



**Universidade Federal de Uberlândia**  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
FEELT

**ANÁLISE DE ONDAS NÃO SENOIDAIS - LÂMPADAS  
(CARGAS NÃO LINEARES)**

Relatório da Disciplina de Experimental de Circuitos Elétricos II  
por

Lesly Viviane Montúfar Berrios  
11811ETE001

Prof. Wellington Maycon Santos Bernardes  
Uberlândia, Dezembro / 2019

# Sumário

<b>1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Introdução teórica</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Preparação</b>	<b>3</b>
3.1	Materiais e ferramentas . . . . .	3
3.2	Montagem . . . . .	4
3.2.1	Lâmpadas (Cargas não lineares) . . . . .	4
3.2.2	Medições em ambiente com $f \neq 60Hz$ . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Dados Experimentais</b>	<b>6</b>
4.0.1	Lâmpadas (Cargas não lineares) . . . . .	6
4.0.2	Medições em ambiente com $f \neq 60Hz$ . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Análise sobre segurança</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Análise e discussão</b>	<b>8</b>
6.0.1	Análise da forma de onda das lâmpadas com distorção harmônica	8
6.0.2	Comparação do valor RMS obtido com o experimental . . . . .	9
6.0.3	Espectro harmônico da corrente . . . . .	9
6.0.4	Sobre a Distorção Harmônica Total (DHT) . . . . .	9
<b>7</b>	<b>Simulação computacional</b>	<b>10</b>
<b>8</b>	<b>Conclusões</b>	<b>12</b>

# 1 Objetivos

Pretende-se verificar experimentalmente conceitos teóricos de sinais não senoidais, obtendo os coeficientes da série de Fourier pelo método analítico e usando uma rotina computacional (como Matlab, Python). Aqui também é investigada a determinação do valor eficazes (rms) da tensão e corrente, bem como as potências associadas das formas de onda não senoidais.

## 2 Introdução teórica

Ondas não senoidais na rede são bastante comuns e surgem da presença de cargas não-lineares na rede (proporção tensão e corrente não é constante). Alguns exemplos de cargas geradoras de correntes harmônicas são geradores e motores CA, transformadores, lâmpadas de descarga, retificadores/motores CC controlados, inversores/motores de indução, ciclo-conversores/motores síncronos, cargas de aquecimento controladas por tiristores, reguladores de tensão a núcleo saturado, computadores etc [1].

Na Figura 1 observa-se uma característica importante para ondas com distorção harmônica. A corrente fundamental vai da fonte para a carga, enquanto que as de ordem harmônica vão da carga para a fonte (sentido oposto). Além disso, a Figura 2 ilustra como é feita a análise da onda não senoidal, por meio da descrição em séries de Fourier, para assim poder construir seu espectro de frequências.

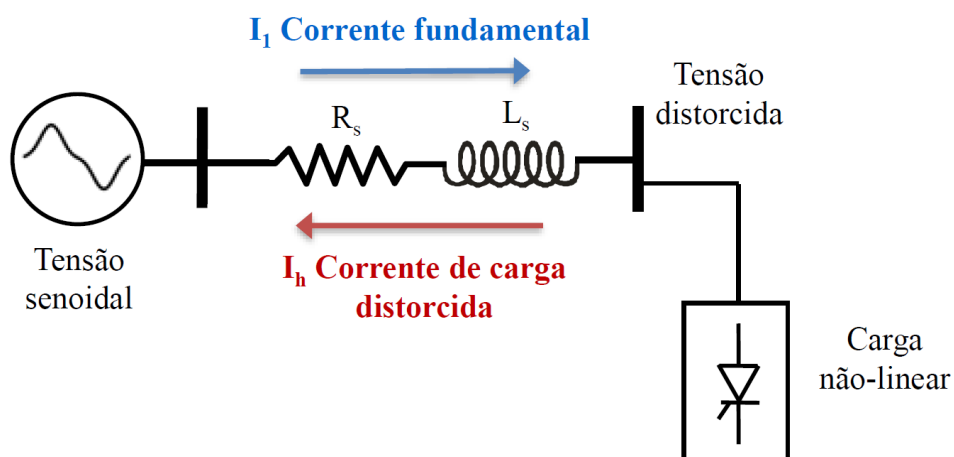


Figura 1: Figura ilustrativa de harmônicos na rede [1].

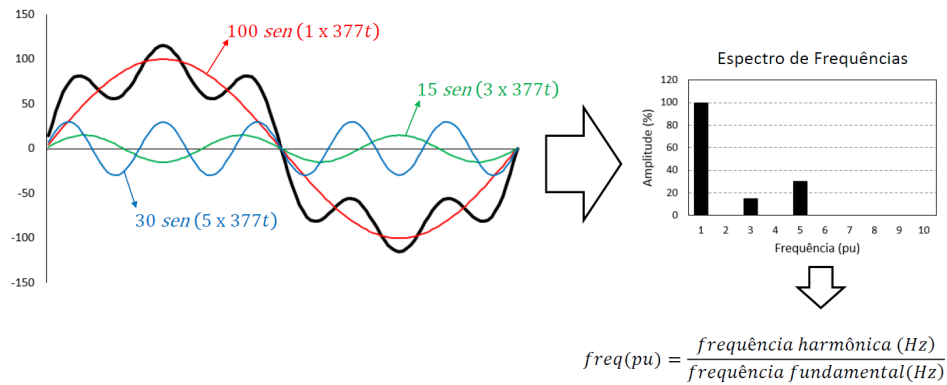


Figura 2: Descrição em série de Fourier e análise espectro de frequências [1].

## 3 Preparação

### 3.1 Materiais e ferramentas

- 1 - **Fonte:** Alimentará todo o circuito. Possui frequência de 60  $Hz$ .
- 2 - **Regulador de tensão (Varivolt):** Também chamado de autotransformador, permitirá obter o valor desejado de corrente a partir da regulação correta da tensão fornecida pela fonte.
- 3 - **Conectores:** Para as conexões no circuito foi utilizado majoritariamente cabos banana-banana.
- 4 - **Medidor eletrônico KRON Mult K:** Possibilita encontrar a medição da potência real (P) - vatímetro, reativa (Q) e aparente (S) do circuito. Ele também possui função de cofasímetro, instrumento elétrico que mede o fator de potência ( $\text{fp}$ ,  $\cos\theta$ ) ou o ângulo da impedância  $\theta$  do circuito, para um circuito com a impedância  $Z = Z \angle \theta$ .
- 5 - **Lâmpadas:** Foram utilizadas lâmpadas LED e incandescente, para investigar o carácter não linear dessas cargas e seu efeito na rede.
- 6 - **Reostato:** Carga resistiva para evitar dano na lâmpada LED. Foi setado para  $10\Omega$ .
- 7 - **Reator:** Para a segunda montagem utilizou-se um indutor na carga de 166 mH.

## 3.2 Montagem

### 3.2.1 Lâmpadas (Cargas não lineares)

A montagem realizada observa-se na Figura 3, na qual são empregados medidores de tensão e de corrente digitais (*Kron Mult-K Série 2*). A configuração usada no medidor *Kron* foi TL = 0000 (3 $\phi$  com Neutro - Carga Desequilibrada) e valor para a resistência medida foi de  $R = 10.1\Omega$  e foi aplicada uma tensão de fase  $V_F = V_{AN}$  que variou de 10 a 100V. Lembrando que as lâmpadas a LED ou fluorescente compacta normalmente acendem após certo valor de tensão.

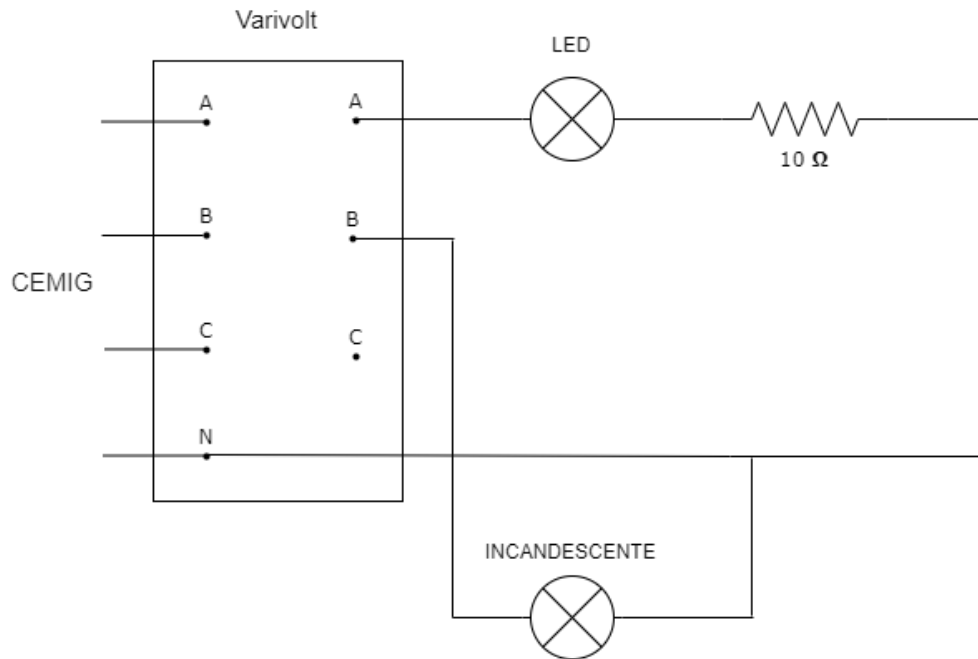


Figura 3: Montagem realizada para verificação de espectro para cargas não-lineares.

### 3.2.2 Medições em ambiente com $f \neq 60Hz$

Como na Figura 4, nessa etapa é utilizado um retificador de onda completa para representar uma onda não-senoidal. O intuito dessa montagem é medir as grandezas de tensão e corrente nos terminais da carga utilizando-se de distintos medidores, inclusive não True RMS, para assim intuir a importância da utilização de equipamento de medição True RMS.

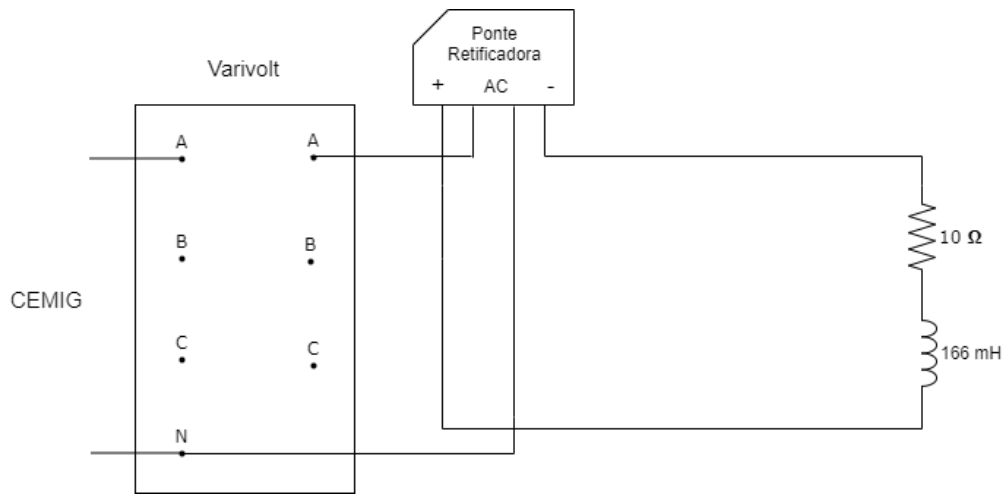


Figura 4: Montagem para experimento de ambiente com  $f \neq 60Hz$ .

## 4 Dados Experimentais

### 4.0.1 Lâmpadas (Cargas não lineares)

Do experimento para análise de tensão e corrente em cargas não lineares tem-se do dados contemplados na Tabela 1 obtidos com o medidor *Kron*. Já na Tabela 2 estão os valores de tensão obtidos com o multímetro True RMS.

Tabela 1: Dados experimentais para o experimento com lâmpadas como carga.

$V_F$ (V)	Fase	$V_F$ (V)	$I_L$	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	FP	DTT (%)	DTI (%)
10,0	A	10,47	0	0	0	0	0	4,73	0
	B	10,67	0,112	1,182	1,156	1,194	0,991	4,09	9,08
20,0	A	20,35	0	0	0	0	0	3,36	0
	B	20,86	0,14	2,907	0,287	2,92	0,995	3,36	6,51
30,0	A	30,84	0	0	0	0	0	2,97	0
	B	31,14	0,164	5,09	0,422	5,118	0,996	2,52	5,94
40,0	A	40,06	0	0	0	0	0	2,85	0
	B	40,64	0,181	7,388	0,555	7,426	0,997	2,63	5,05
50,0	A	50,02	0,127	5,037	3,862	6,338	0,792	2,820	31,29
	B	50,15	0,203	10,15	0,715	10,19	0,998	2,58	4,390
60,0	A	60,01	0,135	5,99	5,436	8,086	0,744	2,56	39,20
	B	60,32	0,223	13,45	0,853	13,45	0,998	2,59	4,340
70,0	A	70,12	0,143	7,097	7,069	10,03	0,704	2,7	46,75
	B	70,09	0,241	16,88	1,030	16,93	0,998	2,62	3,46
80,0	A	80,23	0,148	8,048	8,603	11,75	0,680	2,74	53,49
	B	79,82	0,258	20,60	1,202	20,77	0,998	2,53	3,370
90,0	A	90,32	0,144	8,764	9,454	12,79	0,679	2,51	60,16
	B	89,80	0,275	24,67	1,374	24,65	0,998	2,5	3,17
100,0	A	100,0	0,141	9,478	10,22	13,81	0,680	2,67	66,94
	B	100,1	0,291	29,21	1,540	29,14	0,999	2,33	2,92

Ademais, ainda será verificado o comportamento da rede por meio de um osciloscópio sobre os terminais do resistor de  $10\Omega$ . É importante que a garra esteja em 10x e o GND não seja conectado, no caso da existência do terra no plug da tomada. Do osciloscópio será possível salvar em um *pendrive* a forma de onda

(vetor  $v \times t$  - arquivo de imagem e tabela numérica) para extrair a corrente que circula na lâmpada.

Tabela 2: Tensões True RMS para a fase A (LED) e fase B (Incandescente)

	$V_A$ (V)	$V_B$ (V)
10V	10,49	10,62
20V	20,59	20,99
30V	31,13	30,80
40V	40,60	40,47
50V	49,62	51,00
60V	60,4	61,9
70V	69,5	71,1
80V	80,3	81,7
90V	90,65	90,99
100V	100,0	101,2

#### 4.0.2 Medições em ambiente com $f \neq 60Hz$

Da montagem da Figura 4 pode-se retirar dados com o osciloscópio, tanto de imagem conforme a Figura 5, quanto de CSV, no qual são discretizados os dados de tensão obtidos numa determinada frequência de amostragem  $F_S$ . Como o arquivo CSV obtido é demasiadamente extenso não será mostrado aqui.

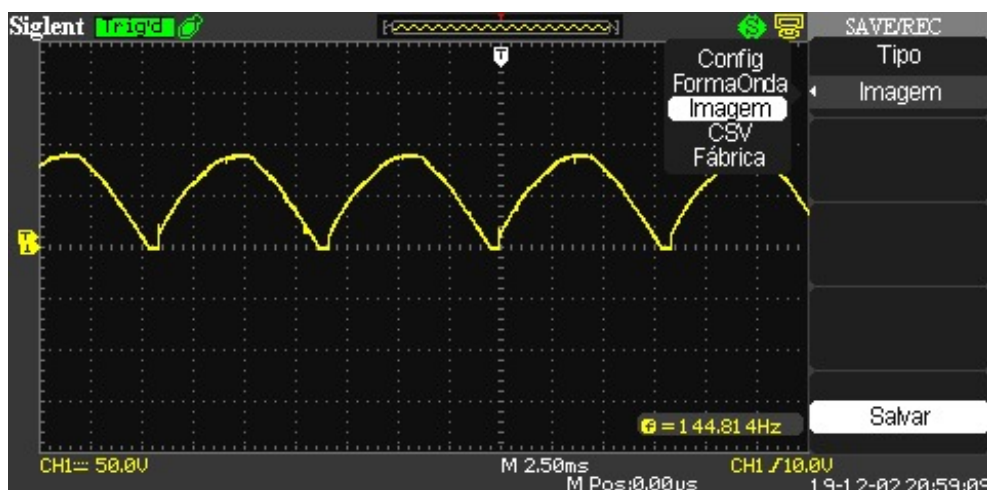


Figura 5: Dado de imagem retirado do osciloscópio.



## 5 Análise sobre segurança

Os óculos de segurança são Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e são utilizados para a proteção da área ao redor dos olhos contra qualquer tipo de detrito estranho, que possa causar irritação ou ferimentos. Também protegem contra faíscas, respingos de produtos químicos, detritos, poeira, radiação e etc [2]. É importante a utilização desse equipamento durante os experimentos a fim de evitar qualquer dano, além de preparar o profissional para o manejo correto e seguro de qualquer equipamento. Além disso, foi de extrema importância a presença do professor ou técnico na verificação da montagem do circuito antes de energizá-lo. Assim, reduziu-se riscos de curtos-circuitos ou sobrecarga na rede.

## 6 Análise e discussão

### 6.0.1 Análise da forma de onda das lâmpadas com distorção harmônica

No ambiente MATLAB, foi possível recriar a forma de onda com distorções harmônicas por meio do arquivo CSV obtido do osciloscópio, como mostrado da Figura 6.

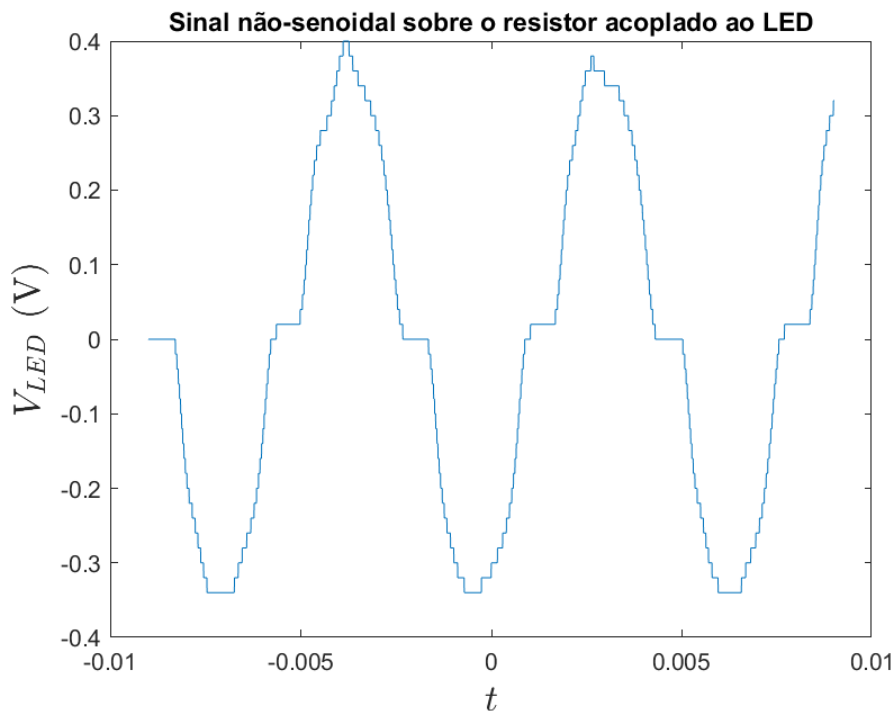


Figura 6: Reconstrução da forma de onda via MATLAB.

### 6.0.2 Comparação do valor RMS obtido com o experimental

### 6.0.3 Espectro harmônico da corrente

Ainda é possível o espectro de frequência do sinal de corrente sobre o resistor acoplado ao LED, como visto na Figura 7.

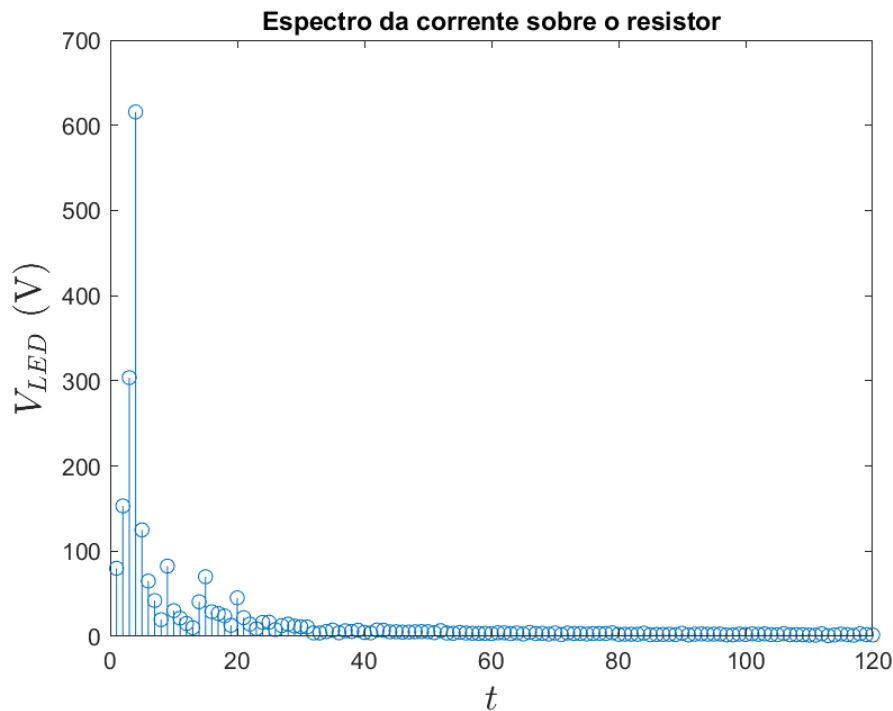


Figura 7: Espectro da forma de onda via MATLAB.

### 6.0.4 Sobre a Distorção Harmônica Total (DHT)

A distorção harmônica em um sistema de potência pode provocar diversos problemas, como analisado em [3]. Por isso, é regulamentado um valor máximo admissível em uma instalação elétrica. Abaixo são descritos alguns deles:

1. *Excitação de correntes ou tensões ressonantes entre indutâncias e capacitâncias.*  
Casos típicos: associações de capacitores com transformadores, cabos com blindagem, capacitores associados com motores, capacitores operando com reatores, dispositivos de correção de fator de potência, etc.
2. *Aparecimento de vibrações e ruído.*  
Casos típicos: ferorrressonância em transformadoresb e reatores, motores de indução ressonando com a compensação capacitiva, etc.

3. *Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos.*

Casos típicos: aumento de perdas por histerese e correntes parasitas em núcleos de motores, geradores, transformadores, reatores, relés, etc.

4. *Sobreaquecimento de capacitores.*

Caso típico: ressonância de capacitores shunt, provocando sobretensão e perdas excessivas no dielétrico. Risco de explosão do capacitor por falta de dissipação do calor gerado internamente.

5. *Erro de medição de grandezas elétricas.*

Casos típicos: medidores de energia com disco de indução, medidores de valor eficaz baseados no valor de pico ou valor médio, etc.

6. *Erro de controle de conversores.*

Casos típicos: detectores de sincronismo e comparadores de nível, usados como referência para gerar pulsos de controle em chaves eletrônicas;

7. *Erro de atuação da proteção.*

Casos típicos: relés eletromagnéticos atracando devido à contribuição das harmônicas, relés eletrônicos e digitais com erro de calibração na presença de distorções, etc.

8. *Sobrecorrente de neutro.*

Casos típicos: circuitos com lâmpadas de descarga com reatores ferromagnéticos ou circuitos retificadores monofásicos podem provocar correntes de neutro maiores que as de linha, devido às harmônicas de sequência zero.

9. *Interferências e ruídos eletromagnéticos.*

Casos típicos: fontes chaveadas, inversores de frequência, pontes retificadoras, sistemas de acionamento controlados eletronicamente, etc.

## 7 Simulação computacional

A simulação computacional foi mostrada no decorrer da sessão de Análise e Discussões em 6 e o código correspondente à análise realizada é mostrado abaixo.

```
1 clc; % nao limpar os dados!
2
3 % Tratamento de dados
4 array = table2array(table);
5
6 h = figure('Name', 'Dados Recebidos');
```

```

7 plot(array(:,1), array(:,2));
8 title('Sinal sobre o resistor acoplado ao LED');
9 xlabel('$t$', 'Interpreter', 'LaTeX', 'FontSize', 16);
10 ylabel('$V_{LED}$ (V)', 'Interpreter', 'LaTeX', 'FontSize', 16);
11
12 % saveas(h, 'Sinal-IN.png');
13
14 espectro = fft(array(:, 2));
15 g = figure('Name', 'Espectro do Sinal Recebido');
16 stem(abs(espectro));
17 title('Espectro da corrente sobre o resistor');
18 xlabel('$t$', 'Interpreter', 'LaTeX', 'FontSize', 16);
19 ylabel('$V_{LED}$ (V)', 'Interpreter', 'LaTeX', 'FontSize', 16);
20 xlim([0 120]);
21
22 saveas(g, 'Espectro-IN.png');

```

## 8 Conclusões

Equipamentos não lineares são bastante comuns na rede, e interferem por meio do aparecimento de harmônicos na rede.

## Referências

- [1] P. H. O. Rezende, "Ondas Não Senoidais", 2018.
- [2] SafetyTrabi, "Óculos de segurança: Saiba quando utilizar este EPI", SafetyTrab, 2019. Disponível em: <https://www.safetytrab.com.br/blog/oculos-de-seguranca/>. Acesso em: ago. 2019.
- [3] S.M.Deckmann e J. A. Pomilio, "Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas", Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica, DSE – FEEC – UNICAMP, 2019. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>. Acesso em: dez. 2019.