seja, resolução de frequência de 20 Hz. Segue abaixo os gráficos das FFTs das entradas.

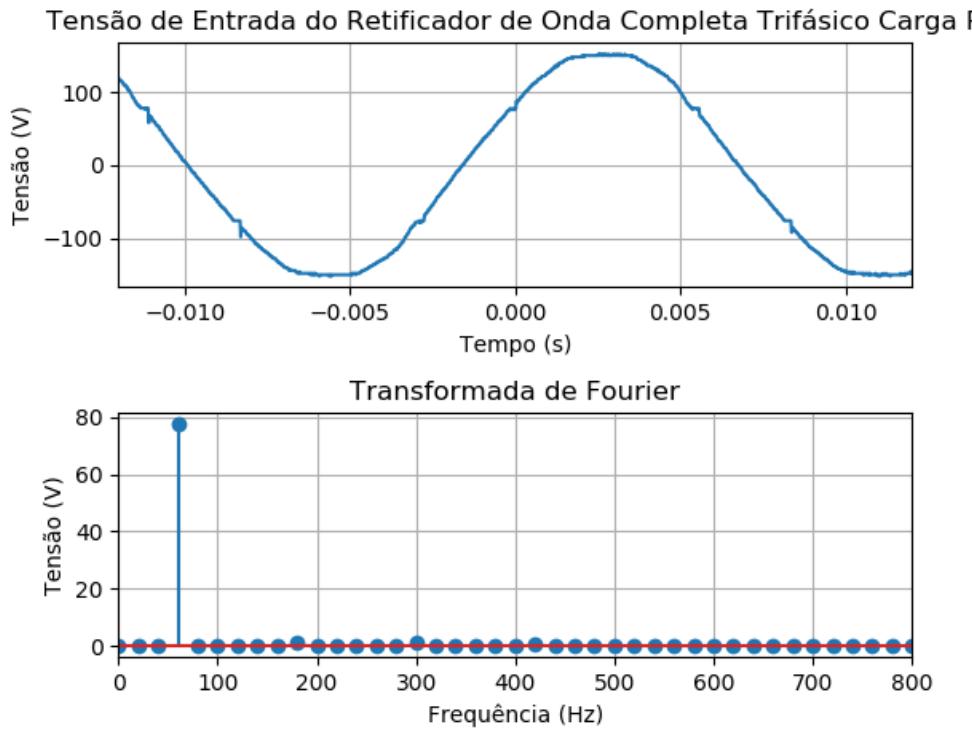


Figura 52: Transformada de Fourier da Tensão de Entrada para o Retificador com Carga R

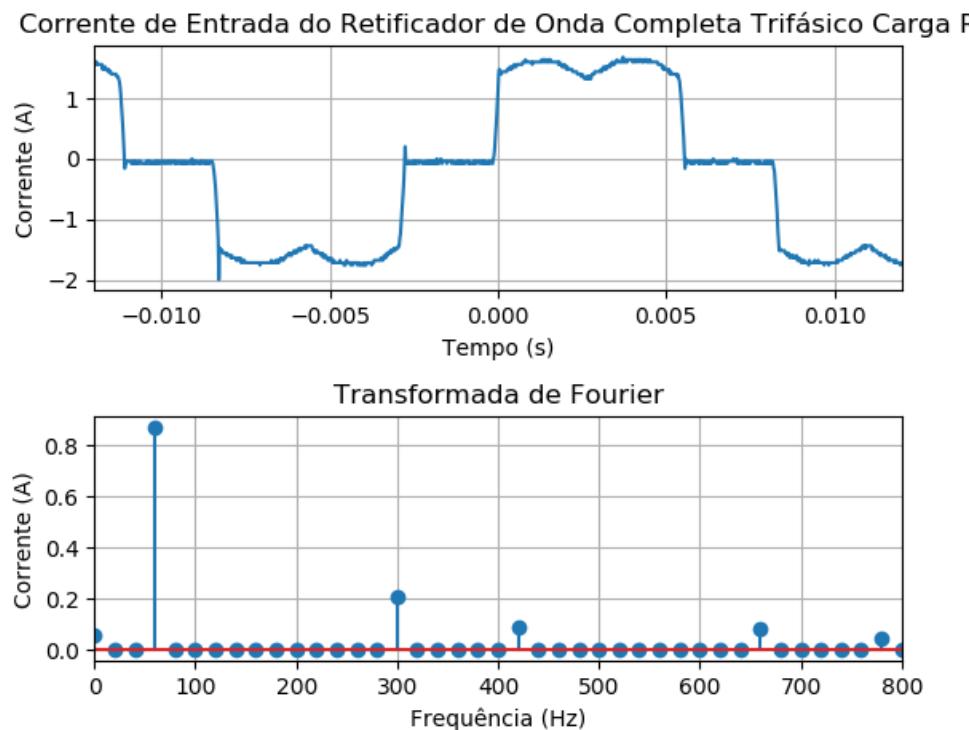


Figura 53: Transformada de Fourier da Corrente de Entrada para o Retificador com Carga R

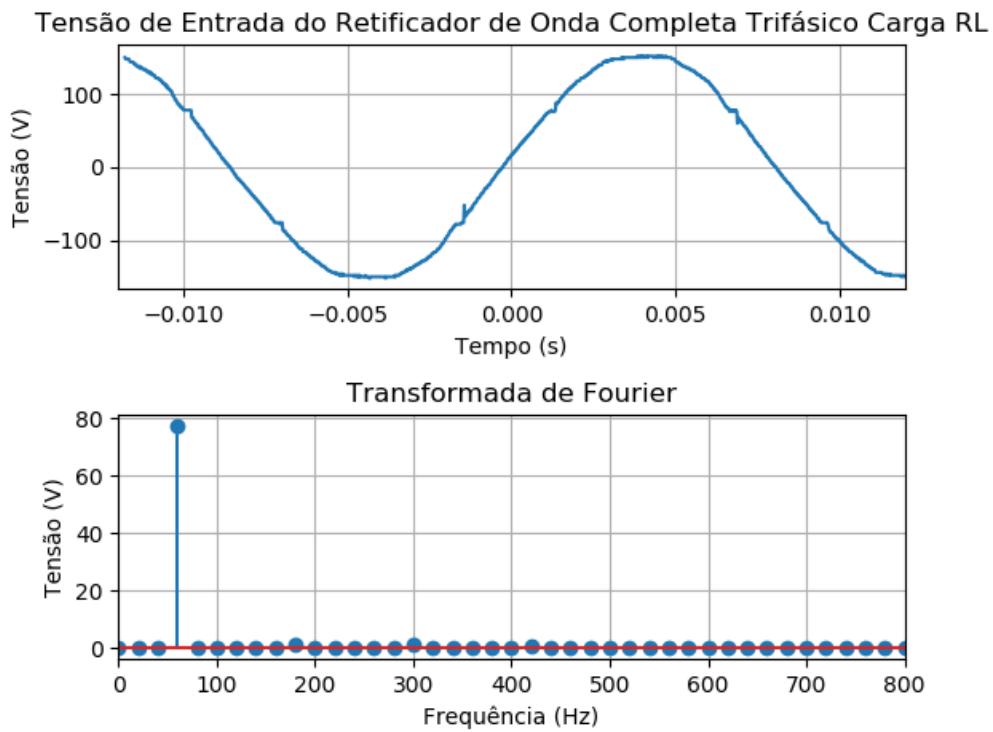


Figura 54: Transformada de Fourier da Tensão de Entrada para o Retificador com Carga RL

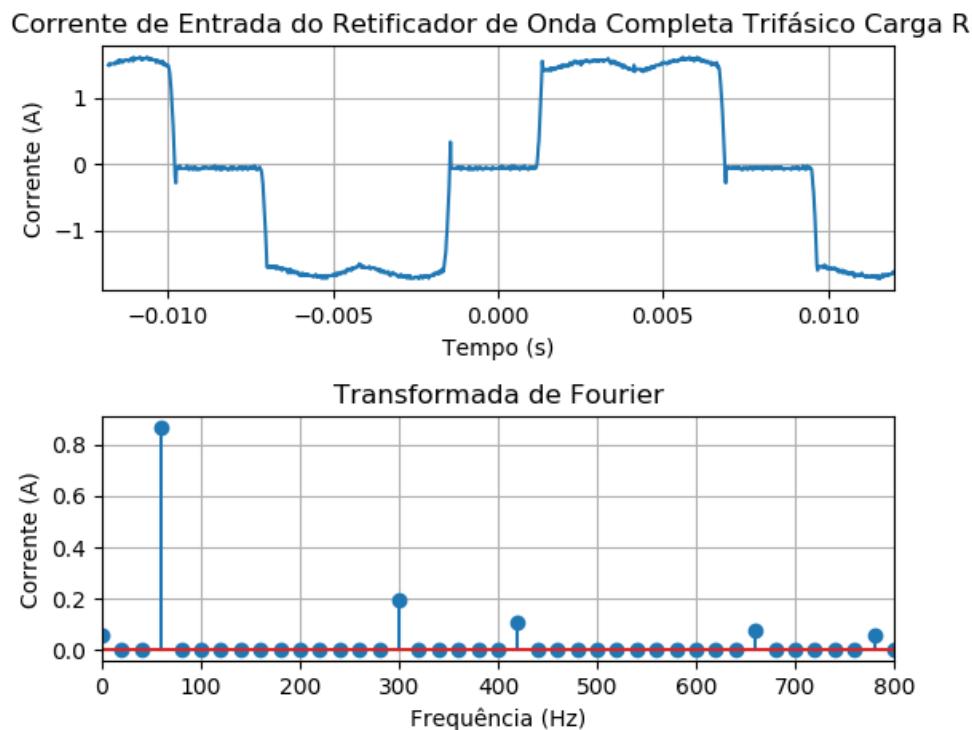


Figura 55: Transformada de Fourier da Corrente de Entrada para o Retificador com Carga RL

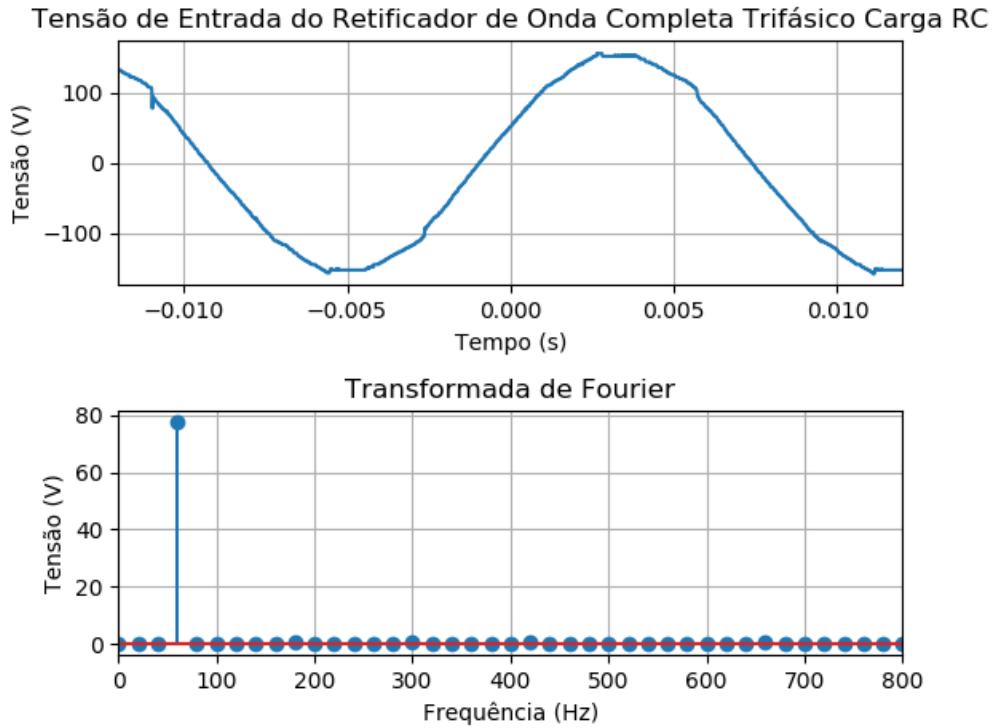


Figura 56: Transformada de Fourier da Tensão de Entrada para o Retificador com Carga RC

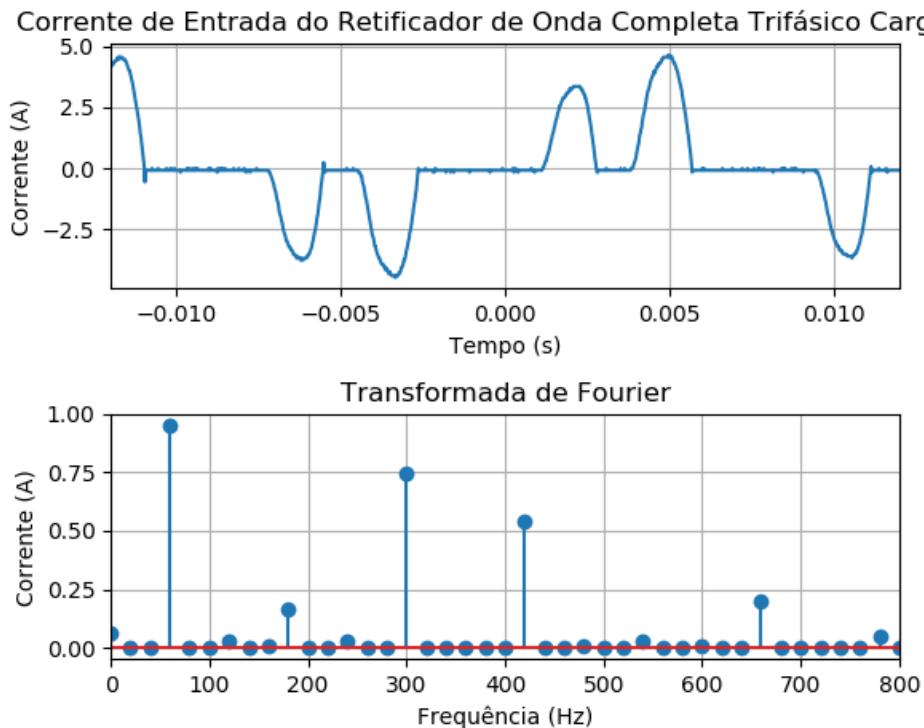


Figura 57: Transformada de Fourier da Corrente de Entrada para o Retificador com Carga RC

Nas transformadas da entrada é interessante observar a quase ausência de componente constante no sinal e também as distorções nas diferentes harmônicas e praticamente apenas nas harmônicas,

confirmando a teoria de que este sinal pode ser aproximado por uma série de Fourier e assim calcular sua THD (Total Harmonic Distortion), como se verá mais adiante neste relatório.

Para o circuito de saída, não tivemos o mesmo cuidado no momento de pegar a imagem do osciloscópio, pegamos as imagens com 1 ms por divisão. Como nosso período agora é 360 Hz, obtivemos 3,6 períodos da onda de saída, ou seja, uma frequência de amostragem de 250 kHz e uma resolução e frequência de 100 Hz, que não é divisor de 360. Para conseguir então traçar a transformada da saída com precisão, reduzimos o número de amostras, até chegar em múltiplos de períodos completos. Então chegamos em 2083 amostras e assim conseguimos uma resolução e frequência de 120 Hz que é divisor de 360 Hz, então calculamos as FFTs e traçamos os gráficos abaixo.

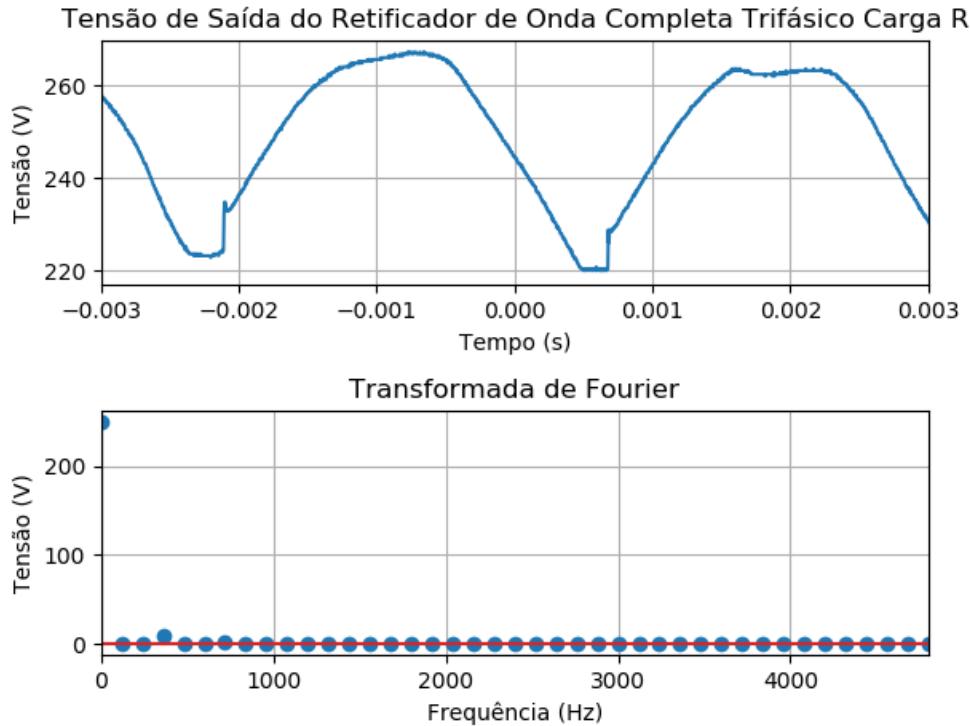


Figura 58: Transformada de Fourier da Tensão de Saída para o Retificador com Carga R

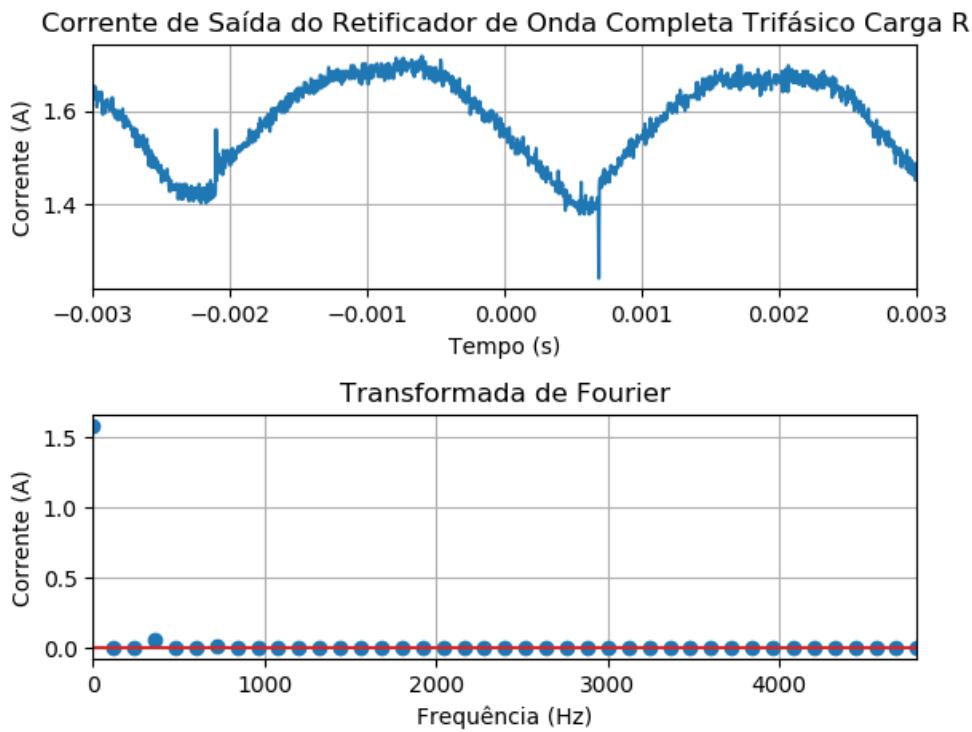


Figura 59: Transformada de Fourier da Corrente de Saída para o Retificador com Carga R

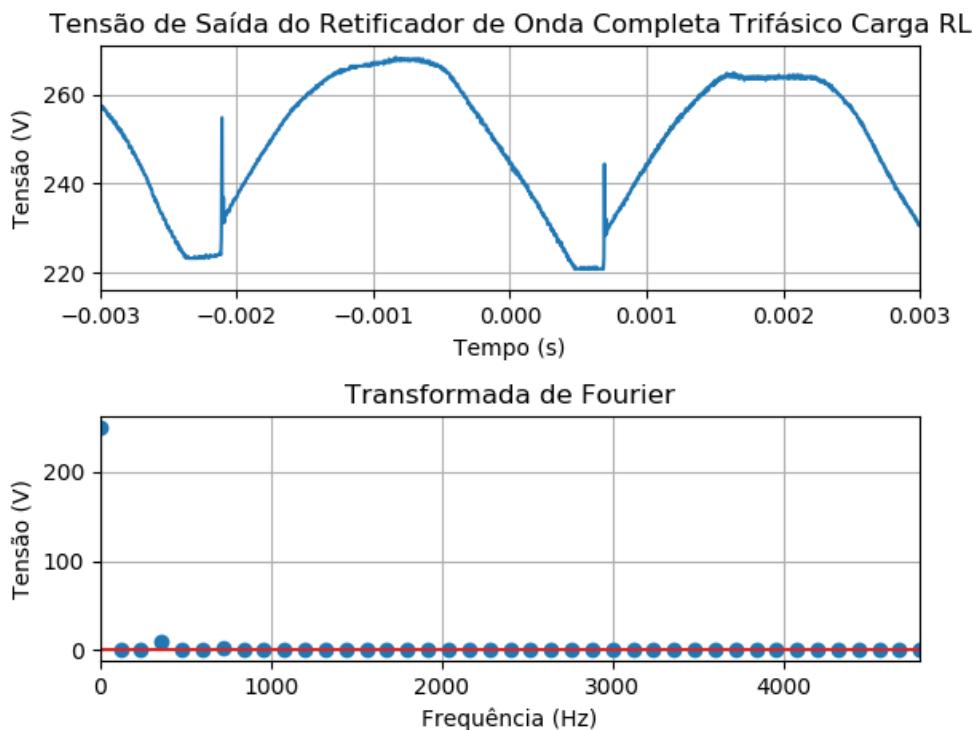


Figura 60: Transformada de Fourier da Tensão de Saída para o Retificador com Carga RL

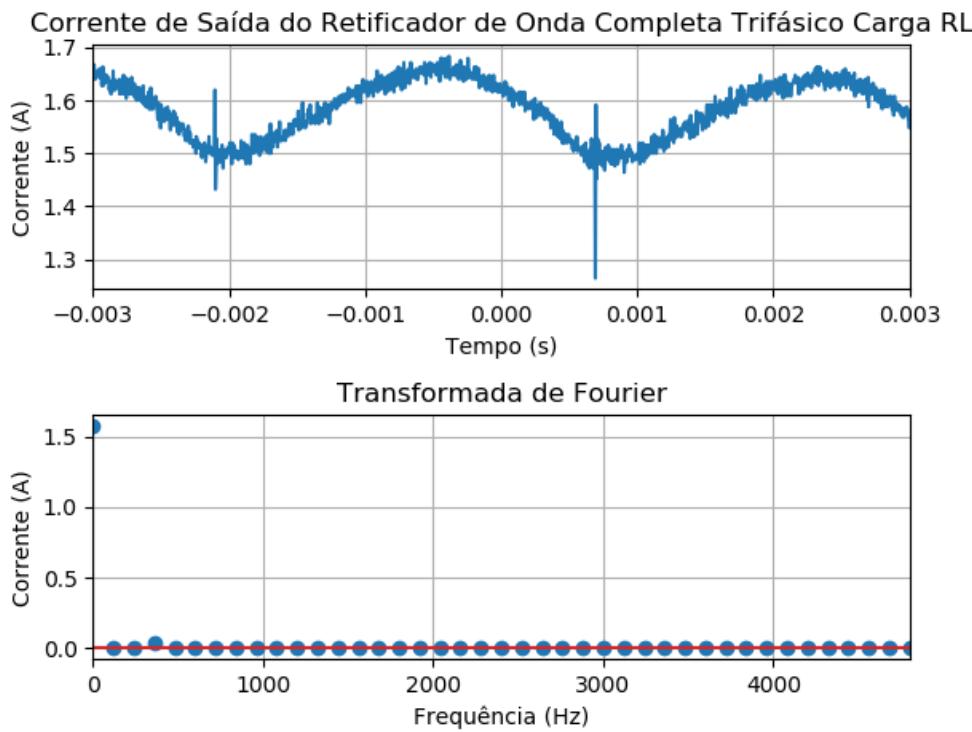


Figura 61: Transformada de Fourier da Corrente de Saída para o Retificador com Carga RL

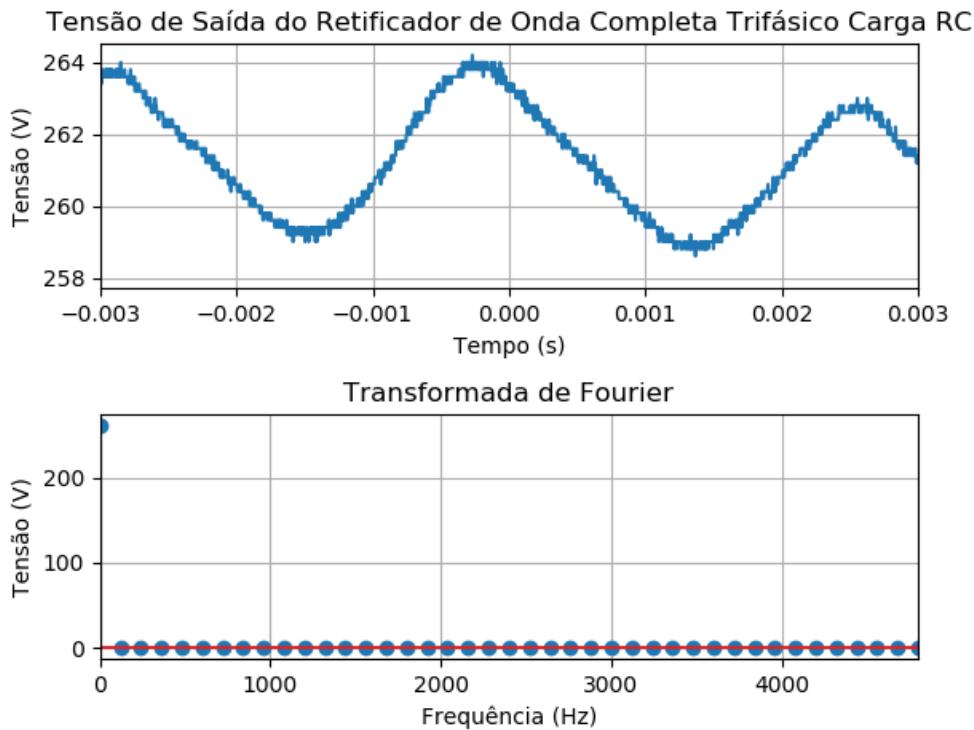


Figura 62: Transformada de Fourier da Tensão de Saída para o Retificador com Carga RC

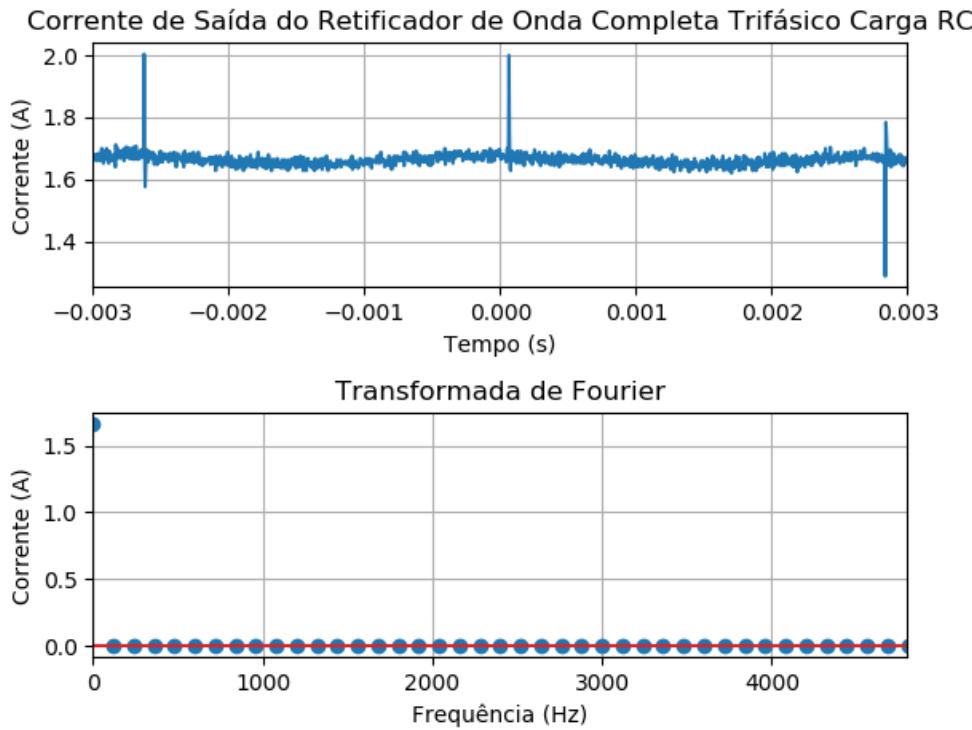


Figura 63: Transformada de Fourier da Corrente de Saída para o Retificador com Carga RC

Interessante de se observar na saída a alta componente constante que acaba até ofuscando as componentes das harmônicas. Para observar melhor estas componentes, também traçamos os gráficos acima com escala logarítmica como visto a seguir.

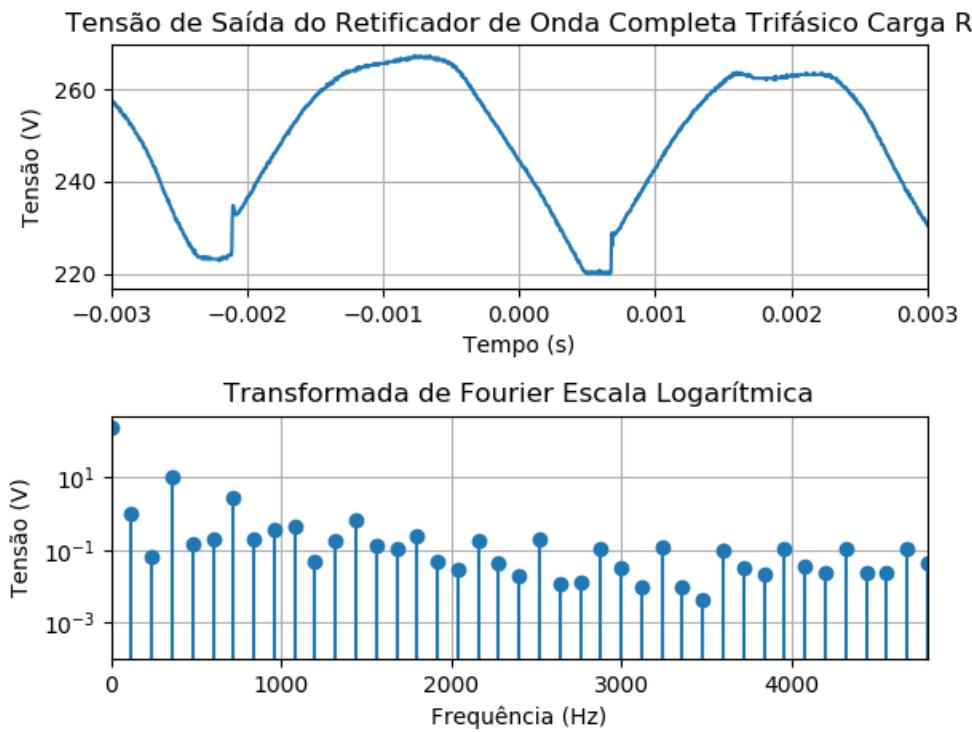


Figura 64: Transformada de Fourier da Tensão de Saída para o Retificador com Carga R com Escala Logarítmica

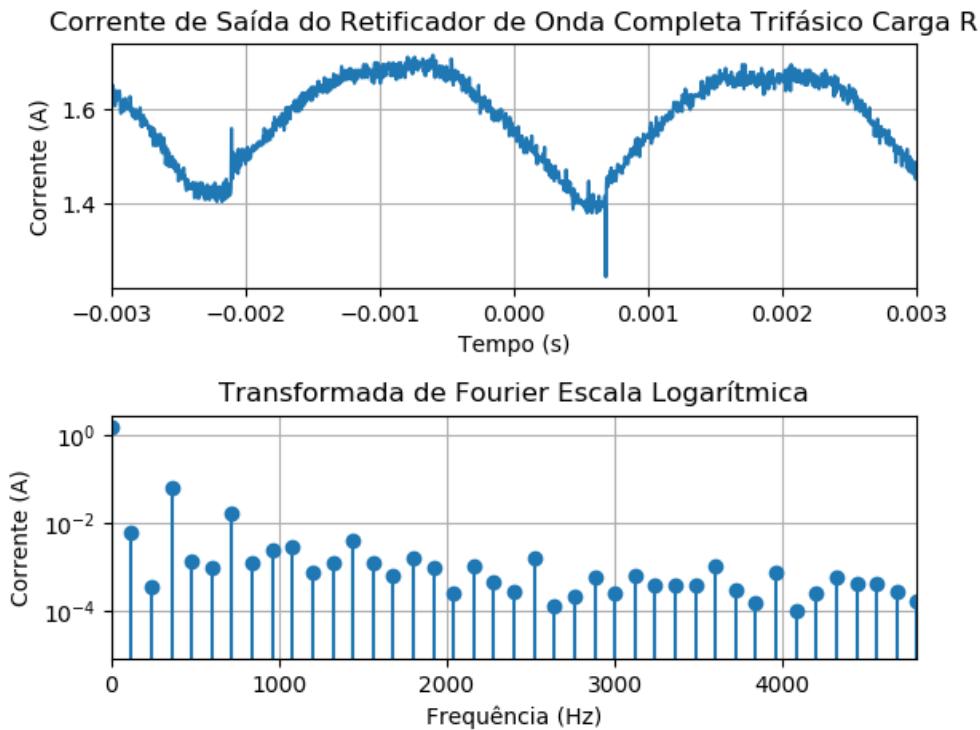


Figura 65: Transformada de Fourier da Corrente de Saída para o Retificador com Carga R com Escala Logarítmica

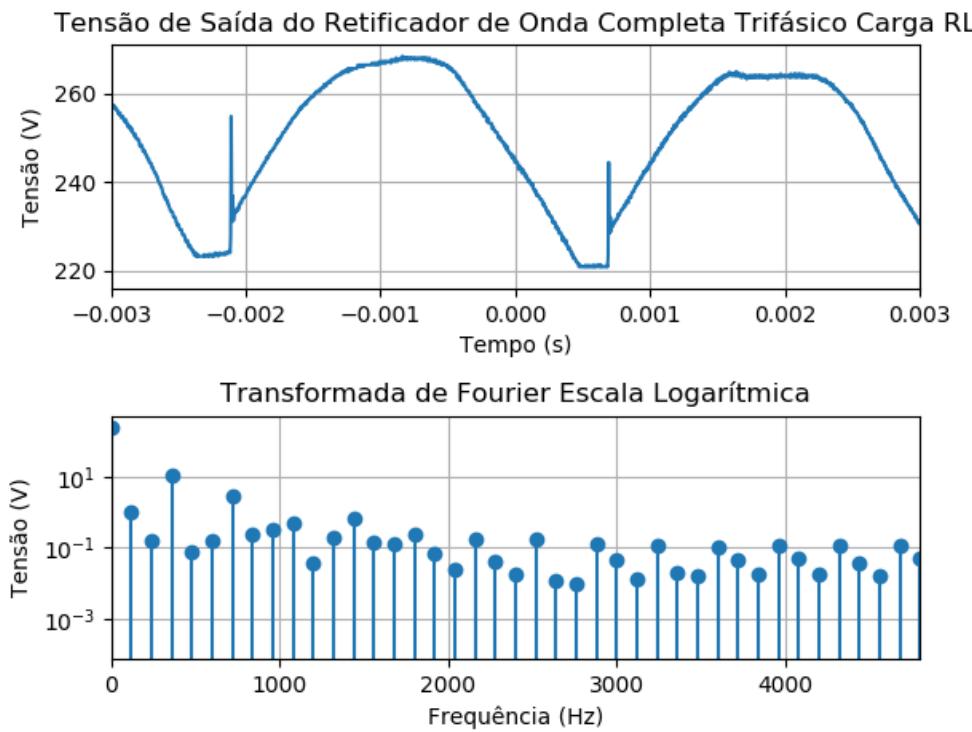


Figura 66: Transformada de Fourier da Tensão de Saída para o Retificador com Carga RL com Escala Logarítmica

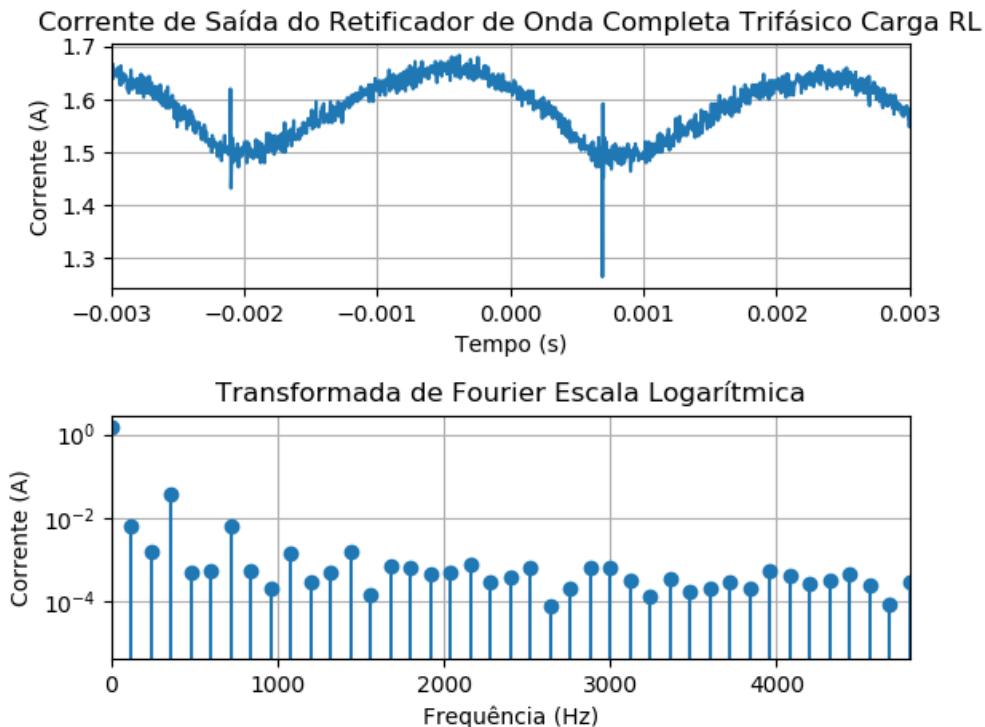


Figura 67: Transformada de Fourier da Corrente de Saída para o Retificador com Carga RL com Escala Logarítmica

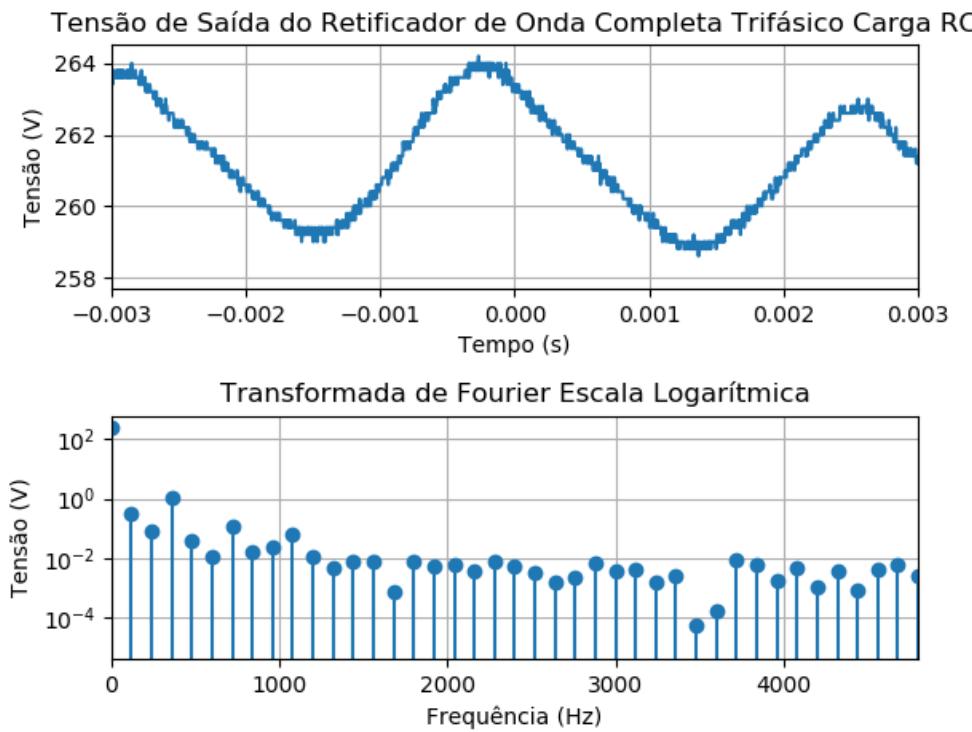


Figura 68: Transformada de Fourier da Tensão de Saída para o Retificador com Carga RC com Escala Logarítmica

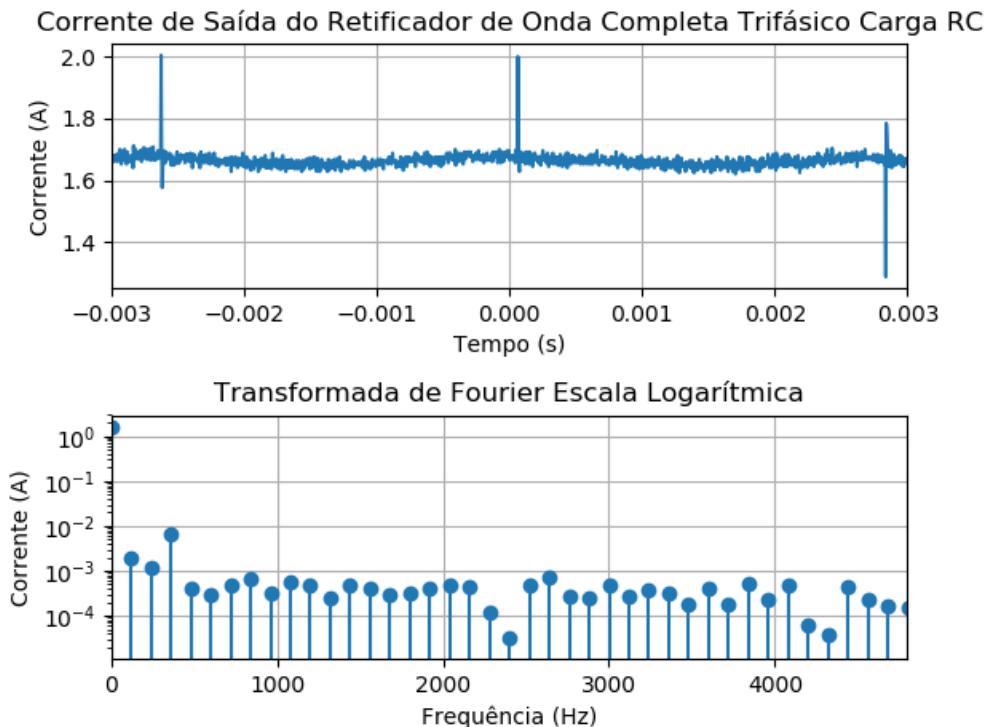


Figura 69: Transformada de Fourier da Corrente de Saída para o Retificador com Carga RC com Escala Logarítmica

5.3 CÁLCULO DAS THDS E DOS FATORES DE POTÊNCIA

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 é necessário calcular a raiz da soma de todos os valores das harmônicas ao quadrado e dividir pela raiz do quadrado do valor da fundamental como na equação abaixo.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{\sqrt{I_1^2}} \quad (1)$$

Fazendo os cálculos de forma numérica, calculamos a THD de cada sinal visto acima para as 100 primeiras harmônicas. Os resultados estão abaixo.

$$THD V_{in} \text{ Carga } R = 0.026026746137011742$$

$$THD I_{in} \text{ Carga } R = 0.2998513116689074$$

$$THD V_{in} \text{ Carga } RL = 0.025744047989693767$$

$$THD I_{in} \text{ Carga } RL = 0.29762223884887146$$

$$THD V_{in} \text{ Carga } RC = 0.024399235748084277$$

$$THD I_{in} \text{ Carga } RC = 1.020082936674718$$

$$THD V_{out} \text{ Carga } R = 0.287020353931832$$

$$THD I_{out} \text{ Carga } R = 0.2879017058763947$$

$$THD V_{out} \text{ Carga } RL = 0.281413959698655$$

$$THD I_{out} \text{ Carga } RL = 0.19207573805564573$$

$$THD V_{out} \text{ Carga } RC = 0.13289458509644564$$

$$THD I_{out} \text{ Carga } RC = 0.5083798938309801$$

Como esperado, a distorção harmônica da tensão de entrada é sempre bem próxima de 0. As distorções da corrente de entrada batem com os valores esperados pela simulação. Na saída há uma discrepância entre este valor e o da simulação, porém não sei como é feito o cálculo da THD no PSIM.

Com os valores da THD de entrada podemos também calcular o fator de potência. Como a distorção harmônica da tensão é praticamente 0 e considerando as duas ondas sem defasagem, o que é uma boa aproximação, podemos utilizar a equação abaixo e calcular o fator de potência com a THD da corrente de entrada.

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

$$FP \text{ Carga } R = 0.9578654754149173$$

$$FP \text{ Carga } RL = 0.9584512421996632$$

$$FP \text{ Carga } RC = 0.7000423864448911$$

Como era de se esperar por inspeção das curvas de corrente na entrada, o fator de potência com carga R e RL são bem parecidos, já que provocam pouca distorção na onda. O fator de potência da carga RC no entanto, tem uma grande distorção devido a sua corrente ser composta basicamente de picos na entrada.

5.4 PROJETO DO DIODO

Para o cálculo do projeto do diodo, dois dados são necessários: corrente média no diodo e tensão máxima de polarização reversa. Para a tensão máxima reversa de polarização, como visto na Figura 2, pegamos apenas a tensão de pico de linha que no nosso caso é aproximadamente 270 V. Para a corrente média, fazemos a média da corrente no diodo em um período. Neste caso o diodo conduz apenas por um terço do tempo, assim a média é um terço da média total da saída, como visto nas Figuras 4 e 6. Neste caso a corrente média é aproximadamente 0,5 A.

Agora para a escolha do diodo. Analisando o que há no mercado brasileiro, achamos o diodo 1N4004 a um preço de R\$ 0,09 que está bem barato em comparação com os outros. Este diodo aceita corrente média de 1 A e tensão reversa de 400 V, ambos valores acima do necessário, porém pelo custo com relação as outras opções, esta foi a nossa escolha.

5.5 CONCLUSÃO

O retificador de onda completa nos três casos se comportou como o esperado de acordo com a teoria, tirando as não idealidades da rede. Observamos a retificação total da corrente e tensão com carga R e RL e na carga RC observamos o efeito do filtro, deixando praticamente constante a tensão e corrente na saída. Alguns outros detalhes interessantes da prática como o achatamento do pico da entrada da rede que causa certa distorção no circuito também foi observado.

Foi interessante traçar as transformadas de Fourier e ver que também bate com o esperado das ondas, incluindo suas distorções. Os cálculos das THDs e dos FPs foram coerentes também com o esperado e a distorção relevante no caso do circuito com carga RC é preocupante, gera muita distorção na entrada que passa para a rede.

Por fim o cálculo do projeto do diodo também foi interessante e pode desmistificar um pouco para os alunos a compra de componentes utilizados nos circuitos analisados.

6 APÊNDICE

Abaixo estão os códigos utilizados para os cálculos numéricos deste relatório. Todos os códigos foram feitos em Python.

6.1 FUNÇÕES UTILIZADAS NO PROGRAMA PRINCIPAL

```
# Import the necessary packages and modules
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd

# Saving Original Images based on CSV files of the Oscilloscope
# Plotting Original CH1, CH2 and MATH and saving for reference

# General function for plotting originals ch1, ch2 and mth. Returns the dataframe
# created with all channels.
def plot_scope_original(
    output_name = "",
    ch1_name = "",
    ch2_name = "",
    mth_name = "",
    ch1_2_scale = "",
    xlims = "",
    ylims = "",
    orig_path_ch1 = "",
    orig_path_ch2 = "",
    orig_path_mth = "",
    output_path = ""
):
    channels = []
    plt.clf()
    # Plot CH1 if exists
    if orig_path_ch1 != "":
        ch1 = pd.read_csv(orig_path_ch1, usecols=[3,4], index_col=[0], header=None,
                          names=['t(s)', ch1_name])
        plt.plot(ch1.index, ch1[ch1_name])
        channels.append(ch1)
    # Plot CH2 if exists
    if orig_path_ch2 != "":
        ch2_name_scale = ch2_name
        if ch1_2_scale != "":
            ch2_name_scale = (ch2_name + 'x' + str(ch1_2_scale)).replace('.', ',')
        ch2 = pd.read_csv(orig_path_ch2, usecols=[3,4], index_col=[0], header=None,
                          names=['t(s)', ch2_name_scale])
        plt.plot(ch2.index, ch2[ch2_name_scale]*ch1_2_scale)
        ch2 = ch2.rename(columns={ch2_name_scale: ch2_name})
        channels.append(ch2)
    # Prepare MTH if exists
    if orig_path_mth != "":
        mth = pd.read_csv(orig_path_mth, usecols=[3,4], index_col=[0], header=None,
                          names=['t(s)', mth_name])
        plt.plot(mth.index, mth[mth_name])
        channels.append(mth)
    # Correcting current for better scaling in image. Vscale/Iscale
    # Plotting and saving the image
    plt.xlabel('Tempo(s)')
    if (xlims != "") and (len(xlims) == 2):
        plt.xlim(xlims[0], xlims[1])
    if (ylims != "") and (len(ylims) == 2):
        plt.ylim(ylims[0], ylims[1])
    plt.title(output_name)
    plt.legend()
    plt.grid(True)
    plt.tight_layout()
```

```

plt.savefig(output_path)
# Making all the data a single data frame to return
output = pd.concat(channels, axis=1)
return output

# Calculate Fourier Transform
def calculate_fft(time, signal):
    fourier = np.fft.fft(signal)
    fourier_freq = np.fft.fftfreq(signal.size, (time[1]-time[0]))
    return [fourier_freq, fourier]

# Calculate Total Harmonic Distortion of a signal
def calculate_thd(fourier_freq, fourier, freq0, precision = 20):
    steps_in_freq0 = int(round(freq0 / (fourier_freq[1] - fourier_freq[0])))
    thd = 0
    for i in range(steps_in_freq0*2, steps_in_freq0*precision, steps_in_freq0):
        thd = thd + np.abs(fourier[i])**2
    thd = np.sqrt(thd) / np.abs(fourier[steps_in_freq0])
    return thd

# Calculate and plot Original Function and Fourier Transform
def plot_fourier_transform(number_samples, time, values, y_name, title,
                           out_path_name, xlims0 = "", xlims1 = "", ylog = False):
    # Getting the correct sample amount
    time = time[0:number_samples]
    values = values[0:number_samples]
    # Calculating fft
    fft = calculate_fft(time, values)
    # Correcting fft for energy
    fft[1] = fft[1] / number_samples
    # Plotting fft with original
    figure, plot = plt.subplots(2,1)
    plot[0].plot(time, values)
    plot[0].set_title(title)
    plot[0].set_xlabel('Tempo (s)')
    plot[0].set_ylabel(y_name)
    if (xlims0 != "") and (len(xlims0) == 2):
        plot[0].set_xlim(xlims0[0], xlims0[1])
    plot[0].grid(True)
    plot[1].stem(fft[0], np.abs(fft[1]))
    plot[1].set_title('Transformada de Fourier')
    plot[1].set_xlabel('Frequência (Hz)')
    plot[1].set_ylabel(y_name)
    if (ylog):
        plot[1].set_yscale('log')
        plot[1].set_title('Transformada de Fourier Escala Logarítmica')
    if (xlims1 != "") and (len(xlims1) == 2):
        plot[1].set_xlim(xlims1[0], xlims1[1])
    plot[1].grid(True)
    plt.tight_layout()
    plt.savefig(out_path_name)
    return fft

# Calculate Average
def calculate_average(signal, period):
    total = 0
    for i in range(period):
        total += signal[i]
    return (total / period)

```

6.2 PROGRAMA PRINCIPAL

```

# Import the necessary packages and modules
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd

# Import my functions
import numeric_analysis as na

# Plotting original images from oscilloscope

orig_in_r = na.plot_scope_original(
    output_name = "Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_R_Entrada",
    ch1_name = "Vin_(V)",
    ch2_name = "Iin_(A)",
    mth_name = "P_(W)",
    ch1_2_scale = 50,
    xlims = [-0.012, 0.012],
    orig_path_ch1 = "src_img/lab4/in_r_load/CH1.CSV",
    orig_path_ch2 = "src_img/lab4/in_r_load/CH2.CSV",
    orig_path_mth = "src_img/lab4/in_r_load/MIH.CSV",
    output_path = "img/lab4/orig_in_r.png"
)

orig_in_rl = na.plot_scope_original(
    output_name = "Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RL_Entrada",
    ch1_name = "Vin_(V)",
    ch2_name = "Iin_(A)",
    mth_name = "P_(W)",
    ch1_2_scale = 50,
    xlims = [-0.012, 0.012],
    orig_path_ch1 = "src_img/lab4/in_rl_load/CH1.CSV",
    orig_path_ch2 = "src_img/lab4/in_rl_load/CH2.CSV",
    orig_path_mth = "src_img/lab4/in_rl_load/MIH.CSV",
    output_path = "img/lab4/orig_in_rl.png"
)

orig_in_rc = na.plot_scope_original(
    output_name = "Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RC_Entrada",
    ch1_name = "Vin_(V)",
    ch2_name = "Iin_(A)",
    mth_name = "P_(W)",
    ch1_2_scale = 50,
    xlims = [-0.012, 0.012],
    orig_path_ch1 = "src_img/lab4/in_rc_load/CH1.CSV",
    orig_path_ch2 = "src_img/lab4/in_rc_load/CH2.CSV",
    orig_path_mth = "src_img/lab4/in_rc_load/MIH.CSV",
    output_path = "img/lab4/orig_in_rc.png"
)

orig_out_r = na.plot_scope_original(
    output_name = "Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_R_Saida",
    ch1_name = "Vout_(V)",
    ch2_name = "Iout_(A)",
    mth_name = "P_(W)",
    ch1_2_scale = 160,
    xlims = [-0.003, 0.003],
    orig_path_ch1 = "src_img/lab4/out_r_load/CH1.CSV",
    orig_path_ch2 = "src_img/lab4/out_r_load/CH2.CSV",
    output_path = "img/lab4/orig_out_r.png"
)

orig_out_rc = na.plot_scope_original(
    output_name = "Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RC_Saida",
    ch1_name = "Vout_(V)",
    ch2_name = "Iout_(A)",
    mth_name = "P_(W)",

```

```

        ch1_2_scale = 160,
        xlims = [-0.003, 0.003],
        orig_path_ch1 = "src_img/lab4/out_rc_load/CH1.CSV",
        orig_path_ch2 = "src_img/lab4/out_rc_load/CH2.CSV",
        output_path = "img/lab4/orig_out_rc.png"
    )

    orig_out_rl = na.plot_scope_original(
        output_name = "Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RL_Saída",
        ch1_name = "Vout(V)",
        ch2_name = "Iout(A)",
        mth_name = "P(W)",
        ch1_2_scale = 160,
        xlims = [-0.003, 0.003],
        orig_path_ch1 = "src_img/lab4/out_rl_load/CH1.CSV",
        orig_path_ch2 = "src_img/lab4/out_rl_load/CH2.CSV",
        output_path = "img/lab4/orig_out_rl.png"
    )

```

```

# Calculating THD and Plotting Fourier Transforms

# Input R Load
fft_vin_r = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2500,
    time = orig_in_r.index.values,
    values = orig_in_r["Vin(V)"].values,
    y_name = "Tensão(V)",
    title = "Tensão_de_Entrada_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_R",
    out_path_name = "img/lab4/fft_vin_r.png",
    xlims0 = [-0.012, 0.012],
    xlims1 = [0, 800]
)
THD = na.calculate_thd(fft_vin_r[0], fft_vin_r[1], 60, 100)
print("THD_for_Voltage_R_Load: %s % (THD)")

fft_iin_r = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2500,
    time = orig_in_r.index.values,
    values = orig_in_r["Iin(A)"].values,
    y_name = "Corrente(A)",
    title = "Corrente_de_Entrada_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_R",
    out_path_name = "img/lab4/fft_iin_r.png",
    xlims0 = [-0.012, 0.012],
    xlims1 = [0, 800]
)
THD = na.calculate_thd(fft_iin_r[0], fft_iin_r[1], 60, 100)
print("THD_for_Current_R_Load: %s % (THD)")
PF = 1/np.sqrt(1 + THD**2)
print("Power_Factor_R_Load: %s \n % (PF)")

# Input RL Load
fft_vin_rl = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2500,
    time = orig_in_rl.index.values,
    values = orig_in_rl["Vin(V)"].values,
    y_name = "Tensão(V)",
    title = "Tensão_de_Entrada_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RL",
    out_path_name = "img/lab4/fft_vin_rl.png",
    xlims0 = [-0.012, 0.012],
    xlims1 = [0, 800]
)
THD = na.calculate_thd(fft_vin_rl[0], fft_vin_rl[1], 60, 100)
print("THD_for_Voltage_RL_Load: %s % (THD)")

fft_iin_rl = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2500,
    time = orig_in_rl.index.values,

```

```

values = orig_in_rl["Iin(A)"].values,
y_name = "Corrente(A)",
title = "Corrente_de_Entrada_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RL",
",
out_path_name = "img/lab4/fft_iin_rl.png",
xlimits0 = [-0.012, 0.012],
xlimits1 = [0, 800]
)
THD = na.calculate_thd(fft_iin_rl[0], fft_iin_rl[1], 60, 100)
print("THD_for_Current_RL_Load: %s" % (THD))
PF = 1/np.sqrt(1 + THD**2)
print("Power_Factor_RL_Load: %s\n" % (PF))

# Input RC Load
fft_vin_rc = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2500,
    time = orig_in_rc.index.values,
    values = orig_in_rc["Vin(V)"].values,
    y_name = "Tensão(V)",
    title = "Tensão_de_Entrada_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RC",
    out_path_name = "img/lab4/fft_vin_rc.png",
    xlimits0 = [-0.012, 0.012],
    xlimits1 = [0, 800]
)
THD = na.calculate_thd(fft_vin_rc[0], fft_vin_rc[1], 60, 100)
print("THD_for_Voltage_RC_Load: %s" % (THD))

fft_iin_rc = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2500,
    time = orig_in_rc.index.values,
    values = orig_in_rc["Iin(A)"].values,
    y_name = "Corrente(A)",
    title = "Corrente_de_Entrada_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RC",
",
    out_path_name = "img/lab4/fft_iin_rc.png",
    xlimits0 = [-0.012, 0.012],
    xlimits1 = [0, 800]
)
THD = na.calculate_thd(fft_iin_rc[0], fft_iin_rc[1], 60, 100)
print("THD_for_Current_RC_Load: %s" % (THD))
PF = 1/np.sqrt(1 + THD**2)
print("Power_Factor_RC_Load: %s\n" % (PF))

# Output R Load
fft_vout_r = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_r.index.values,
    values = orig_out_r["Vout(V)"].values,
    y_name = "Tensão(V)",
    title = "Tensão_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_R",
    out_path_name = "img/lab4/fft_vout_r.png",
    xlimits0 = [-0.003, 0.003],
    xlimits1 = [0, 4800]
)
fft_vout_r_ylog = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_r.index.values,
    values = orig_out_r["Vout(V)"].values,
    y_name = "Tensão(V)",
    title = "Tensão_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_R",
    out_path_name = "img/lab4/fft_vout_r_log.png",
    xlimits0 = [-0.003, 0.003],
    xlimits1 = [0, 4800],
    ylog = True
)
THD = na.calculate_thd(fft_vout_r[0], fft_vout_r[1], 360, 100)
print("THD_for_Voltage_Output_R_Load: %s" % (THD))

fft_iout_r = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_r.index.values,
    values = orig_out_r["Iout(A)"].values,

```

```

y_name = "Corrente_(A)" ,
title = "Corrente_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_R" ,
out_path_name = "img/lab4/fft_iout_r.png" ,
xlimits0 = [-0.003, 0.003] ,
xlimits1 = [0, 4800]
)
fft_iout_r_ylog = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_r.index.values ,
    values = orig_out_r[ "Iout_(A)" ].values ,
    y_name = "Corrente_(A)" ,
    title = "Corrente_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_R" ,
    out_path_name = "img/lab4/fft_iout_r_log.png" ,
    xlimits0 = [-0.003, 0.003] ,
    xlimits1 = [0, 4800],
    ylog = True
)
print ("Corrente_Average_for_Output_R_Load:%s" % (na.calculate_average(orig_out_r[
    "Iout_(A)" ].values , 231)/3))
THD = na.calculate_thd(fft_iout_r[0], fft_iout_r[1], 360, 100)
print("THD_for_Current_Output_R_Load:%s\n" % (THD))

# Output RL Load
fft_vout_rl = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_rl.index.values ,
    values = orig_out_rl[ "Vout_(V)" ].values ,
    y_name = "Tensão_(V)" ,
    title = "Tensão_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RL" ,
    out_path_name = "img/lab4/fft_vout_rl.png" ,
    xlimits0 = [-0.003, 0.003] ,
    xlimits1 = [0, 4800]
)
fft_vout_rl_ylog = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_rl.index.values ,
    values = orig_out_rl[ "Vout_(V)" ].values ,
    y_name = "Tensão_(V)" ,
    title = "Tensão_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RL" ,
    out_path_name = "img/lab4/fft_vout_rl_log.png" ,
    xlimits0 = [-0.003, 0.003] ,
    xlimits1 = [0, 4800],
    ylog = True
)
THD = na.calculate_thd(fft_vout_rl[0], fft_vout_rl[1], 360, 100)
print("THD_for_Voltage_Output_RL_Load:%s" % (THD))

fft_iout_rl = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_rl.index.values ,
    values = orig_out_rl[ "Iout_(A)" ].values ,
    y_name = "Corrente_(A)" ,
    title = "Corrente_de_Saída do Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RL" ,
    out_path_name = "img/lab4/fft_iout_rl.png" ,
    xlimits0 = [-0.003, 0.003] ,
    xlimits1 = [0, 4800]
)
fft_iout_rl_ylog = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_rl.index.values ,
    values = orig_out_rl[ "Iout_(A)" ].values ,
    y_name = "Corrente_(A)" ,
    title = "Corrente_de_Saída do Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RL" ,
    out_path_name = "img/lab4/fft_iout_rl_log.png" ,
    xlimits0 = [-0.003, 0.003] ,
    xlimits1 = [0, 4800],
    ylog = True
)
print ("Corrente_Average_for_Output_RL_Load:%s" % (na.calculate_average(
    orig_out_rl[ "Iout_(A)" ].values , 231)/3))
THD = na.calculate_thd(fft_iout_rl[0], fft_iout_rl[1], 360, 100)
print("THD_for_Current_Output_RL_Load:%s\n" % (THD))

```

```

# Output RC Load
fft_vout_rc = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_rc.index.values,
    values = orig_out_rc["Vout_(V)"].values,
    y_name = "Tensão_(V)",
    title = "Tensão_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RC",
    out_path_name = "img/lab4/fft_vout_rc.png",
    xlimits0 = [-0.003, 0.003],
    xlimits1 = [0, 4800]
)
fft_vout_rc_ylog = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_rc.index.values,
    values = orig_out_rc["Vout_(V)"].values,
    y_name = "Tensão_(V)",
    title = "Tensão_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RC",
    out_path_name = "img/lab4/fft_vout_rc_log.png",
    xlimits0 = [-0.003, 0.003],
    xlimits1 = [0, 4800],
    ylog = True
)
THD = na.calculate_thd(fft_vout_rc[0], fft_vout_rc[1], 360, 100)
print("THD_for_Voltage_Output_RC_Load: %s" % (THD))

fft_iout_rc = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_rc.index.values,
    values = orig_out_rc["Iout_(A)"].values,
    y_name = "Corrente_(A)",
    title = "Corrente_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RC",
    out_path_name = "img/lab4/fft_iout_rc.png",
    xlimits0 = [-0.003, 0.003],
    xlimits1 = [0, 4800]
)
fft_iout_rc_ylog = na.plot_fourier_transform(
    number_samples = 2083,
    time = orig_out_rc.index.values,
    values = orig_out_rc["Iout_(A)"].values,
    y_name = "Corrente_(A)",
    title = "Corrente_de_Saída_do_Retificador_de_Onda_Completa_Trifásico_Carga_RC",
    out_path_name = "img/lab4/fft_iout_rc_log.png",
    xlimits0 = [-0.003, 0.003],
    xlimits1 = [0, 4800],
    ylog = True
)
THD = na.calculate_thd(fft_iout_rc[0], fft_iout_rc[1], 360, 100)
print("THD_for_Current_Output_RC_Load: %s\n" % (THD))

```

7 REFERÊNCIAS

Hart, Daniel W., 2011. Power electronics, McGraw-Hill