



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
EA619R – LABORATÓRIO DE ANÁLISE LINEAR
PROF. RENATO DA ROCHA LOPES
PROF. RICARDO CORAÇÃO DE LEÃO FONTOURA DE OLIVEIRA

RELATÓRIO DO EXPERIMENTO 3:
HARMÔNICAS

Bryan Wolff

RA: 214095

João Luís Carvalho de Abreu

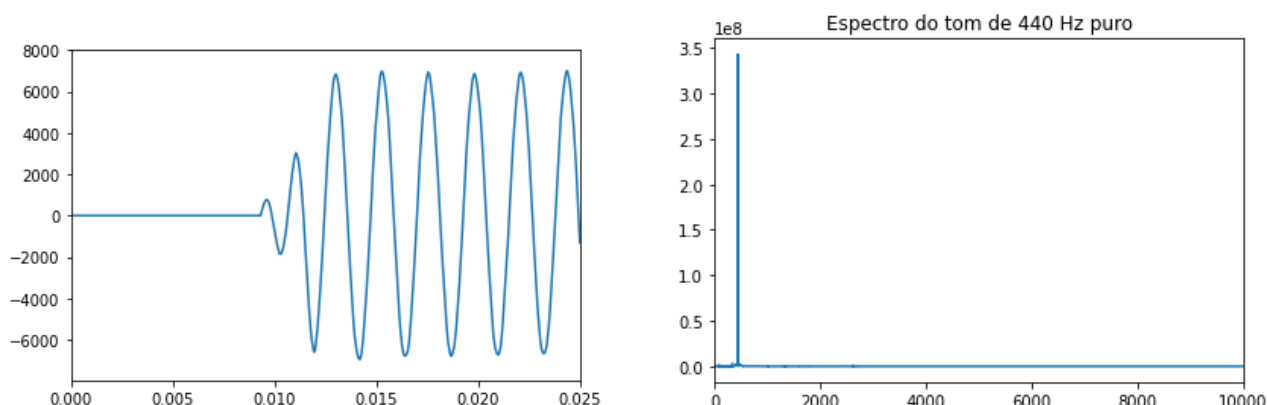
RA: 175997

Campinas
Mai de 2021

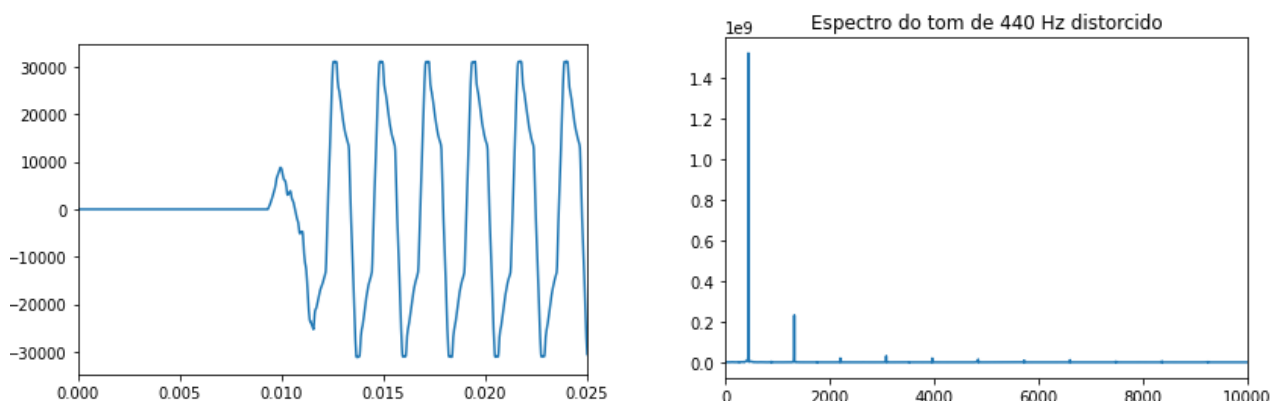
[Link para notebook no Google Colab](#)

1. ARQUIVOS DE ÁUDIO: INFLUÊNCIA DA NÃO LINEARIDADE:

A presença de não linearidades, isto é, distorções em um sinal senoidal é uma das causas do surgimento de componentes harmônicas no domínio da frequência deste sinal. Para demonstrar este caso, vamos inicialmente observar o espectro da transformada de Fourier de um sinal senoidal puro gravado pelo microfone do computador:



Se comparar este espectro com um outro espectro de um sinal com mesmo tom, porém gravado em um volume no qual ocorre uma saturação do sinal, observa-se o surgimento de frequências que não são do tom original.

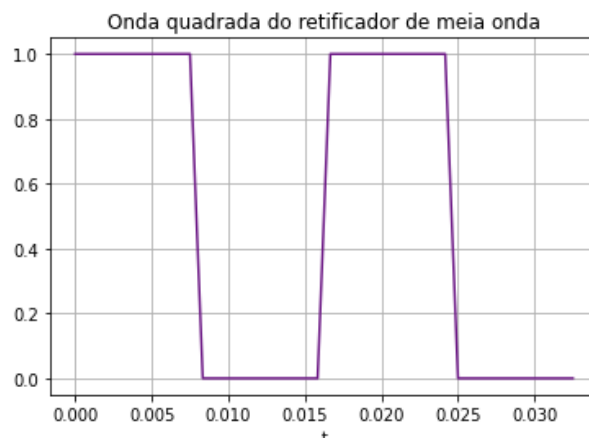
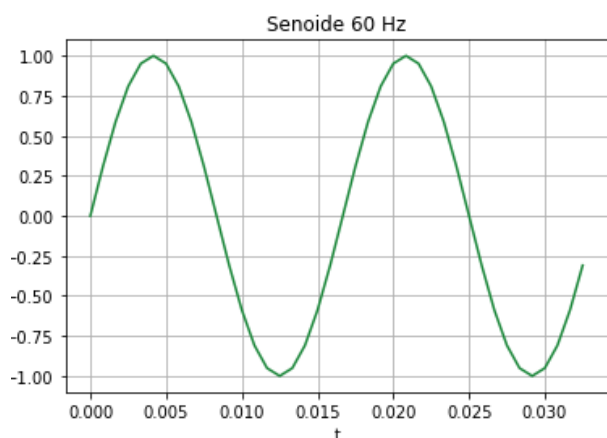


2. RETIFICADOR DE MEIA ONDA

Outra fonte comum de não-linearidades são chaveamentos e transições abruptas no sinal, que ocorrem comumente em retificadores (circuitos elétricos de tensão elaborados para a conversão

de corrente alternada em corrente de passagem) e equipamentos de eletrônica de potência.

Outra fonte comum de não-linearidades são chaveamentos e transições abruptas no sinal, que ocorrem comumente em retificadores (circuitos elétricos de tensão elaborados para a conversão de corrente alternada em corrente de passagem) e equipamentos de eletrônica de potência.



a. Qual deve ser o espectro de um retificador de meia onda? (o produto de uma senóide com a onda quadrada)

Para definir o espectro do retificador de meia onda, vamos abordar uma análise qualitativa do problema proposto.

Dado um sinal senoidal $f(t) = \sin(\omega_0 \cdot t)$, é possível, a partir da literatura, obter a seguinte transformada de Fourier:

$$F(j\omega) = \frac{\pi}{j} [\delta(\omega - \omega_0) - \delta(\omega + \omega_0)]$$

De maneira geral, o espectro dessa função corresponde a dois impulsos, um na frequência fundamental na faixa positiva do espectro e o outro na mesma frequência, porém na faixa negativa do espectro.

Dado a onda quadrada periódica em T , definida por:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } |t| < T_1 \\ 1 & \text{se } T_1 < |t| \leq \frac{T}{2} \end{cases}$$

Esse sinal, possui a seguinte transformada de Fourier:

$$X(j\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{2 \cdot \sin(k \cdot \omega_0 \cdot T_1)}{k} \cdot \delta(\omega - k \cdot \omega_0)$$

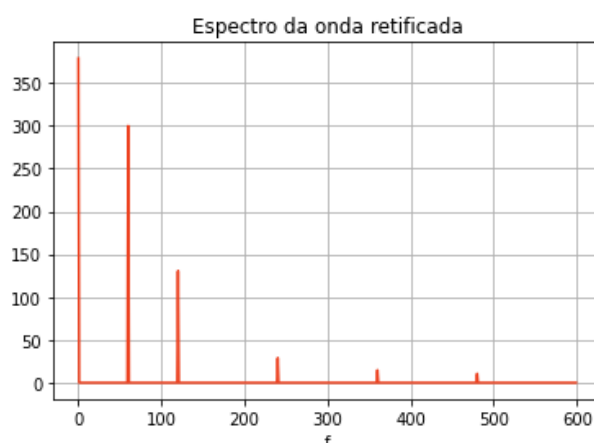
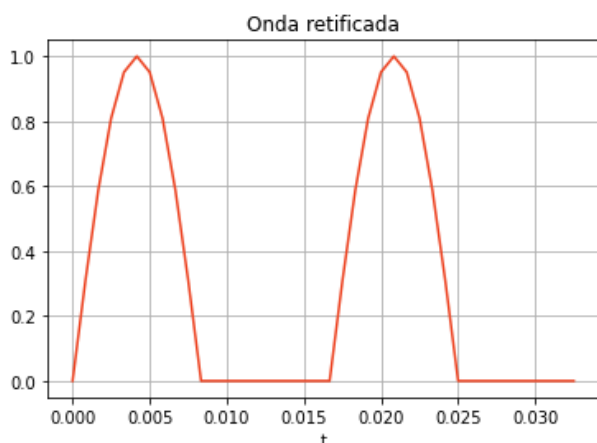
Em termos gerais, o espectro da função acima corresponde a um somatório de impulsos múltiplos ímpares da frequência fundamental.

Dessa forma, o espectro do retificador de meia onda é definido pela multiplicação no tempo da senoide pela onda quadrada ou pela convolução na frequência das duas transformadas obtidas:

$$e(t) = x(t) \cdot y(t) \rightarrow E(j\omega) = \frac{1}{2\pi} F(j\omega) * X(j\omega)$$

Assim, é esperado que a convolução dos dois espectros resulte em um somatório de impulsos múltiplos da frequência fundamental.

b. Trace a onda retificada e o seu espectro



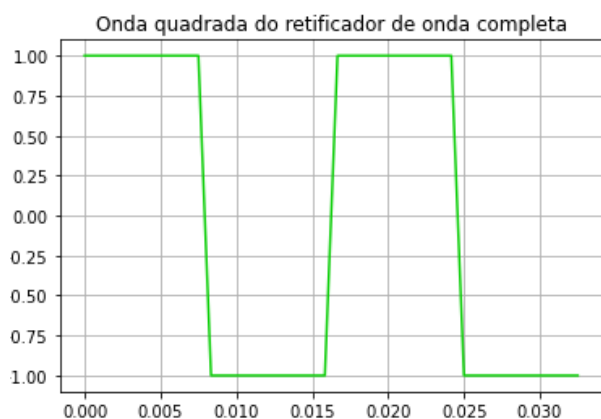
c. Identifique as principais frequências que aparecem no espectro e explique a sua origem.

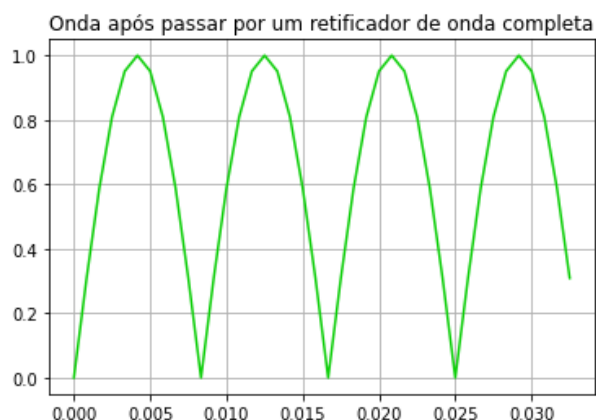
As principais frequências que aparecem no espectro, que correspondem às distorções harmônicas do sinal, são de 0 Hz, 60 Hz, 120 Hz, 240 Hz, 360 Hz e 480 Hz. Essas distorções se apresentam de forma a conter apenas frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, onde geralmente é causada por dispositivos que apresentam uma relação não linear entre tensão e corrente.

Existem diversos dispositivos com circuitos não lineares que causam essas distorções, entre eles estão os diodos, os transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação, as cargas eletrônicas que produzem descontinuidades na corrente devido ao chaveamento dos conversores, e outros exemplos citados na apostila do Prof. Antenor Pomilio.

3. RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Se observarmos um retificador de onda completa, observamos o seguinte espectro:





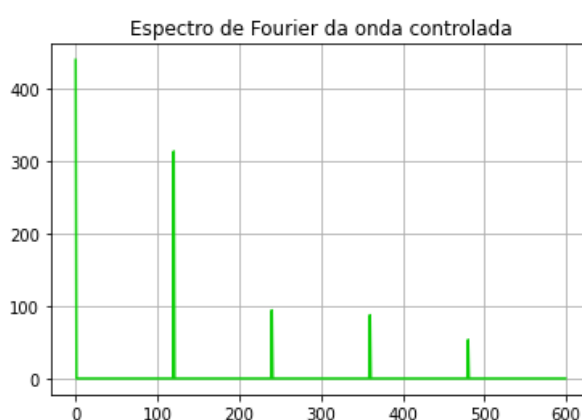
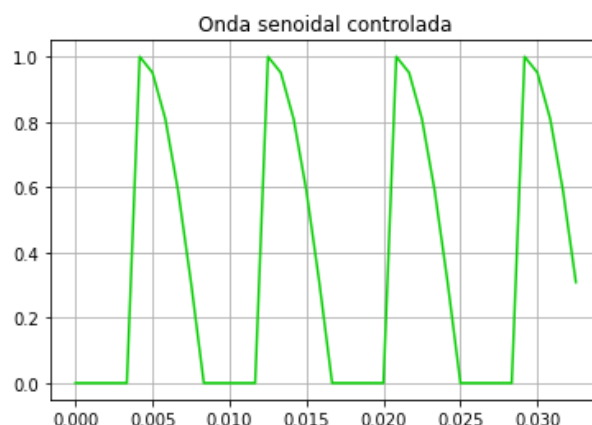
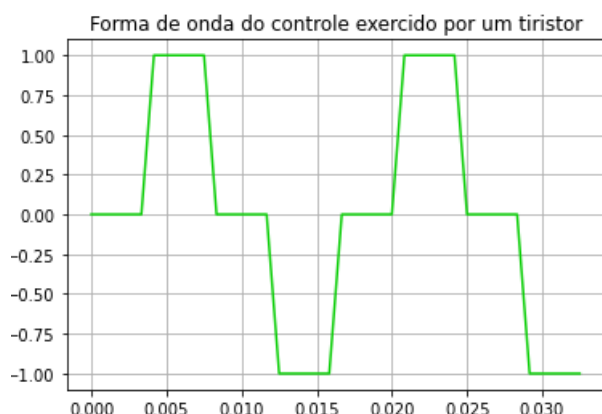
- a. Qual a diferença entre o espectro do retificador de meia onda e o de onda completa?
Qual a causa dessa diferença?

O espectro do retificador de meia onda possui uma frequência fundamental de 60Hz com a presença de harmônicas pares múltiplas dessa frequência.

No caso do retificador de onda completa, a frequência fundamental passa a ser 120Hz, porém com a presença de harmônicas tanto pares quanto ímpares. Vale ressaltar que o sinal retificado de meia onda apresenta comportamento assimétrico, o que implica no surgimento apenas das harmônicas pares. No caso do retificador completo, por sua vez, a simetria é de onda completa, o que implica no surgimento das harmônicas pares e ímpares.

4. TIRISTOR

Um outro dispositivo eletrônico de potência é o tiristor, que é capaz de controlar o momento de início da condução de um retificador. O espectro da onda senoidal após passar por um desses dispositivos é apresentado abaixo:



Podemos observar que apesar da forma da onda do tiristor ser muito diferente da onda que passou por um retificador de onda completa, seu espectro de Fourier é muito semelhante.

a. Porque a diferença do sinal no tempo não se reflete no espectro apresentado?

A forma de onda exercida por um tiristor possui um mesmo período de oscilação em comparação com o sinal do retificador de onda completa, ou seja, a frequência fundamental neste caso é dada por 120Hz. Nesta perspectiva, mesmo que haja uma mudança do sinal no tempo, a frequência fundamental deste sinal é a mesma, não implicando em mudanças significativas nas harmônicas do espectro apresentado.

b. De qual forma podemos observar diferença entre esses dois sinais no domínio de Fourier?

É possível observar a diferença entre esses dois sinais a partir da magnitude do módulo da transformada de Fourier. No caso do retificador de onda completa, a magnitude do espectro será

maior apenas na harmônica referente a $f = 0\text{Hz}$. Porém, para a frequência fundamental e as demais harmônicas do espectro, a magnitude no domínio da transformada de Fourier do tiristor é consideravelmente maior. Portanto, ainda que os sinais apresentem harmônicas nas mesmas frequências, é notável esta diferença com relação à magnitude.

5. FILTRO ATIVO - PASSA BAIXA

Nesta etapa, criamos um filtro para remover as harmônicas geradas e para limpar o sinal recortado pelo retificador de meia onda de forma a preservar somente a frequência fundamental. Ao utilizar um filtro passa baixa, porém, apenas as frequências superiores a fundamental serão eliminadas. Assim, é necessário somar uma tensão de compensação de forma a eliminar a harmônica presente em $f = 0\text{ Hz}$.

