



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica

**ADRIEL BARBOSA CINTRA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS COMPONENTES HARMÔNICAS NA  
VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO**

Uberlândia  
2018

**Adriel Barbosa Cintra**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS COMPONENTES HARMÔNICAS NA  
VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: José Rubens Macedo Júnior

---

Assinatura do Orientador

Uberlândia  
2018

## **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS COMPONENTES HARMÔNICAS NA VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

### **Banca Examinadora**

---

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior

---

Prof. Dr. José Wilson Resende

---

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim

Uberlândia  
2018

Dedico este trabalho à minha família, à minha namorada e amigos, ao meu orientador Prof. José Rubens, pelo apoio, companheirismo e força prestados.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço a Deus por ter permitido e abençoado toda minha trajetória e conquistas.

À minha família, por estarem sempre presente, me apoiando, dando conselhos, palavras de carinho e também pela assistência financeira.

Ao meu orientador Prof. José Rubens Macedo Júnior, pela disponibilidade, pelo suporte, companheirismo e pelo apoio incondicional prestado em todo o desenvolvimento do trabalho.

À Lauanda Carrijo Rosa, pelo carinho, amor, ajuda oferecida, e por estar sempre presente.

Aos meus professores e toda Faculdade de Engenharia Elétrica, por todos os ensinamentos prestados, possibilitando meu crescimento profissional e pessoal, assim como todo o aparato nos laboratórios, trazendo de certa forma o aprendizado prático.

Aos meus colegas de turma pela convivência, pela troca de conhecimento, e por tornar essa jornada marcante.

## RESUMO

O presente trabalho visa retratar a influência das componentes harmônicas, sejam elas de sequência positiva ou negativa, na velocidade dos motores de indução. Devido à grande utilização dos motores de indução, principalmente, e o advento da introdução no sistema de energia elétrica dos equipamentos não-lineares, a qualidade da energia vem sofrendo alterações, e com isso influenciando no funcionamento de tais equipamentos. Sendo assim, em um primeiro momento é feito uma revisão bibliográfica acerca de como a literatura moderna trata as componentes de sequência positiva e negativa na velocidade. Em segundo plano, visa-se salientar o conceito de distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão e corrente, assim como, os principais componentes geradores, além de mostrar de forma sucinta as características das componentes de sequência positiva, negativa e zero. Prosseguindo nos estudos, será realizado medições da velocidade nos motores de indução, quando submetidos a uma alimentação com diferentes níveis de distorções harmônicas, sendo tais dados, coletados, armazenados e analisados. Ademais, mostra-se os reais efeitos provocados pelas distorções harmônicas.

## **Abstract**

The present work aims to portray the influence of hormone components, whether positive or negative, on the speed of the induction motors. Due to the high utilization of the induction motors, mainly, and the advent of the introduction of nonlinear equipment into the electric power system, the quality of the energy has undergone changes, and with that, influencing the operation of such equipment. Thus, at first, a bibliographical review is made about how modern literature deals with the components of positive and negative sequence in speed. In the background, it is intended to highlight the concept of harmonic distortions and voltage and current unbalance, as well as the main generating components, in addition to succinctly show the characteristics of positive, negative and zero sequence components. Pursuant to the studies, speed measurements will be carried out on induction motors, when submitted to a power supply with different levels of harmonic distortion, being such data collected, stored and analyzed. In addition, it shows the real effects caused by the harmonic distortions.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Representação de um sistema equilibrado .....	14
Figura 2 - Representação de um sistema desequilibrado .....	15
Figura 3 - Componentes simétricas de um sistema desequilibrado .....	15
Figura 4 - Corrente distorcida gerada pela carga não linear. Fonte [7] .....	17
Figura 5 - Correntes harmônicas circulando na impedância, resultam em tensões distorcidas na carga. Fonte [7]. .....	18
Figura 6 - Série de Fourier de um onda não senoidal. Fonte [7]. .....	18
Figura 7 - Onda simétrica em relação ao eixo horizontal e vertical .....	20
Figura 8 - Onda simétrica em relação ao eixo horizontal e assimétrica em relação ao vertical .....	21
Figura 9 - Onda com assimetria em relação ao eixo vertical e horizontal .....	21
Figura 10 - Sistema trifásico com carga desequilibrada. Fonte: [13].....	25
Figura 11 - Fonte de Tensão CSW5550.....	27
Figura 12 - Tacômetro digital com memória de massa.....	28
Figura 13 - Motor de indução .....	29
Figura 14 - Teste laboratorial .....	30
Figura 15 - Teste com 2% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	33
Figura 16 - Teste com 4% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	33
Figura 17 - Teste com 6% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	34
Figura 18 - Teste com 8% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	34
Figura 19 - Teste com 10% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	35
Figura 20 - Teste com 12% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	35
Figura 21 - Teste com 14% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	36
Figura 22 - Teste com 16% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	36
Figura 23 - Teste com 18% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	37
Figura 24 - Teste com 20% de 5 <sup>a</sup> harmônica .....	37
Figura 25 - Variação da velocidade com o aumento da amplitude de 5 <sup>a</sup> harmônica .	38
Figura 26 - Teste com 2% de 7 <sup>a</sup> harmônica .....	39
Figura 27 - Teste com 4% de 7 <sup>a</sup> harmônica .....	39
Figura 28 - Teste com 6% de 7 <sup>a</sup> harmônica .....	40
Figura 29 - Teste com 8% de 7 <sup>a</sup> harmônica .....	40
Figura 30 - Teste com 10% de 7 <sup>a</sup> harmônica .....	41

Figura 31 - Teste com 12% de 7ª harmônica .....	41
Figura 32 - Teste com 14% de 7ª harmônica .....	42
Figura 33 - Teste com 16% de 7ª harmônica .....	42
Figura 34 - Teste com 18% de 7ª harmônica .....	43
Figura 35 - Teste com 20% de 7ª harmônica .....	43
Figura 36 - Variação da velocidade com o aumento da amplitude de 7ª harmônica .	44
Figura 37 - Teste com 20% de 5ª e 7ª harmônica .....	45
Figura 38 - Teste com 20% de 3ª, 5ª e 7ª harmônica .....	45
Figura 39 - Montagem Protoboard .....	52
Figura 40 - Montagem do circuito na placa impressa .....	53
Figura 41 - Produto Final .....	53
Figura 42 - Esquemático das ligações do projeto .....	54
Figura 43 - Esquemático das ligações do sensor .....	54

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Sequência correspondente para cada ordem harmônica .....	22
Tabela 2 - Teste aplicando apenas fundamental.....	30
Tabela 3 - Teste aplicando k% de 5ª harmônica .....	30
Tabela 4 - Teste aplicando k% de 7ª harmônica .....	31
Tabela 5 - Teste aplicando 20% de 5ª harmônica e 7ª harmônica .....	31
Tabela 6 - Teste aplicando 20% de 3ª, 5ª de 7ª harmônica .....	31
Tabela 7 - Tipos de testes realizados.....	31
Tabela 8 - Dados dos testes com 5ª harmônica .....	38
Tabela 9 - Dados dos testes com 7ª harmônica .....	44
Tabela 11 - Conexões SD .....	50
Tabela 12 - Conexões do LCD .....	51

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Motivação	11
1.2	Objetivo	12
1.3	Estrutura	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE DESEQUILÍBRIO E DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO E CORRENTE</b>	<b>14</b>
2.1	Desequilíbrio de tensão	14
2.1.1	Origens do desequilíbrio	16
2.2	Distorções Harmônicas	17
2.2.1	Ordens Harmônicas presentes	20
2.2.2	Sequência de fase das harmônicas	21
2.2.3	Cargas geradoras de correntes harmônicas	22
2.2.4	Efeito Pelicular (Skin)	23
2.3	Influência das sequências de fases na velocidade do motor de indução	24
2.4	Influência das sequências de fases na leitura dos medidores de energia elétrica eletromecânicos	25
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>27</b>
3.1	Definições Gerais	27
3.2	Equipamentos Utilizados	27
3.3	Descrição dos tipos de testes	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>32</b>
4.1	Definições Gerais	32
4.2	Resultados à vazio	32
4.2.1	Quinta harmônica	32
4.2.2	Sétima harmônica	38
4.2.3	Quinta e Sétima harmônica	44
4.2.4	Terceira, Quinta e Sétima harmônica	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAGIA</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>Apêndice</b>	<b>50</b>
	<b>Apêndice A - Tacômetro Digital com Memória de Massa</b>	<b>50</b>
A.1	Inspiração	50
A.2	Montagem Laboratorial	50
A.3	Esquemáticos	53
A.4	Código do Tacômetro Digital	54

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Com a inserção cada vez maior de cargas não lineares no sistema de energia elétrica, os desequilíbrios presentes na rede e a preocupação crescente com a qualidade da energia, tem-se estudado cada vez mais sobre os efeitos destes em equipamentos rotativos. Sendo assim, encontra-se frequentemente na literatura moderna que componentes de sequência positiva geram um torque no mesmo sentido da fundamental, e as de sequência negativa geram um torque contrário, provocando assim, uma variação da velocidade dos equipamentos.

Como citado em [1], os harmônicos de ordem positiva rodam na mesma direção que a fundamental, enquanto os de ordem negativa rodam em direção oposta. Com isso, a máquina sofre a influência de torques, sejam eles contra ou a favor.

As tensões harmônicas no estator induzem correntes harmônicas no rotor. Estas correntes, causam oscilações no torque. Por exemplo, correntes de 5ª (sequência negativa) e 7ª harmônica (sequência positiva) criam um campo magnético no rotor que gira em uma velocidade de seis vezes a velocidade fundamental. Este campo induz correntes nas barras do rotor de seis vezes a frequência fundamental. Assim, a interação entre os campos magnéticos e as correntes induzidas no rotor, produz fortes oscilações no eixo do motor [2].

De acordo com a literatura, para incluir o sentido de rotação do harmônico, assumimos que a fundamental gira em direção direta, o 5º na direção oposta e o 7º na direção para frente [3].

Como relatado em [4] e [5] o desequilíbrio de tensão, tem efeito sobre o motor devido a presença de tensão de sequência positiva e outra negativa. Os impactos do desequilíbrio são: variação de velocidade, torques pulsantes, ruídos, aumento das correntes e perdas.

A tensão de sequência positiva produz o torque positivo desejado, enquanto que a tensão de sequência negativa produz um fluxo de intervalo de ar que gira contra a rotação do rotor, gerando assim um torque negativo (reverso) indesejável. O resultado é uma redução no torque e na velocidade líquidos, e a possibilidade de pulsações de velocidade e torque e aumento do ruído do motor [6].

Portanto, lê-se que as componentes de sequência positiva e negativa afetam de maneira significativa o funcionamento dos motores, sendo que, como referenciado acima, a literatura retrata uma variação de velocidade e torque.

## 1.2 Objetivo

As diversas literaturas acerca do assunto, concluem que as componentes de sequência positiva e negativa influenciam na velocidade e torque dos motores de indução, sendo que, tal trabalho vem com o intuito, baseado em dados práticos, de explicitar que a velocidade se mantém constante quando submetida a diversos níveis de harmônicos, sejam eles de sequência positiva ou negativa, variando apenas a eficiência dos equipamentos.

Para alcançar o objetivo descrito, algumas etapas devem ser concluídas, como:

- O desenvolvimento e montagem de um tacômetro digital com memória de massa;
- Uma revisão bibliográfica acerca das componentes harmônicas de sequência positiva e negativa, gerados pelo desequilíbrio de tensão e corrente e cargas não lineares;
- Coletar medições da velocidade de motores, quando submetidos a diversos níveis de componentes de sequência positiva e negativa;
- Estudo dos dados coletados;

## 1.3 Estrutura

O trabalho foi estruturado da seguinte forma:

1 – Introdução;

2 – Fundamentos de distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão e corrente em motores de indução;

3 – Procedimentos Experimentais;

4 – Resultados dos testes;

5 – Conclusão;

Apêndice

O Capítulo 1, tem como objetivo retratar como a literatura vê as componentes

de sequência positiva e negativa nos motores de indução. Além de exprimir o objetivo principal do trabalho e sua estrutura.

No Capítulo 2, “Fundamentos de distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão e corrente em motores de indução”, visa-se explicar quais as principais características e fatores geradores dos distúrbios presentes na rede, e suas principais consequências e influências nos equipamentos elétricos.

Já no Capítulo 3 serão apresentados quais os procedimentos realizados, mencionando o passo a passo adotado na realização das medições, materiais utilizados, assim como os níveis aos quais os equipamentos de teste foram submetidos.

No Capítulo 4 será feita uma tratativa dos dados, sendo montado gráficos e tabelas com o intuito de chegar no objetivo proposto.

O Capítulo 5 vem com o intuito de finalizar todo o conteúdo exposto no trabalho, assim como concluir o tema. E o Apêndice traz de forma mais detalhada o tacômetro digital com memória de massa, sendo nele, anexado o código desenvolvido, equipamentos utilizados e produto final.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE DESEQUILÍBRIO E DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO E CORRENTE

O termo qualidade de energia surgiu em 1980, e vem se tornando cada vez mais recorrente devido a, inserção de novos equipamentos baseados em microcontroladores e dispositivos eletrônicos, utilização de inversores de frequência no acionamento de motores e utilização incessante de cargas não lineares.

Com isso definiu-se como um problema de qualidade de energia: qualquer problema de energia manifestado em desvios de tensão, corrente ou frequência que resultam em falhas ou danos no equipamento do cliente [7]. Contudo, o módulo 8 do PRODIST veio para estabelecer os procedimentos da qualidade da energia elétrica, visando assim, a qualidade do produto e do serviço.

Arelado aos índices de qualidade estão principalmente, distorções e desequilíbrio de tensão. Sendo assim, este capítulo aborda de maneira sucinta os fundamentos teóricos sobre desequilíbrio e distorção de tensão, assim como seus principais efeitos nos motores de indução.

### 2.1 Desequilíbrio de tensão

Um sistema trifásico equilibrado consiste basicamente, quando se tem as três fases com amplitudes iguais de tensão e defasadas de  $120^\circ$ .

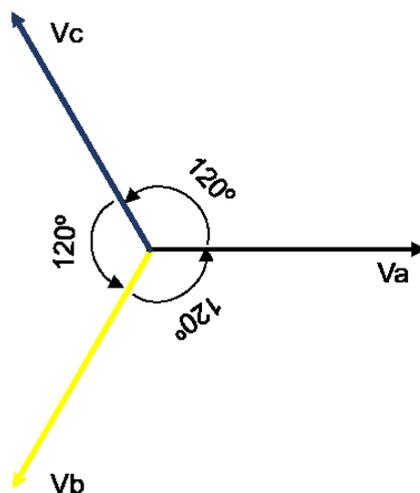


Figura 1 - Representação de um sistema equilibrado

Sendo que um sistema é desequilibrado, quando as três fases apresentam diferentes amplitudes de tensão, e/ou defasagem angular entre as fases diferentes

de 120° elétricos.

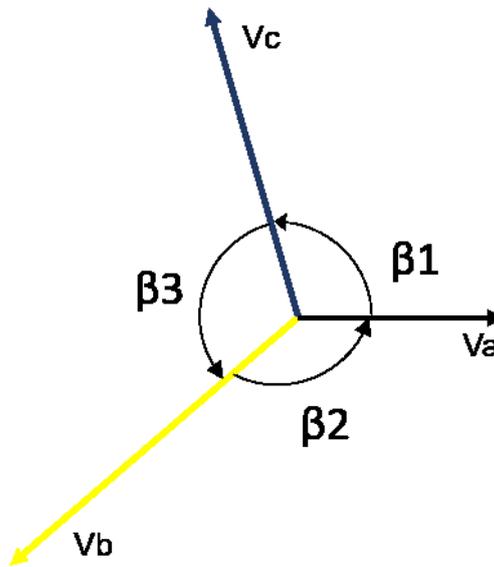


Figura 2 - Representação de um sistema desequilibrado

O sistema desequilibrado pode ser decomposto, através do método de componentes simétricas, em dois sistemas equilibrados, ou seja, tensões com mesmo módulo e defasadas de 120° e um sistema com tensões defasadas de 0° e mesmo módulo. Sendo que, tais componentes simétricas são designadas como de sequência positiva (mesma sequência de fase do sistema original), negativa (sequência de fase contrária ao original) e zero.

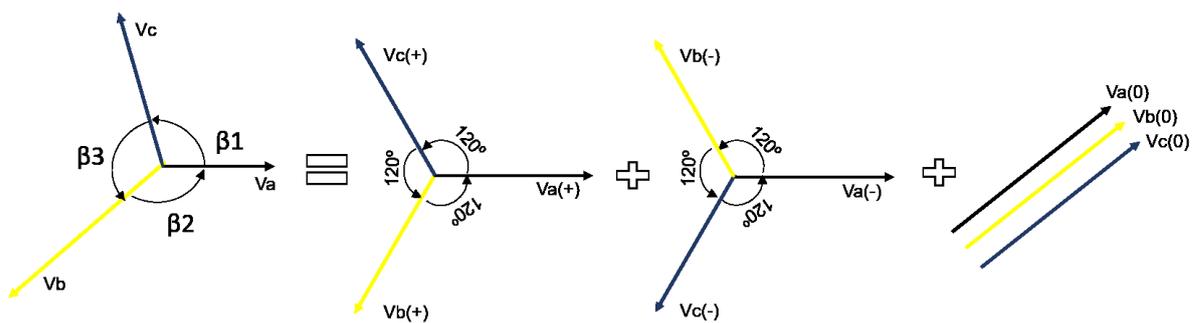


Figura 3 - Componentes simétricas de um sistema desequilibrado

Conforme mostrado na Fig. 3, o sistema não possui as condições descritas em (2.1) e (2.2).

$$|V_a| = |V_b| = |V_c| \tag{2.1}$$

$$\angle V_a = 0; \angle V_b = -120; \angle V_c = 120. \tag{2.2}$$

### 2.1.1 Origens do desequilíbrio

Os desequilíbrios estão presentes a todo momento na rede, e este se deve a diversos fatores, dentre eles a assimetria das linhas de transmissão, as quais possuem impedâncias diferentes ao longo da linha. Uma forma de mitigar este efeito é a realização da transposição dos cabos condutores. No Brasil, devido as grandes distâncias das linhas de transmissão, o desequilíbrio se torna notável, havendo assim, grandes necessidades de medidas a serem tomadas para reduzir seus efeitos.

Os sistemas monofásicos são grandes colaboradores para o desequilíbrio de tensão, pois as cargas dos consumidores são ligadas de maneira arbitrária, além de que, as demandas requeridas variam constantemente ao longo do tempo. Além disso, consumidores alimentados com sistema trifásico, quando detentores de uma má distribuição interna das cargas, produzem correntes desequilibradas que se dirigem para a rede de energia elétrica.

Os fornos são também grandes geradores de desequilíbrio, podendo ser monofásico, de indução e trifásico à arco. Tais equipamentos, são cargas com grandes potenciais geradores de desequilíbrio pelo fato de, em sua maioria serem monofásicos, ou seja, estarem ligados entre duas fases de um sistema trifásico, provocando assim, um desequilíbrio de corrente no alimentador. Além disso, são cargas de grande potência.

O desequilíbrio está conectado também as máquinas de solda e aparelhos de raios-X, os quais causam possuem corrente variável ou temporária.

Ademais, tem-se nas anomalias do sistema grandes geradores de instabilidade, como a abertura do condutor, curto-circuito e falha na isolação de equipamentos. Quando se tem um curto-circuito as fases ficam desequilibrados, sendo que, a tensão do barramento do curto sofre um afundamento devido à alta corrente. Por exemplo, em um curto fase-terra, a fase em curto tem a sua tensão reduzida enquanto as outras duas têm as suas tensões elevadas [9].

## 2.2 Distorções Harmônicas

Na década de 20, teve-se os primeiros relatos de problemas criados por harmônicos. Estes ocorreram nas primeiras instalações conversoras. Uma destas primeiras instalações foi na refinaria de cobre a oeste de Salt Lake City. Quando esta instalação foi energizada, as conversas telefônicas transcontinentais, que ocorriam no momento, foram interrompidas. Isto porque o sistema CA de alimentação dos retificadores da refinaria corriam paralelamente às linhas telefônicas, e as harmônicas causadas pelos retificadores induziram tensões nas linhas suficientes para criar ruído nos circuitos telefônicos, interrompendo assim a conversação [11].

A partir disto, iniciou-se os estudos das distorções harmônicas, sendo estas ondas não senoidais de tensão ou de corrente, as quais possuem frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. A distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares no sistema de energia. O dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional a tensão aplicada. De acordo com a Fig. 4 e 5, quando se tem uma carga não linear, ao se aplicar uma tensão senoidal, surge uma corrente distorcida. A distorção de tensão é o resultado de correntes distorcidas que passam pela impedância linear série do sistema de entrega de energia [7].

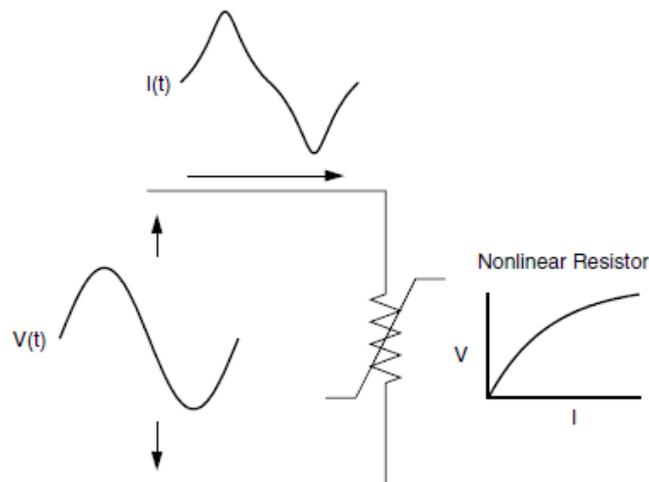


Figura 4 - Corrente distorcida gerada pela carga não linear. Fonte [7]

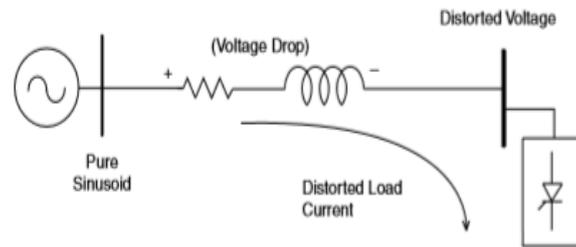


Figura 5 - Correntes harmônicas circulando na impedância, resultam em tensões distorcidas na carga. Fonte [7].

Para o estudo de uma onda não senoidal, aplica-se o método matemático da Série de Fourier. Tal método consiste basicamente, em dividir a onda não senoidal em componentes senoidais com diferentes frequências, ou seja, a onda distorcida é dividida em um somatório de ondas senoidais, cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental.

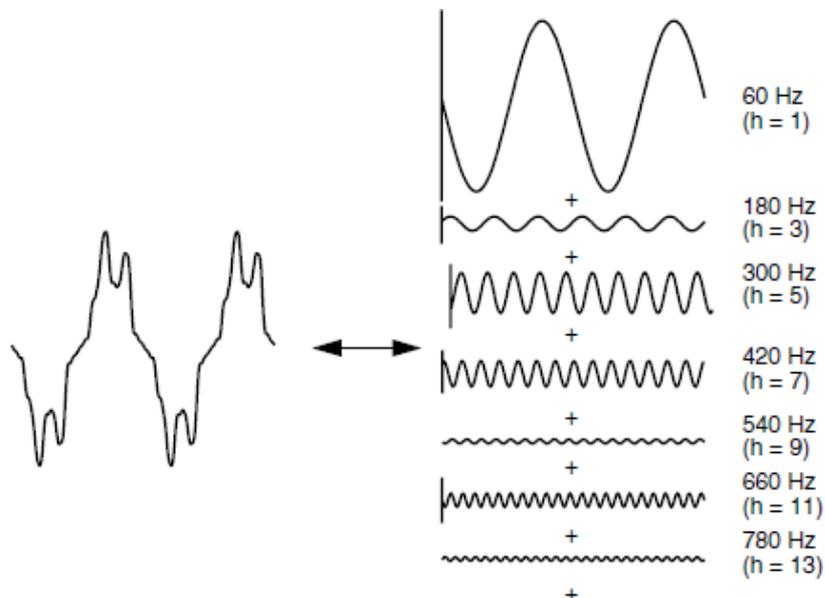


Figura 6 - Série de Fourier de um onda não senoidal. Fonte [7].

Através da Série de Fourier, uma onda distorcida pode ser decomposta em uma componente contínua, uma onda senoidal e ondas senoidais com diferentes frequências. Estas ondas senoidais com frequência múltiplas da fundamental são as denominadas harmônicas. A decomposição pode ser feita em senos, cossenos ou uma reunião de ambos.

$$f(t) = A_0 + A_1 \text{sen}(wt) + A_2 \text{sen}(2wt) + \dots + A_n \text{sen}(nwt) + B_1 \cos(wt) + B_2 \cos(2wt) + \dots + B_n \cos(nwt) \quad (2.3)$$

Onde:

$A_0$  é o valor médio;

$A_n$  é a amplitude de cada harmônica quando junta dos termos do seno;

$B_n$  é a amplitude de cada harmônica quando junta dos termos do cosseno;

Separando os termos que acompanham o seno tem-se a Equação (2.4).

$$v(t) = V_0 + V_1 \text{sen}(\omega t + \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} V_n \text{sen}(n\omega t + \phi_n) \quad (2.4)$$

Onde:

$V_0$  é o valor médio de tensão (componente contínua);

$V_1$  é a amplitude da componente fundamental;

$V_n$  é a amplitude das componentes harmônicas de ordem  $n$ ;

$n$  é a ordem harmônica;

$\omega$  é a frequência fundamental;

$\phi_1$  é o ângulo de fase da frequência fundamental;

$\phi_n$  é o ângulo de fase da harmônica de ordem  $n$ ;

Idem corresponde para uma onda distorcida de corrente, conforme Equação (2.5).

$$i(t) = I_0 + I_1 \text{sen}(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \text{sen}(n\omega t + \theta_n) \quad (2.5)$$

$I_0$  é o valor médio de corrente (componente contínua);

$I_1$  é amplitude da componente fundamental;

$I_n$  é a amplitude das componentes harmônicas de ordem  $n$ ;

$n$  é a ordem harmônica;

$\omega$  é a frequência fundamental;

$\theta_1$  é o ângulo de fase da frequência fundamental;

$\theta_n$  é o ângulo de fase da harmônica de ordem n;

### 2.2.1 Ordens Harmônicas presentes

Analisando um sinal distorcido, é possível determinar quais componentes harmônicas estão presentes. Tal estudo é feito sob a análise da forma de onda em relação ao eixo horizontal e vertical, da simetria presente e defasamento entre as fases.

Para a área positiva igual à negativa e existência de simetria, conforme Fig. 7 chega-se na conclusão de que, não existe harmônicas de ordem par, subdividindo-se ainda em:

- Se a defasagem angular for diferente de  $120^\circ$ , tem-se todas as harmônicas ímpares. Exemplo:  $n = 1,3,5,7,9,11,13,15,17,\dots$
- Já se a defasagem for igual a  $120^\circ$ , as harmônicas presentes serão as ímpares, menos de ordem 3 e suas múltiplas. Exemplo:  $n = 1,5,7,11,13,17,\dots$

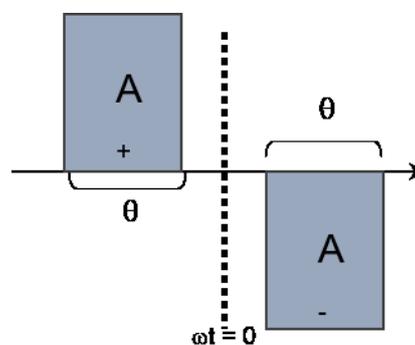


Figura 7 - Onda simétrica em relação ao eixo horizontal e vertical

Quando se tem, a área positiva igual a negativa, mas agora com uma assimetria da forma de onda, conforme Fig. 8, tem-se harmônicas de todas as ordens. Além disso:

- Se a defasagem angular for diferente de  $120^\circ$ , o sistema possuirá tanto as harmônicas pares quanto ímpares. Exemplo:  $n = 1,2,3,4,5,6,7,8,9,\dots$
- Já se a defasagem for igual a  $120^\circ$ , o sistema não possuirá as de 3ª ordem e suas múltiplas. Exemplo:  $1,2,4,5,7,8,\dots$

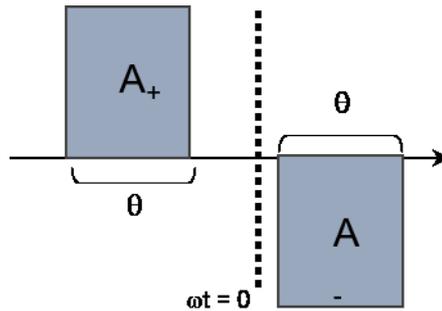


Figura 8 - Onda simétrica em relação ao eixo horizontal e assimétrica em relação ao vertical

Tem-se ainda sistemas em que há assimetria da forma de onda em relação ao eixo horizontal e vertical, conforme mostrado na Fig. 9. Sendo assim, há a presença de harmônicas de todas as ordens e componente contínua. Exemplo:  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, \dots$

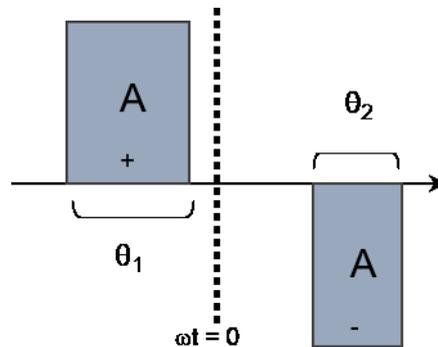


Figura 9 - Onda com assimetria em relação ao eixo vertical e horizontal

### 2.2.2 Sequência de fase das harmônicas

Além da classificação das harmônicas quanto a sua ordem (par ou ímpar), pode-se classificá-la também quanto a sequência (positiva, negativa e zero). Uma harmônica é classificada como de sequência positiva, quando sua sequência de fase é igual a fundamental, ou seja, original. Como por exemplo, quando se tem um sistema original de sequência abc, as harmônicas ídem são as positivas, as com sequência invertida (acb) negativa e as com defasagem  $0^\circ$  são as de sequência zero.

Em um sistema trifásico equilibrado perfeito, a sequência da fase harmônica pode ser determinada pela multiplicação do número harmônico com a rotação normal da fase de sequência positiva. Por exemplo, para o segundo harmônico,  $h = 2$ , obtemos  $2 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$  ou  $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$ , que é a sequência negativa. Para a terceira harmônica,  $h = 3$ , obtemos  $3 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$  ou  $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ , que

é a sequência zero. As seqüências de fases para todas as outras ordens harmônicas podem ser determinadas da mesma forma [7].

Segue na Tabela 1, uma amostragem da sequência correspondente para algumas ordens harmônicas.

Tabela 1 - Sequência correspondente para cada ordem harmônica

Ordem Harmônica	Sequência
1	Positiva
2	Negativa
3	Zero
4	Positiva
5	Negativa
6	Zero
7	Positiva
8	Negativa
9	Zero
10	Positiva
11	Negativa
12	Zero
...	...

Com isso, a regra válida para a divisão das harmônicas, quando se tem um sistema equilibrado é:

- $h = 3n + 1$ , corresponde as de sequência positiva;
- $h = 3n + 2$ , corresponde as de sequência negativa;
- $h = 3n + 3$ , corresponde as de sequência zero;

Sendo que,  $h$  corresponde a ordem harmônica e  $n$  como um número natural inteiro.

### 2.2.3 Cargas geradoras de correntes harmônicas

As instalações industriais modernas são caracterizadas pela aplicação generalizada de cargas não lineares. A aplicação de capacitores para correção do fator de potência pode potencializar as correntes harmônicas levando a ressonância

dentro da instalação. As condições de ressonância causam superaquecimento do motor e transformador e o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos. As cargas não lineares são principalmente: conversores de energia trifásicos, dispositivos a arco e saturáveis [7].

Dentro dos dispositivos saturáveis tem-se os transformadores, os quais geram correntes harmônicas. Tais correntes surgem devido a característica não linear da curva de magnetização do núcleo, a qual determina o espectro da curva da corrente de magnetização. Sendo assim, ao aplicar uma tensão senoidal, devido a saturação do material ferromagnético, há a distorção da corrente, gerando componentes de sequência negativa.

Com o avanço cada dia maior da eletrônica de potência, vê-se nos sistemas de energia elétrica, a presença maciça de cargas conectadas na rede via conversores. Estes conversores são grandes geradores de distorções harmônicas, pois modificam a tensão senoidal de entrada. Tal modificação se dá através de diodos ou tiristores. Tais equipamentos são utilizados em motores CC controlados, acionamento dos motores de indução, fornos de indução, eletrólise por retificação, dentre outros.

Ademais, encontra-se como potenciais geradores de distorções os reguladores. Tal ferramenta utiliza-se de tiristores, que através do controle do ângulo de disparo, tem-se na saída uma onda fracionada, de acordo com a frequência imposta. Tal fracionamento gera uma corrente distorcida. O emprego desta ferramenta se dá em fornos de indução controlados por reatores saturados, computadores, eletrodomésticos, velocidade dos motores CA controlados pela tensão do estator, e cargas de aquecimento controladas.

#### **2.2.4 Efeito Pelicular (Skin)**

O Efeito Pelicular ou Skin, caracteriza-se pela repulsão das linhas de corrente eletromagnética, fazendo com que esta, tenda a circular ao longo do condutor pela superfície. Este efeito só ocorre quando se tem circulando pelo condutor corrente alternada. Sendo assim, há um aumento da resistência, devido a diminuição da área efetiva de condução. A variação da resistência pode ser percebida pela equação (2.6).

Sua proporcionalidade se dá em relação a intensidade da corrente e aumenta

com a raiz quadrada da frequência. Sendo assim, quando se tem a presença de componentes de frequências diferentes da fundamental, a área efetiva de condução diminui, aumentando-se a resistência, e conseqüentemente tem-se maiores perdas por Efeito Joule.

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad 2.6$$

Onde:

$R$  é a resistência;

$\rho$  é a resistividade do material;

$l$  é o comprimento;

$A$  é a área.

### **2.3 Influência das sequências de fases na velocidade do motor de indução**

Nesta etapa dos estudos, será descrito o porque da não variação da velocidade do motor de indução, quando aplicado uma onda não senoidal na alimentação.

Para medir a potência aparente, é necessário incluir uma de aleatoriedade na sua resolução, mesmo quando lidamos com cargas puramente resistivas. Uma explicação simples para essas observações pode ser dada assumindo uma resistência variável no tempo, uma tensão senoidal com valor rms constante e uma corrente senoidal com amplitude variando aleatoriamente. Essa corrente pode ser separada em uma corrente de amplitude constante e uma corrente variando aleatoriamente com valor médio zero calculado para o tempo total de observação. Esta componente de corrente aleatória não causa transferência líquida de energia. Sendo assim a aleatoriedade instantânea, é uma potência que causa perdas adicionais nos condutores da linha de abastecimento e enrolamentos do transformador [13] e motores.

Conforme Fig. 10, a potência da sequência negativa não contribui para a potência de saída. Essa potência de sequência negativa faz parte de uma cadeia de conversão de energia na qual uma pequena quantidade de energia de sequência

positiva é convertida em energia de seqüência negativa fornecida (retornada) à rede [13].

Sendo assim, constata-se que, as componentes de seqüência negativa e positiva não participam da conversão eletromecânica de energia, apenas a parte positiva fundamental contribui para a potência de saída. Com isso, a velocidade do motor de indução mantém-se inalterada, quando na presença de componentes de seqüência positiva, negativa e zero.

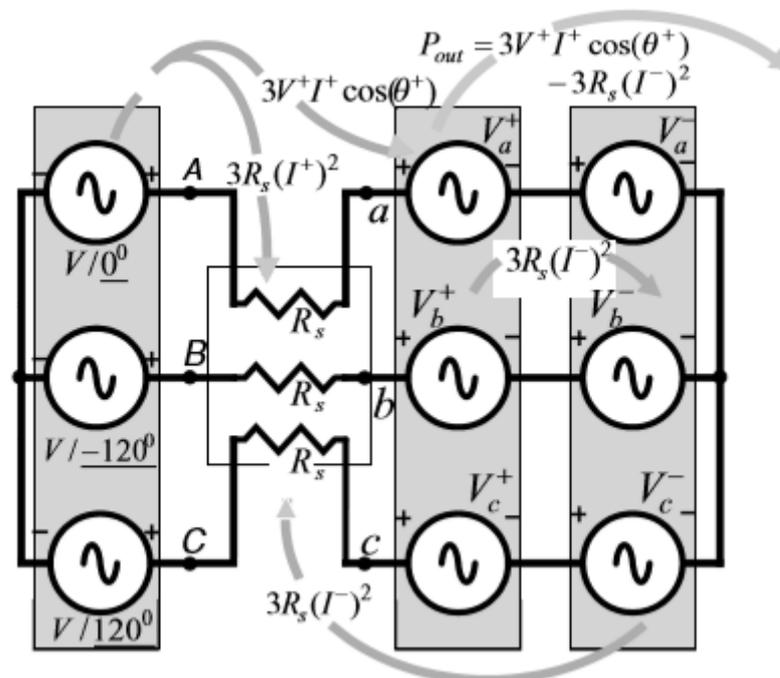


Figura 10 - Sistema trifásico com carga desequilibrada. Fonte: [13]

## 2.4 Influência das seqüências de fases na leitura dos medidores de energia elétrica eletromecânicos

Analisando os medidores de energia elétrica eletromecânicos, assim como a influência das sequencias de fases na sua velocidade, fator que determina a potência ativa, depara-se com a presença da bobina de tensão e da de corrente.

Ao energizar o medidor, a bobina de potencial produz um fluxo magnético que corta o disco. Assim, no disco surge uma corrente parasita. O mesmo ocorre com a bobina de corrente, que quando energizada gera um fluxo magnético que também corta o disco. Quando se combina os fluxos, surge uma força fazendo-o rotacionar, ou seja, irá aparecer um torque motor no disco. Sendo assim, a potência ativa

registrada pelo medidor será proporcional a velocidade do mesmo, ou seja, quanto maior a carga, maior a corrente circulante, maior o fluxo e conseqüentemente maior a velocidade.

Tendo em vista o funcionamento dos medidores de energia elétrica eletromecânicos, quando há a presença de componentes de sequência positiva, negativa e zero, não há variação da velocidade e, portanto, não ocorre medição incorreta da potência ativa. Tal fato se dá, devido as componentes de sequência positiva, exceto fundamental, negativa e zero, não participarem da conversão eletromecânica de energia, ou seja, não influenciam no torque e nem na velocidade.

### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Definições Gerais

Nesta seção será descrito os procedimentos adotados para a captura dos dados, assim como, os equipamentos utilizados e as características dos testes simulados. À partir disso, os dados coletados serão tratados e analisados no capítulo seguinte.

#### 3.2 Equipamentos Utilizados

Para os testes foram utilizados, uma fonte de tensão, um tacômetro digital com memória de massa e um motor de indução. A fonte usada foi do modelo CSW5550, da marca California Instruments. Tal modelo possui potência de 11,5 kVA, e funções que permitem inserir a forma de onda desejada, ou seja, a amplitude da tensão (fase-neutro), o defasamento, assim como a manipulação de distorções harmônicas. Esta fonte permitiu então, simular os diversos ambientes que os motores de indução, estão sujeitos. Esta está representada na Fig. 11.

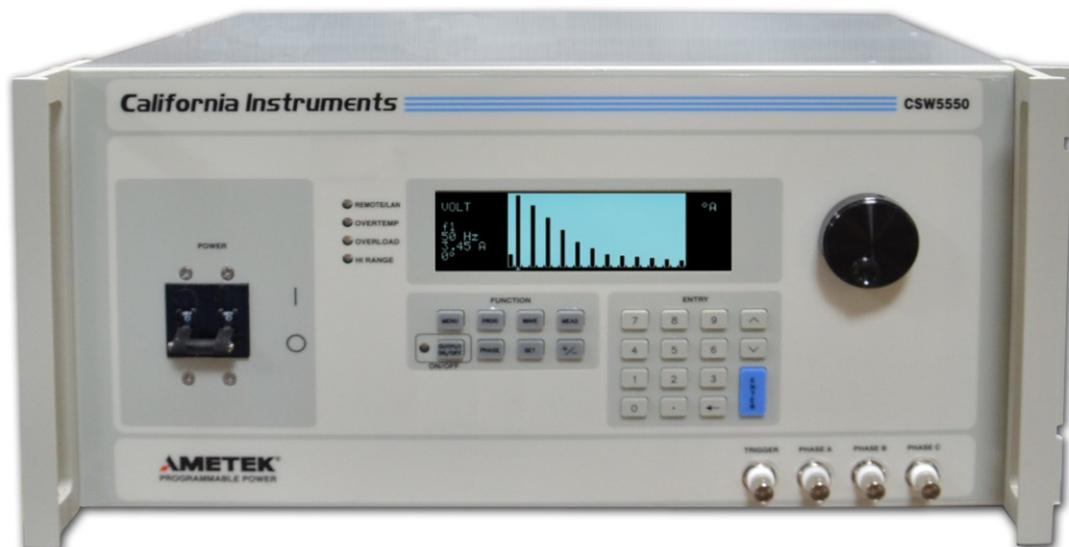


Figura 11 - Fonte de Tensão CSW5550

Além da fonte de tensão, foi necessário um tacômetro para registrar a velocidade tanto do motor de indução, quanto do medidor eletromecânico. Devido a tal necessidade, desenvolveu-se um tacômetro digital com memória de massa. Este tacômetro foi elaborado utilizando-se como microprocessador o Arduino UNO, com

linguagem de programação C e um sensor infravermelho do tipo TCRT5000. O projeto baseou-se em duas vertentes, sendo uma o hardware e o visor LCD, e a outra o sensor infravermelho. O sensor faz a leitura dos pulsos oriundos do movimento circular dos motores de indução e envia para o Arduino, onde se encontra toda a lógica de programação, juntamente com as tratativas matemáticas. No visor LCD, são mostradas as velocidades instantâneas, as quais são calculadas tomando-se como base um intervalo de 15 pulsos, e as médias, as quais são obtidas através do somatório de 15 amostragens instantâneas.

Além de tais funcionalidades básicas, foi implementado algumas opções, sendo estas, com ou sem memória de massa, e deletar ou não os arquivos presentes no cartão de memória. O projeto encontra-se ilustrado na Fig.12.



Figura 12 - Tacômetro digital com memória de massa

Além de tais equipamentos, utilizou-se também para fins de teste, um motor de indução.



Figura 13 - Motor de indução

### 3.3 Descrição dos tipos de testes

Os testes realizados em bancada, basearam-se em aplicar distorções e desequilíbrios de tensão, através da fonte CSW5550, na alimentação do motor de indução. Sendo o tacômetro digital colocado no eixo do motor para medir a velocidade. Conforme Fig. 14.



Figura 14 - Teste laboratorial

Primeiramente, os testes consistiram em aplicar uma alimentação puramente senoidal e coletar as velocidades encontradas para tal situação. Seguindo com os ensaios, aplicou-se juntamente com a fundamental uma 5ª harmônica, ou seja, sequência negativa (considerando o sistema equilibrado), com a amplitude variando de 2% em 2%, até alcançar 20% da fundamental. Outra experiência aplicada, foi fundamental mais 7ª harmônica, sequência positiva (considerando sistema equilibrado), com a amplitude variando de 2% em 2%, até alcançar 20% da fundamental. Além destes, aplicou-se uma fundamental com 20% de 5ª harmônica e 20% de 7ª harmônica, dentre outros.

Tabela 2 - Teste aplicando apenas fundamental

	<b>Amplitude (%)</b>	<b>Fase A (<math>\Phi_a</math>)</b>	<b>Fase B (<math>\Phi_b</math>)</b>	<b>Fase C (<math>\Phi_c</math>)</b>
<b>Fundamental</b>	100	0	-120	120

Tabela 3 - Teste aplicando k% de 5ª harmônica

	<b>Amplitude (%)</b>	<b>Fase A (<math>\Phi_a</math>)</b>	<b>Fase B (<math>\Phi_b</math>)</b>	<b>Fase C (<math>\Phi_c</math>)</b>
<b>Fundamental</b>	100	0	-120	120
<b>5ª Harmônica</b>	k	0	120	-120

Tabela 4 - Teste aplicando k% de 7ª harmônica

	Amplitude (%)	Fase A ( $\Phi_a$ )	Fase B ( $\Phi_b$ )	Fase C ( $\Phi_c$ )
Fundamental	100	0	-120	120
7ª Harmônica	k	0	-120	120

Tabela 5 - Teste aplicando 20% de 5ª harmônica e 7ª harmônica

	Amplitude (%)	Fase A ( $\Phi_a$ )	Fase B ( $\Phi_b$ )	Fase C ( $\Phi_c$ )
Fundamental	100	0	-120	120
5ª Harmônica	20	0	120	-120
7ª Harmônica	20	0	-120	120

Tabela 6 - Teste aplicando 20% de 3ª, 5ª de 7ª harmônica

	Amplitude (%)	Fase A ( $\Phi_a$ )	Fase B ( $\Phi_b$ )	Fase C ( $\Phi_c$ )
Fundamental	100	0	-120	120
3ª Harmônica	20	0	0	0
5ª Harmônica	20	0	120	-120
7ª Harmônica	20	0	-120	120

Sendo que, k varia de 2% em 2% até 20% da fundamental.

Ademais, foram realizadas diversas implicações e combinações, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Tipos de testes realizados

Teste	Características dos testes realizados	DTT(%)
1	Tensão puramente senoidal	0
2	Tensão senoidal + 5ª harmônica	2
3	Tensão senoidal + 5ª harmônica	4
4	Tensão senoidal + 5ª harmônica	6
5	Tensão senoidal + 5ª harmônica	8
6	Tensão senoidal + 5ª harmônica	10
7	Tensão senoidal + 5ª harmônica	12
8	Tensão senoidal + 5ª harmônica	14
9	Tensão senoidal + 5ª harmônica	16
10	Tensão senoidal + 5ª harmônica	18
11	Tensão senoidal + 5ª harmônica	20
12	Tensão senoidal + 7ª harmônica	2
13	Tensão senoidal + 7ª harmônica	4
14	Tensão senoidal + 7ª harmônica	6
15	Tensão senoidal + 7ª harmônica	8
16	Tensão senoidal + 7ª harmônica	10
17	Tensão senoidal + 7ª harmônica	12
18	Tensão senoidal + 7ª harmônica	14
19	Tensão senoidal + 7ª harmônica	16
20	Tensão senoidal + 7ª harmônica	18
21	Tensão senoidal + 7ª harmônica	20
22	Tensão senoidal + 5ª harmônica + 7ª harmônica	20
23	Tensão senoidal + 3ª harmônica + 5ª harmônica + 7ª harmônica	20

## **4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

### **4.1 Definições Gerais**

Após realizado os testes e tendo os dados em mãos, partiu-se para uma manipulação dos mesmos, afim de, mostrar de forma clara e sucinta os resultados obtidos. Para tal objetivo, trabalhou-se no desenvolvimento e disposição de tabelas e gráficos, com o intuito de deixar de forma simples e direta as respostas alcançadas.

### **4.2 Resultados à vazio**

#### **4.2.1 Quinta harmônica**

Os primeiros testes realizados, foram inserindo-se uma 5ª harmônica (sequência negativa) na alimentação do motor. A amplitude de tal, foi sendo variada e os dados coletados. Tais dados estão mostrados nas Fig. 15 a 24, sendo que, no gráfico do lado esquerdo tem-se a forma de onda aplicada no motor para cada distorção, e do lado direito os resultados obtidos através das medições feitas em laboratório, sendo tais dados trabalhados e mostrados por meio da média móvel, em um intervalo de 120 segundos.

Além dos resultados obtidos, foram inseridos nos gráficos as médias, tanto da fundamental quanto dos testes realizados, no intervalo de tempo analisado, com o intuito de proporcionar uma análise dinâmica e visual acerca do estudado.

Para uma alimentação com 2% de 5ª harmônica tem-se a Fig. 15.

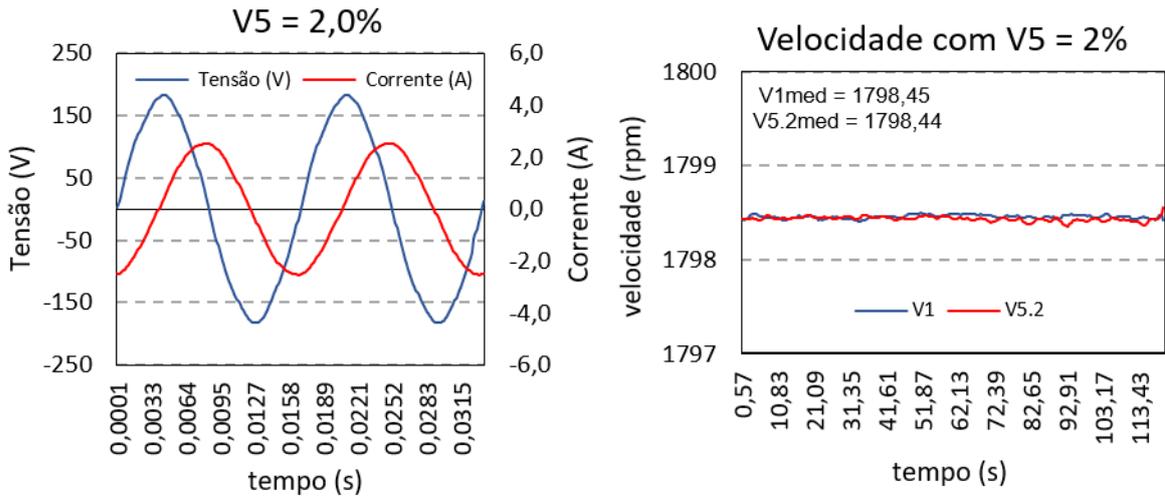


Figura 15 - Teste com 2% de 5ª harmônica

Aplicando 4% de 5ª harmônica tem-se a Fig. 16.

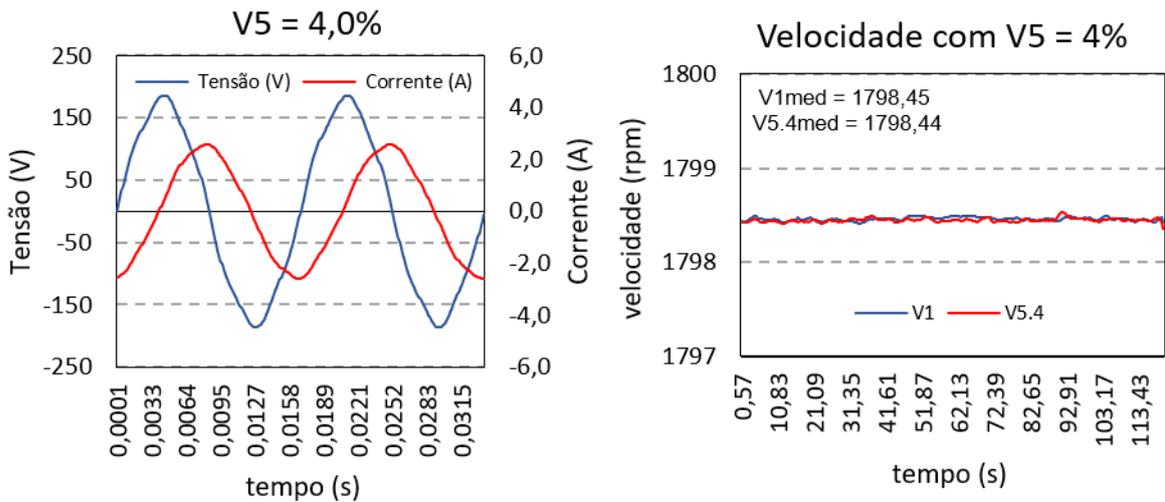


Figura 16 - Teste com 4% de 5ª harmônica

Aplicando 6% de 5ª harmônica chega-se nos resultados da Fig. 17.

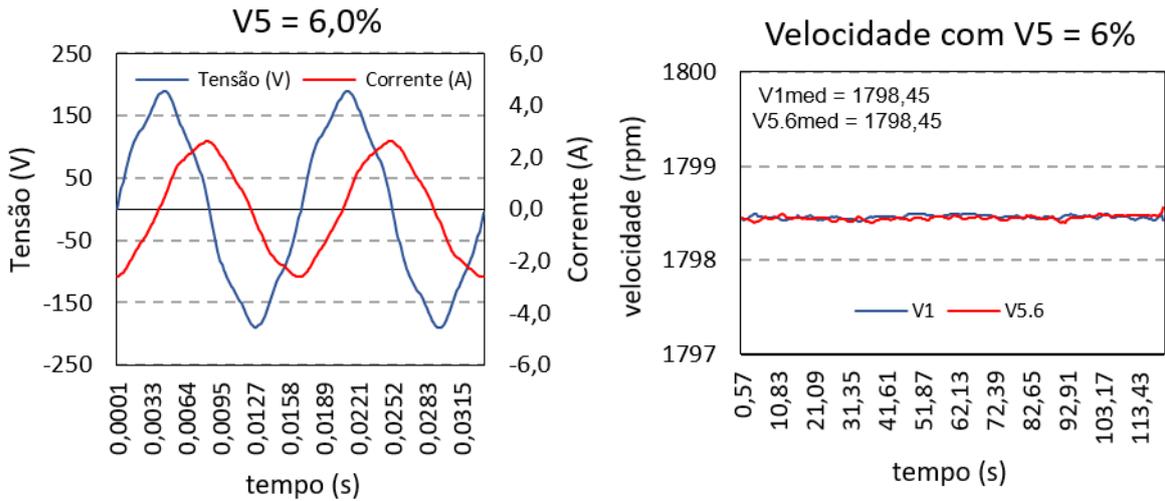


Figura 17 - Teste com 6% de 5ª harmônica

Aplicando 8% de 5ª harmônica tem-se a Figura 18.

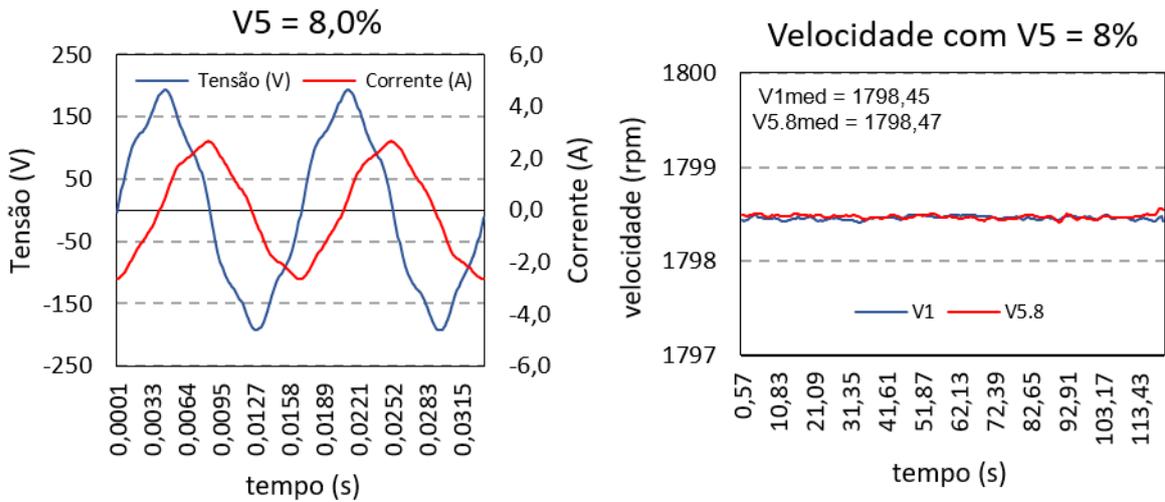


Figura 18 - Teste com 8% de 5ª harmônica

Para uma distorção de 10% de 5ª harmônica tem-se a Fig. 19.

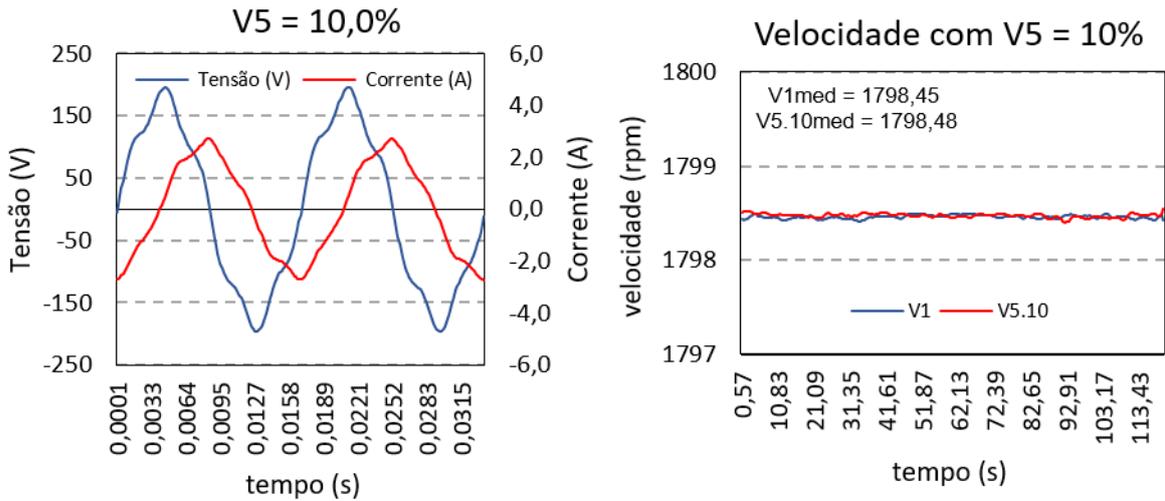


Figura 19 - Teste com 10% de 5ª harmônica

Aplicando nos terminais do motor 12% de 5ª tem-se os resultados mostrados na Fig. 20.

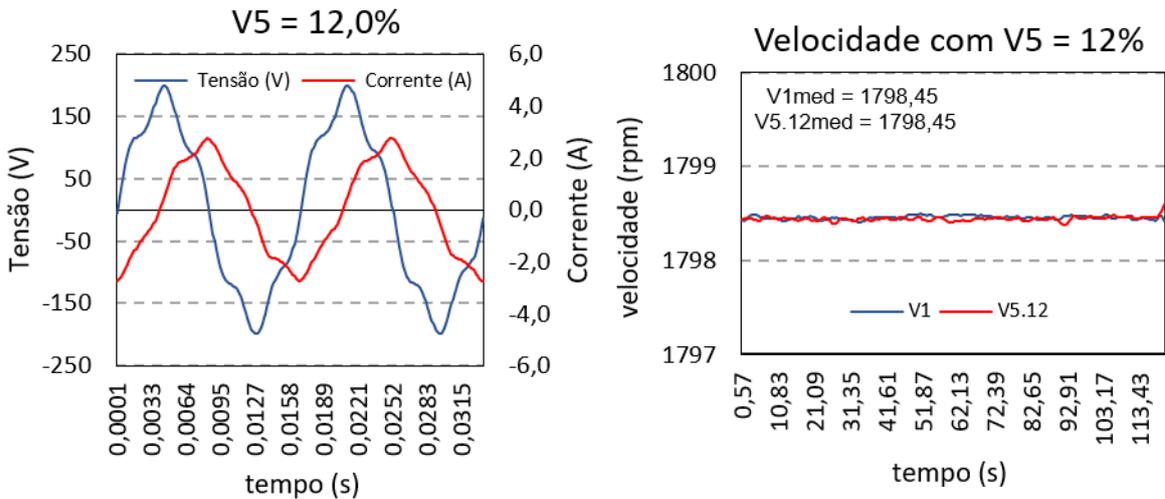


Figura 20 - Teste com 12% de 5ª harmônica

Com 14% de 5ª harmônica obteve-se os resultados mostrados na Fig. 21.

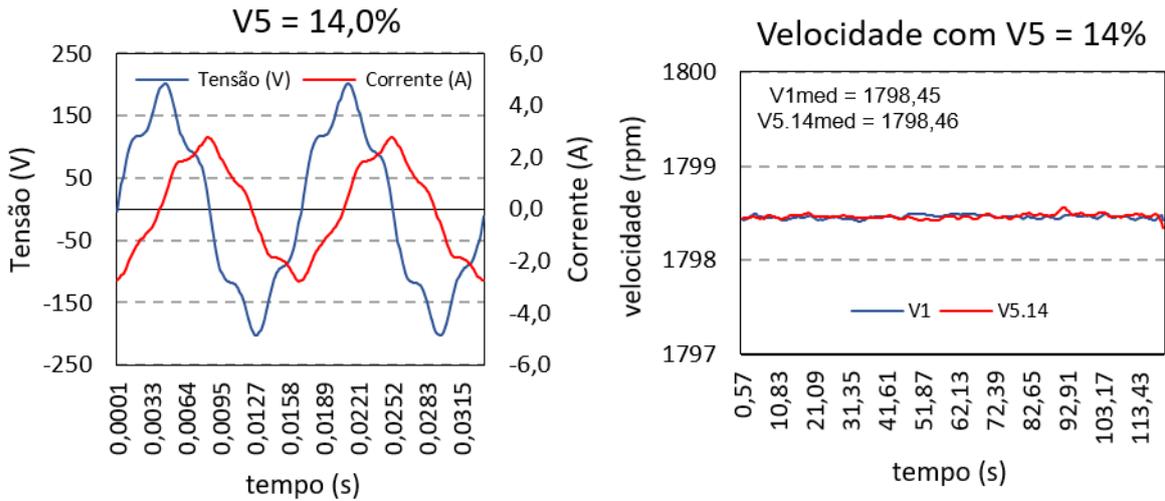


Figura 21 - Teste com 14% de 5ª harmônica

Com 16% de 5ª harmônica obteve-se os resultados mostrados na Fig. 22.

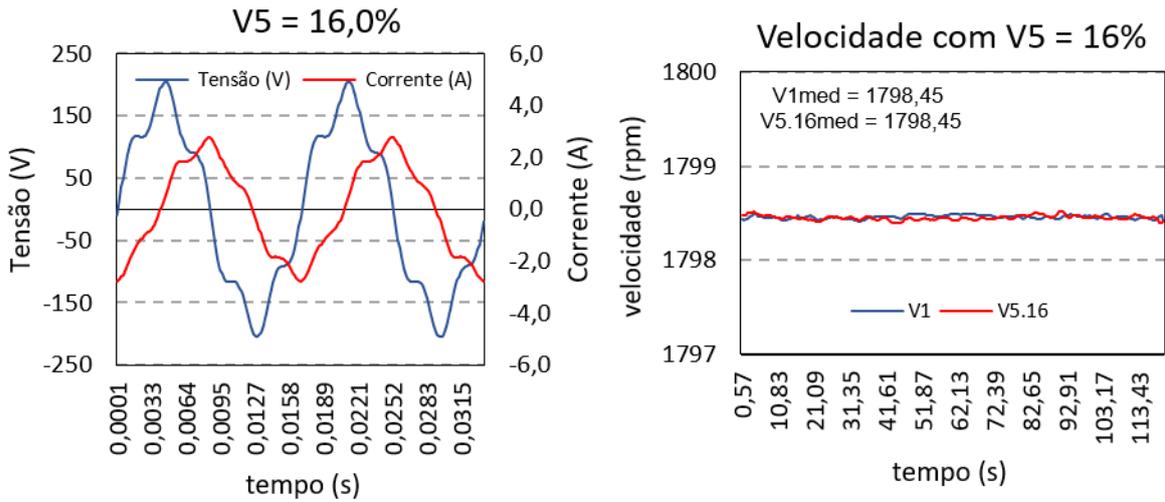


Figura 22 - Teste com 16% de 5ª harmônica

Com 18% de 5ª harmônica tem-se a Fig. 23.

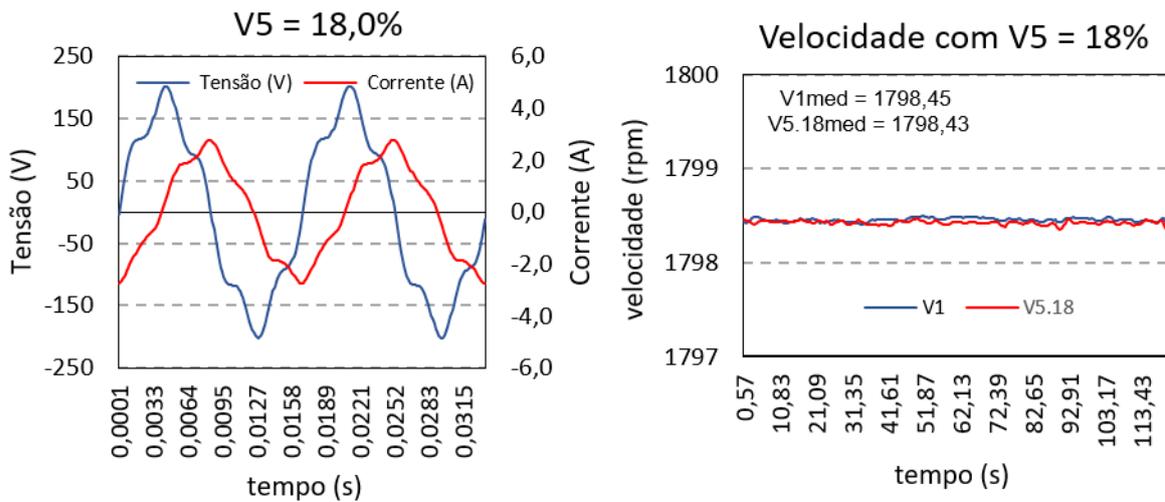


Figura 23 - Teste com 18% de 5ª harmônica

E por fim, quando se aplicou 20% de 5ª harmônica, teve-se como amostra a Fig. 24.

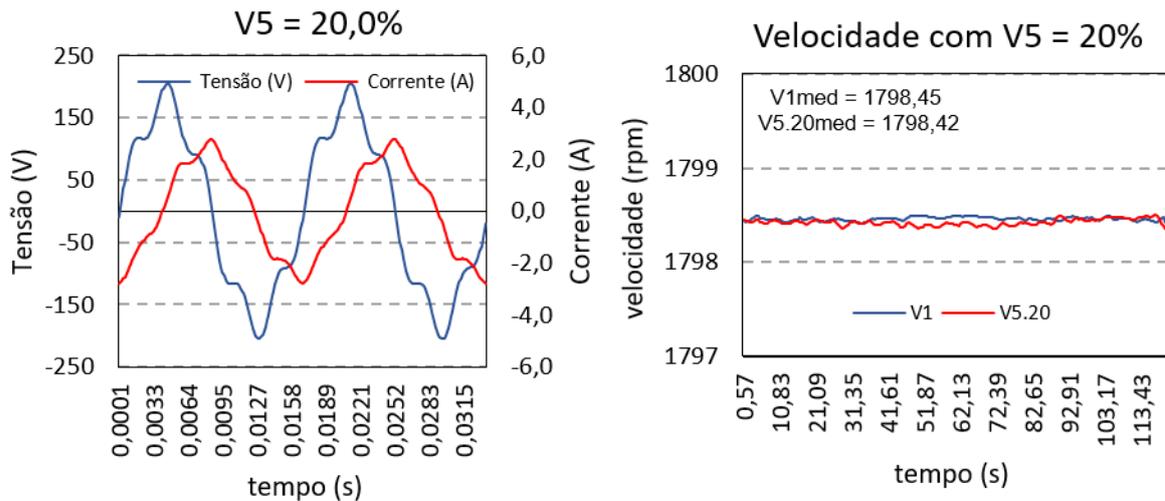


Figura 24 - Teste com 20% de 5ª harmônica

Quando aplicada uma alimentação puramente senoidal no motor de indução, obteve-se uma média da velocidade de 1798,45 rpm no intervalo de 120 segundos, sendo a velocidade mínima medida de 1798,07 rpm e a máxima de 1798,86 rpm. Ao inserir uma 5ª harmônica com amplitude de 2%, tal média foi de 1798,43 rpm e sua variação ficou entre 1798,03 rpm e 1798,83 rpm.

Já com uma amplitude de 4%, a média calculada foi de 1798,44 rpm, estando a medida máxima cravada em 1798 rpm e a máxima em 1798,86 rpm. Para 6% de distorção, teve-se uma média de 1798,45, igual a obtida quando puramente senoidal, estado sua variação entre 1798,02 rpm e 1798,85 rpm.

Além de tais parâmetros obtidos, percebe-se que o espectro da velocidade com distorção seguiu-se o da velocidade quando puramente senoidal. Este fato pode ser observado nas Fig. 15 a 24, onde ao longo dos 120 segundos, as velocidades em ambos os casos possuem valores praticamente iguais.

As médias de todos os testes envolvendo 5ª harmônica, ficaram variando na segunda casa depois da vírgula, e a velocidade mínima medida foi de 1797,94 rpm para uma distorção de 20%, e a velocidade máxima foi de 1798,96 rpm para 10% de distorção. Tais dados estão detalhados de forma mais clara na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados dos testes com 5ª harmônica

rpm	Testes com 5ª harmônica										
	V1	V5.2%	V5.4%	V5.6%	V5.8%	V5.10%	V5.12%	V5.14%	V5.16%	V5.18%	V5.20%
Média	1798,45	1798,44	1798,44	1798,45	1798,47	1798,48	1798,45	1798,46	1798,45	1798,43	1798,42
Máxima	1798,86	1798,83	1798,86	1798,85	1798,89	1798,96	1798,92	1798,94	1798,91	1798,85	1798,91
Mínima	1798,07	1798,03	1798	1798,02	1798,09	1798,04	1798,04	1798,03	1798,06	1798,02	1797,94

Tendo em vista a variação da velocidade, acerca da mudança dos níveis de amplitudes das distorções harmônicas, percebe-se que o aumento da amplitude de 5ª harmônica não influenciou de maneira considerável na velocidade do motor de indução, conforme mostrado no Fig. 25.

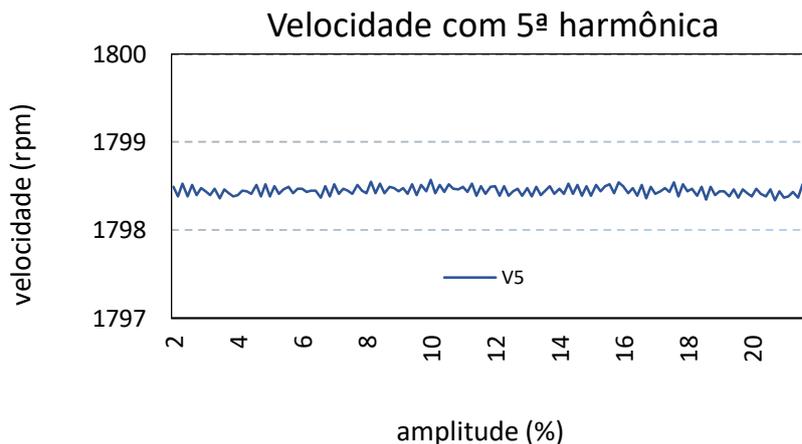


Figura 25 - Variação da velocidade com o aumento da amplitude de 5ª harmônica

#### 4.2.2 Sétima harmônica

Os testes subsequentes, foram aplicando componentes de sequência positiva (7ª harmônica) com amplitudes diferentes, e as velocidades coletadas. Os

procedimentos realizados foram os mesmos que para 5ª harmônica. Os resultados obtidos estão mostrados nas Fig. 26 a 35.

Para uma alimentação do motor com 2% de 7ª harmônica, obteve-se a Fig. 26.

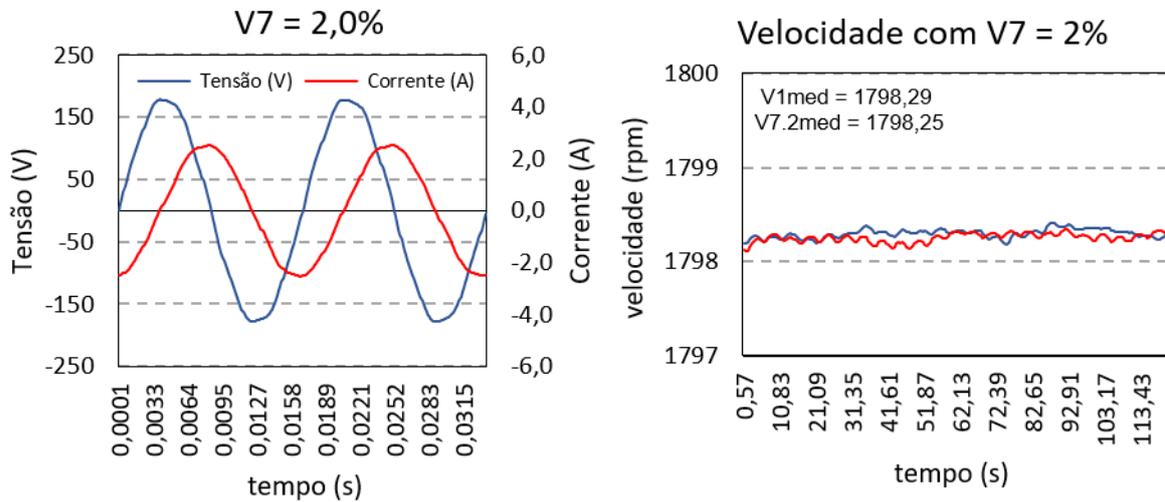


Figura 26 - Teste com 2% de 7ª harmônica

Aplicando-se 4% de 7ª harmônica chegou-se nos dados apresentados na Fig. 27.

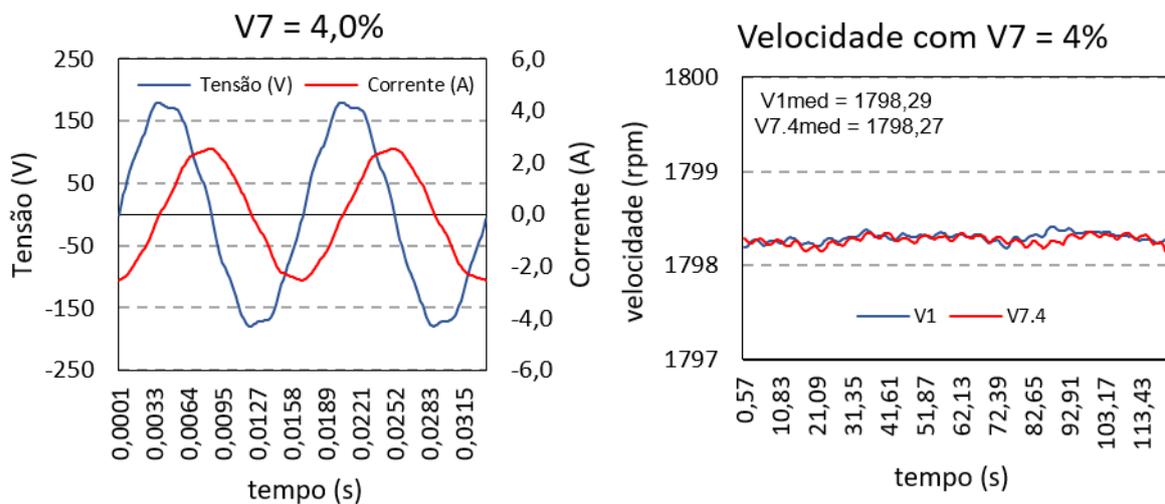


Figura 27 - Teste com 4% de 7ª harmônica

Quando se tem uma aplicação de 6% de 7ª harmônica obteve-se os resultados apresentados na Fig. 28.

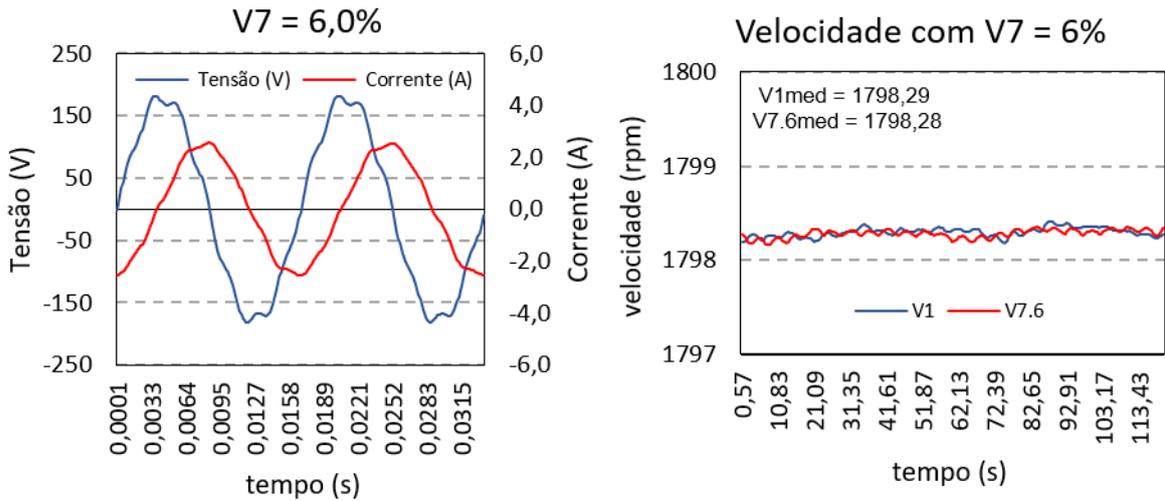


Figura 28 - Teste com 6% de 7ª harmônica

Com 8% de 7ª harmônica já se obteve o panorama da Fig. 29.

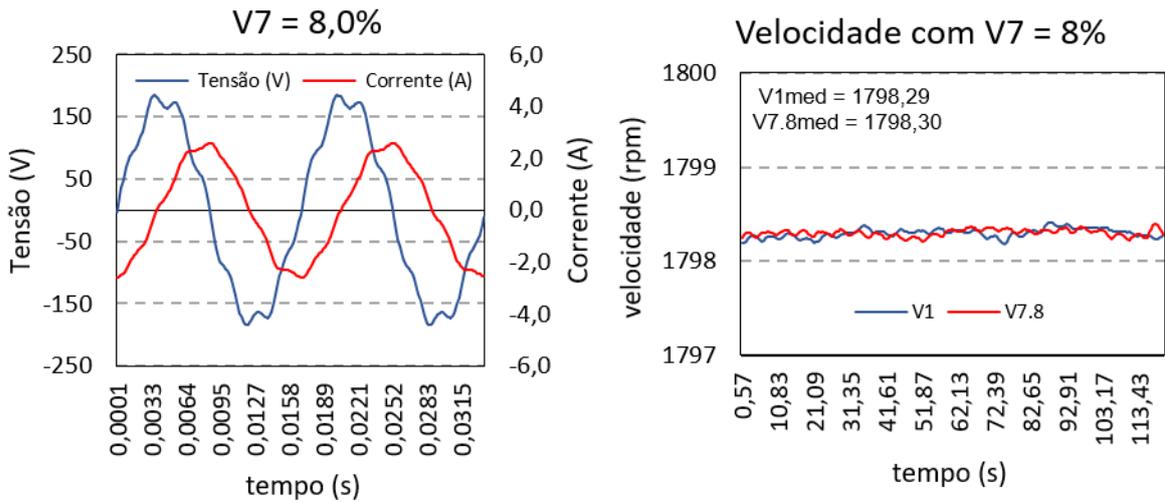


Figura 29 - Teste com 8% de 7ª harmônica

Tendo em vista uma distorção de 10% de 7ª harmônica chegou-se nos dados da figura abaixo.

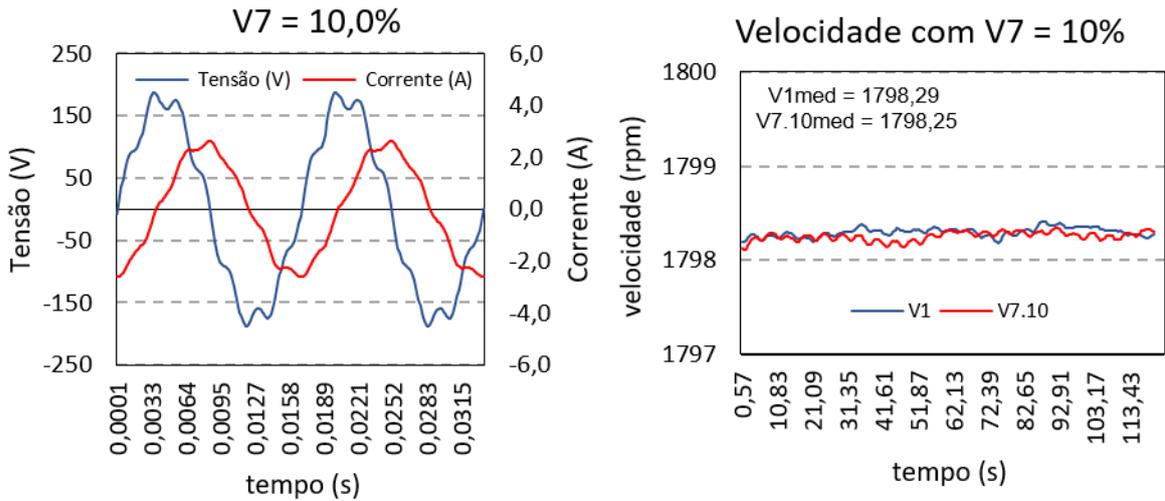


Figura 30 - Teste com 10% de 7ª harmônica

Para uma alimentação do motor de 12% de 7ª harmônica obteve-se os dados da Fig. 31.

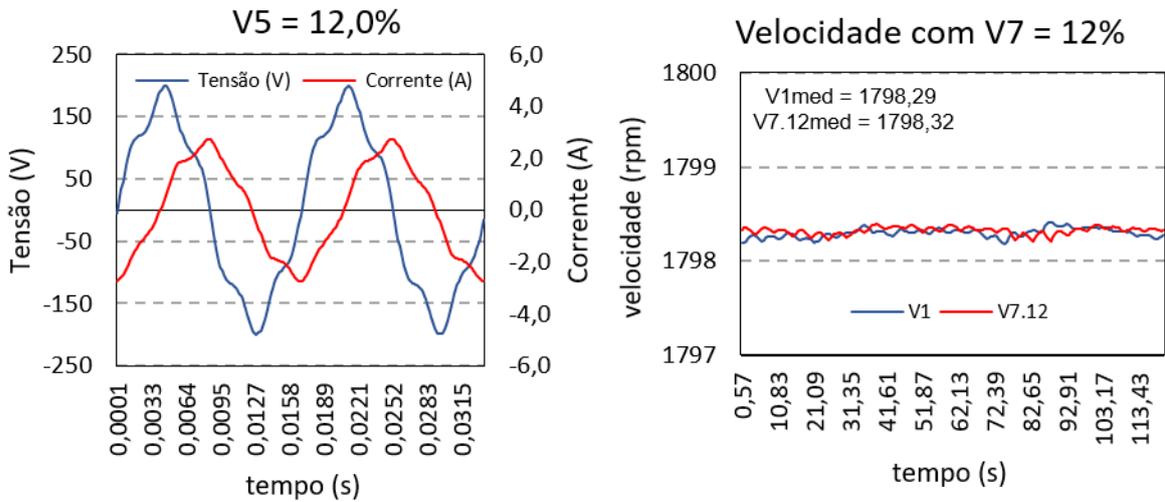


Figura 31 - Teste com 12% de 7ª harmônica

Incrementando a amplitude da 7ª harmônica para 14% chegou-se na Fig. 32.

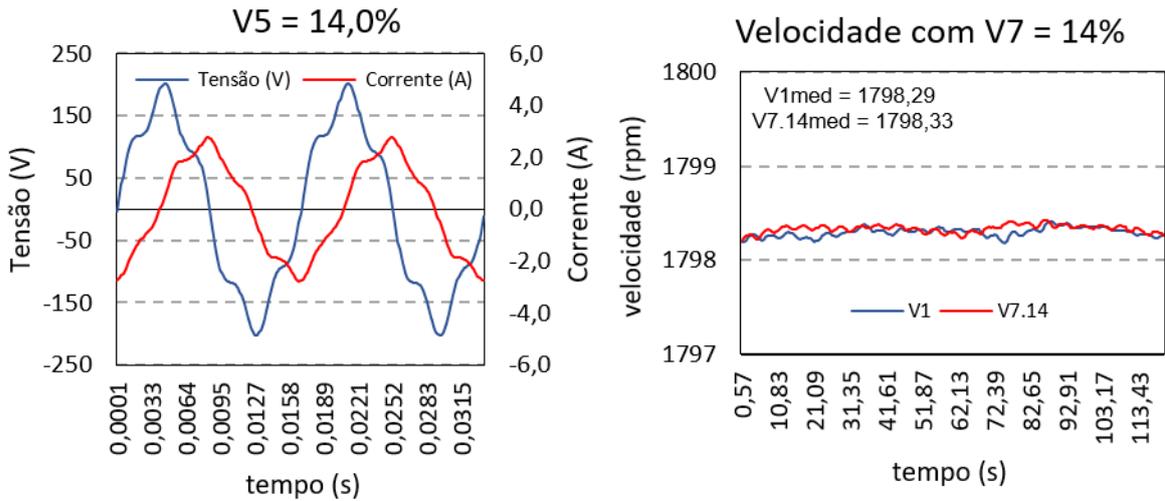


Figura 32 - Teste com 14% de 7ª harmônica

No âmbito ainda da 7ª harmônica, aplicou-se 16%.

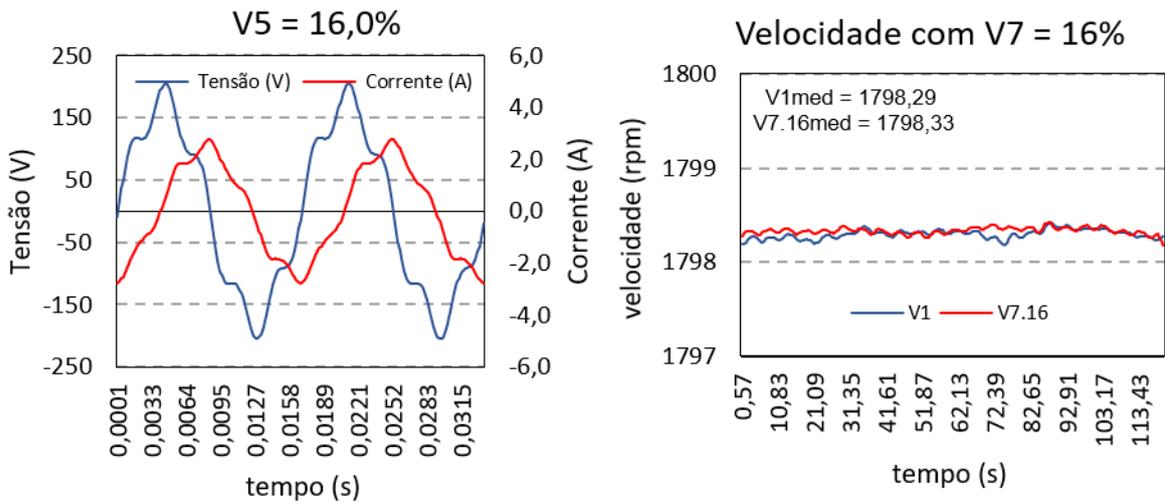


Figura 33 - Teste com 16% de 7ª harmônica

Ainda com 7ª harmônica, foi aplicado 18%, como mostrado na Fig. 34.

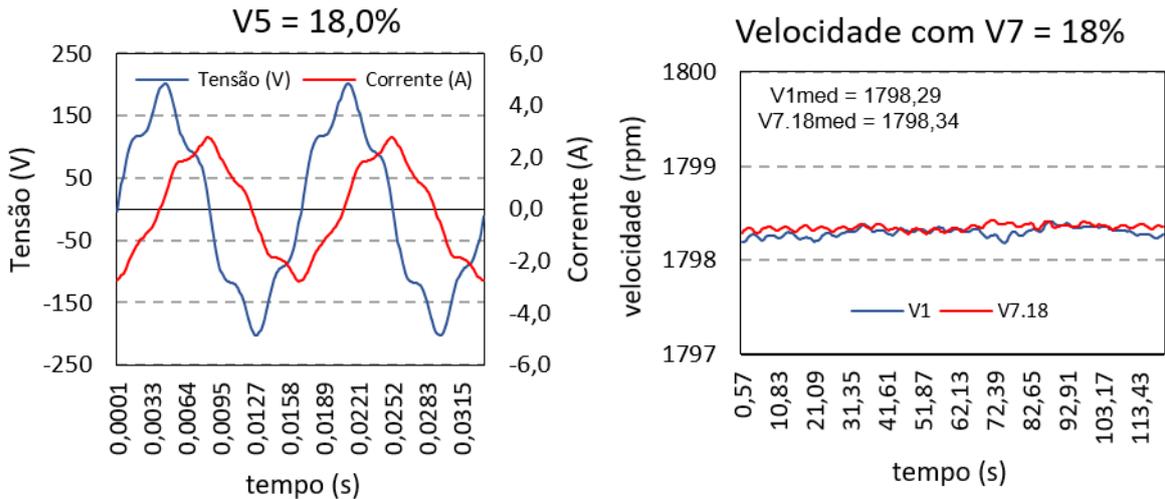


Figura 34 - Teste com 18% de 7ª harmônica

Por fim, aplicou-se 20% de distorção de 7ª harmônica.

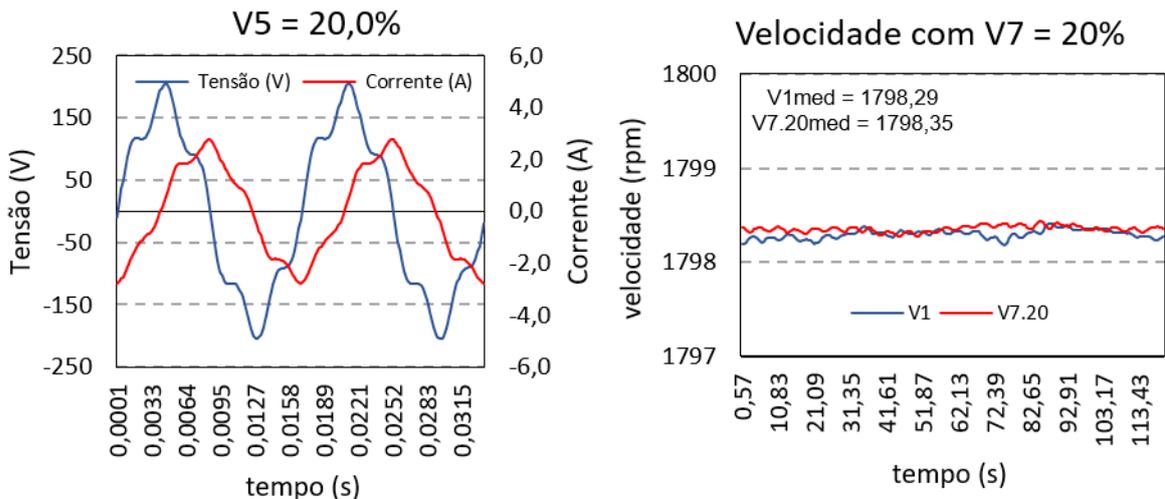


Figura 35 - Teste com 20% de 7ª harmônica

Observando os resultados coletados, vê-se que a média que mais se distanciou da fundamental foi a com amplitude de 20%, cujo valor foi de 1798,35 rpm. Além de que, a velocidade máxima alcançada no intervalo de 120 segundos, foi de 1798,78 rpm, cuja amplitude de tensão aplicada na fonte, foi de 20% de 7ª harmônica. Tendo em vista a mínima obtida, tem-se uma velocidade de 1797,7 rpm quando aplicada uma amplitude, de 7ª harmônica, de 8%. Tais dados estão detalhados de forma mais clara na Tabela 9.

Em tal teste, percebe-se que ao se aplicar uma componente de sequência positiva a velocidade média não obteve grandes variações, diferenciando-se apenas na primeira casa depois da virgula.

Tabela 9 - Dados dos testes com 7ª harmônica

rpm	Testes para 7ª harmônica										
	V1	V7.2%	V7.4%	V7.6%	V7.8%	V7.10%	V7.12%	V7.14%	V7.16%	V7.18%	V7.20%
Média	1798,29	1798,25	1798,27	1798,28	1798,30	1798,25	1798,32	1798,33	1798,33	1798,34	1798,35
Máxima	1798,75	1798,63	1798,72	1798,68	1798,7	1798,63	1798,72	1798,72	1798,76	1798,75	1798,78
Mínima	1797,79	1797,76	1797,76	1797,79	1797,7	1797,76	1797,77	1797,83	1797,86	1797,86	1797,91

Tendo em vista a variação da velocidade, em uma perspectiva da mudança dos níveis de amplitudes das distorções harmônicas, percebe-se que o aumento da amplitude de 7ª harmônica não influenciou de maneira considerável na velocidade do motor de indução, pois, tal oscilação se deu apenas na primeira casa decimal, conforme mostrado no Fig. 36.

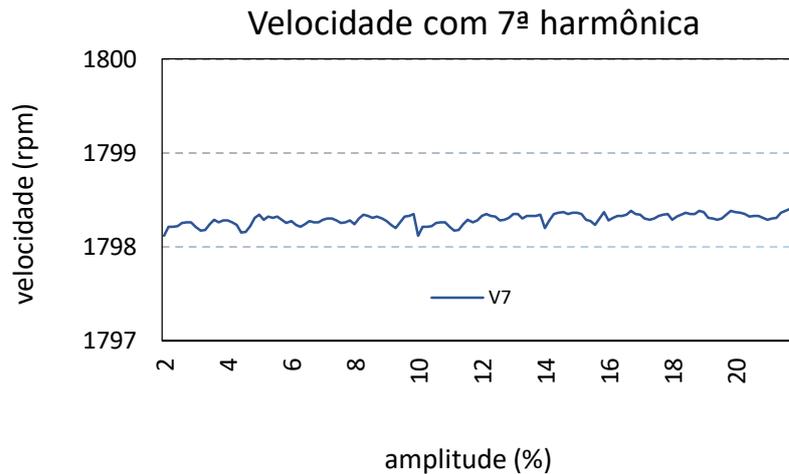


Figura 36 - Variação da velocidade com o aumento da amplitude de 7ª harmônica

#### 4.2.3 Quinta e Sétima harmônica

Os testes foram expandidos para a aplicação de 20% de amplitude, de 5ª e 7ª harmônica, na alimentação do motor de indução. Os dados foram trabalhados e mostrados na Fig. 37.

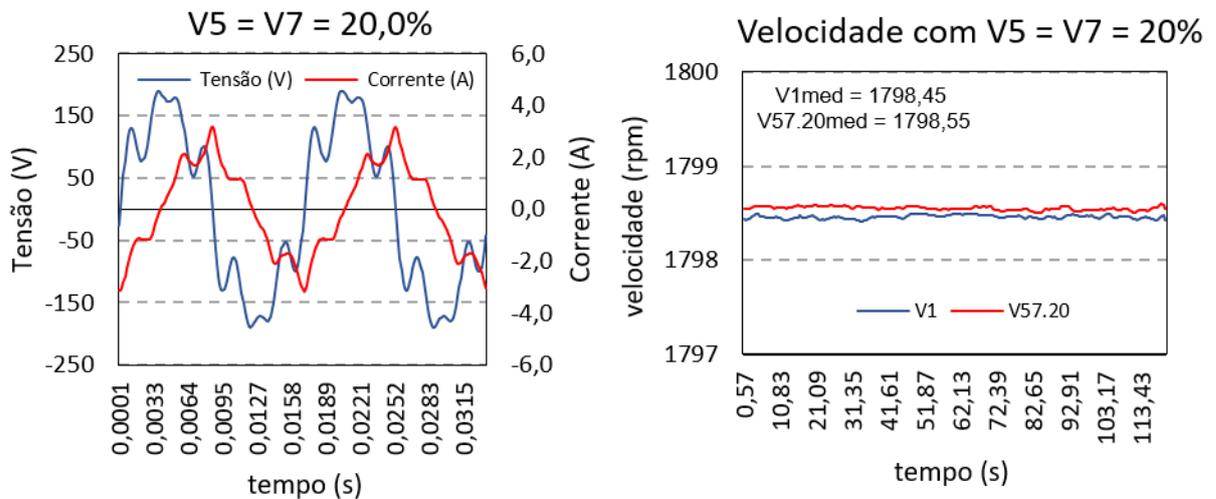


Figura 37 - Teste com 20% de 5ª e 7ª harmônica

Analisando a Fig. 37, percebe-se que a média da velocidade do motor, quando submetido a 20% de 5ª e 7ª harmônica, permaneceu praticamente igual a média puramente senoidal. E o espectro ao longo do tempo ficou um pouco acima, mas pela escala utilizada tal efeito em termos de valores é relativamente baixo.

#### 4.2.4 Terceira, Quinta e Sétima harmônica

Os últimos testes realizados a vazio, baseou-se na introdução de 20% de 3ª, 5ª e 7ª harmônica na alimentação do motor. Os dados seguem mostrados na Fig. 38.

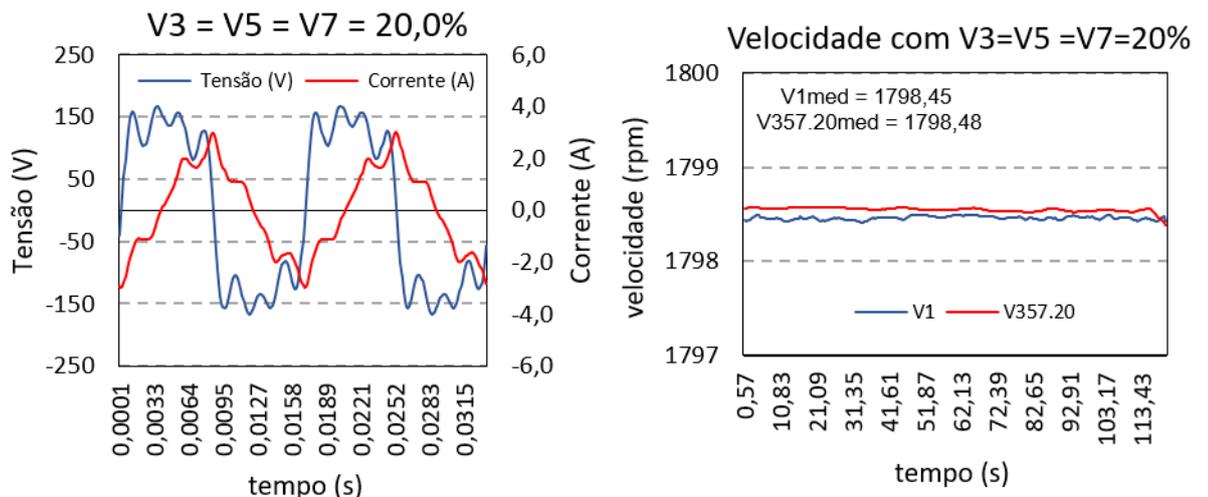


Figura 38 - Teste com 20% de 3ª, 5ª e 7ª harmônica

Através da figura acima, constata-se que mesmo quando se aplica componentes de sequência positiva, negativa e zero, a velocidade permaneceu com

o mesmo perfil, ou seja, oscilando entre 1798 e 1799 rpm. Ressaltando que com a escala utilizada, tal variação é em baixos valores.

## 5 CONCLUSÃO

Os motores são cargas comuns em diversos tipos de trabalhos, sejam eles industriais, fabris, e até mesmo residencial. Sendo de grande importância o entendimento de seu funcionamento, assim como os efeitos provocados pela rede.

Com isso, no presente trabalho ao realizar 23 testes e coletar a velocidade dos motores de indução pôde-se fazer um estudo dos dados e analisar seu comportamento.

Contudo, percebeu-se que quando se aplicou uma componente harmônica de sequência negativa, no caso 5ª harmônica (sistema equilibrado), a velocidade não diminuiu, fato defendido por muitas literaturas. Nesta etapa do experimento, ao se fazer a média móvel chegou-se em resultados ao longo do tempo muito semelhantes, ou seja, resultados variando apenas depois da vírgula.

No momento em que se aplicou uma componente harmônica de sequência positiva, no caso 7ª harmônica (sistema equilibrado), o motor não acelerou, ou seja, não alcançou velocidades maiores.

Sendo assim, as componentes harmônicas não provocam alterações na velocidade dos motores de indução, sendo provocado como efeito o aumento de temperatura nos enrolamentos, devido ao efeito skin, gerando assim maiores perdes e diminuição do tempo de vida útil.

## 6 BIBLIOGRAGIA

- [1] DAS, J. C. **Power Systems and Passives Filter Design**, New Jersey, IEEE Press, 2015.
- [2] SANKARAN, C. **Power Quality**, CRC Press, 2002.
- [3] FUCKS, E. F. **Power Quality in Electrical Machines and Power Systems**, AP, Março, 2008.
- [4] EPRI Power Electronics Applications Center, **Matching Utilization Voltages to Motor Nameplates**, Power quality testing network PQTN Application no. 12, 1997.
- [5] Alwash J. H. H., Ikhwan S. H., **Generalised Approach to the Analysis of Asymmetrical Three-Phase Induction Motors**, IEE Proceedings Electric Power Applications, Volume: 142, Issue: 2, p. 87-96, March 1995.
- [6] Annette V. J, Basudeb B., **Assessment of Votage Unbalance**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, October 2000.
- [7] Dugan, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality** 2 ed. Disponível em: <<https://accessengineeringlibrary.com/>>. Acesso em: 22 fev. 2018
- [7] DUGAN R.C, **Electrical Power Systems Quality**, Second Edition, 2004.
- [8] Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, ANEEL, 2018.
- [9] ROCHA J. E, **Qualidade da Energia Elétrica**.
- [10] POMILIO J. A, DECKMANN S. M, **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2018.

[11] OLIVEIRA J. C, DELAIBA A. C, **Qualidade da Energia Elétrica**, Abril, 2002.

[12] TEIXEIRA D. A, **Análise das Distorções Harmônicas – Estudo de caso de um Sistema Industrial**. Disponível em:

<<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/308M.PDF>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

[13] EMANUEL A. E, **Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow**, IEEE Press, 2010.

## 7 Apêndice

### Apêndice A - Tacômetro Digital com Memória de Massa

#### A.1 Inspiração

O sensor foi criado com o intuito de obter a medição das rotações por minuto com memória de massa dos motores de indução. A necessidade surgiu diante de experimentos realizados no laboratório e, por consequência, a observância na falta de equipamentos sensoriais que visam a formação de memória de massa. Na construção do sensor foram utilizados materiais acessíveis e de desempenho suficiente para manter a qualidade do sensor.

Nos tópicos seguintes são mostrados a montagem física do sensor, assim como os experimentos laboratoriais nos quais ele foi submetido durante a fase de testes. O sensor foi desenvolvido por alunos da Universidade Federal de Uberlândia e está disponível no laboratório de Distribuição de Energia Elétrica.

#### A.2 Montagem Laboratorial

Em um primeiro instante, realizou-se a montagem do sensor infravermelho TCRT5000 junto ao arduino UNO, dando início aos primeiros passos do código. O sensor infravermelho tem como característica 5 V<sub>cc</sub> de entrada e possui uma corrente máxima de 60mA.

Após o desenvolvimento inicial do código, onde se aplicou as funções pertinentes para a captação do sinal do sensor, assim como, o desenvolvimento da lógica matemática para o cálculo da velocidade em rpm. Após os testes e a validação dos resultados alcançados, foi adicionado o SD Shield que é um componente no qual estabelece uma conexão usando as portas MISO e MOSI (conforme Tab.11), possibilitando a gravação dos dados captados e coletados.

Tabela 10 - Conexões SD

Conexões SD Shield	
Pino SD	Conexão
CS	Pino 4
MOSI	Pino 11
SCK	Pino 13
MISO	Pino 12

GND	GND (placa)
-----	-------------

O próximo passo realizado consistiu na inserção e adequação do código para a interface do LCD. Foi utilizado para essa montagem as portas indicadas na Tab. 12 abaixo, sendo os resultados, que antes eram analisados no serial monitor, transferidos para o LCD. Este possui uma tela de 16x2, alimentação de 5V, e dimensões de 80mm x 36mm x 12mm.

Tabela 11 - Conexões do LCD

<b>Conexões LCD 16x2</b>	
<b>Pino LCD</b>	<b>Conexão</b>
Vss	GND
Vdd	VCC
Vo	Pino central do Potenciômetro
Rs	Pino 10
Rw	GND
E	Pino 9
D0	Não conectado
D1	Não conectado
D2	Não conectado
D3	Não conectado
D4	Pino 8
D5	Pino 7
D6	Pino 5
D7	Pino 6
A	VCC
K	GND

Em meio a tal desenvolvimento, foi inserido dois pushbutton, com o intuito de seleção das opções desejadas, conforme indicado no visor LCD, sendo estes normalmente abertos.

Em um primeiro momento, todo o circuito foi implementado em uma protoboard, conforme mostrado na Fig. 38.

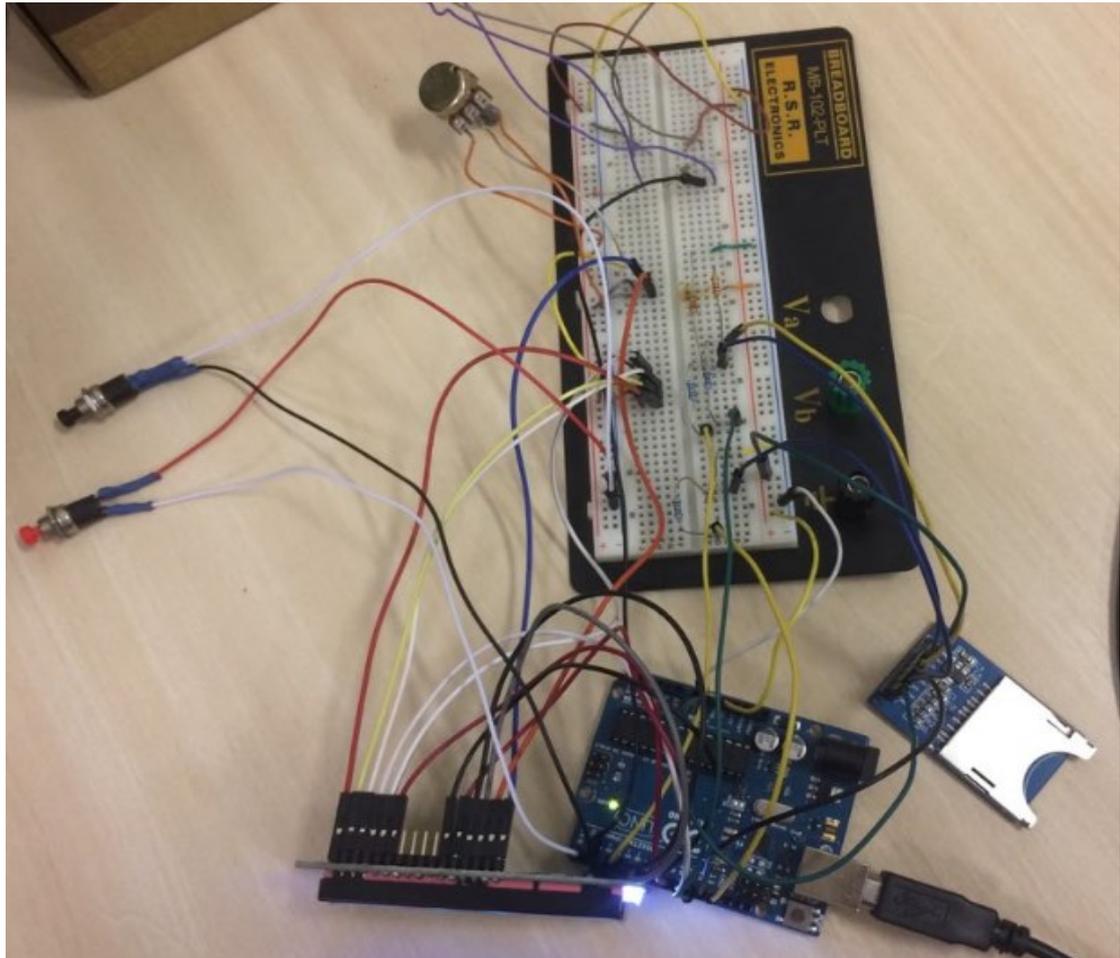


Figura 39 - Montagem Protoboard

Sendo que, após realizada toda a programação e os testes partiu-se para a confecção da placa impressa. Os materiais da protoboard foram soldados na placa e todos os equipamentos, inseridos na caixa do tacômetro digital com memória de massa.

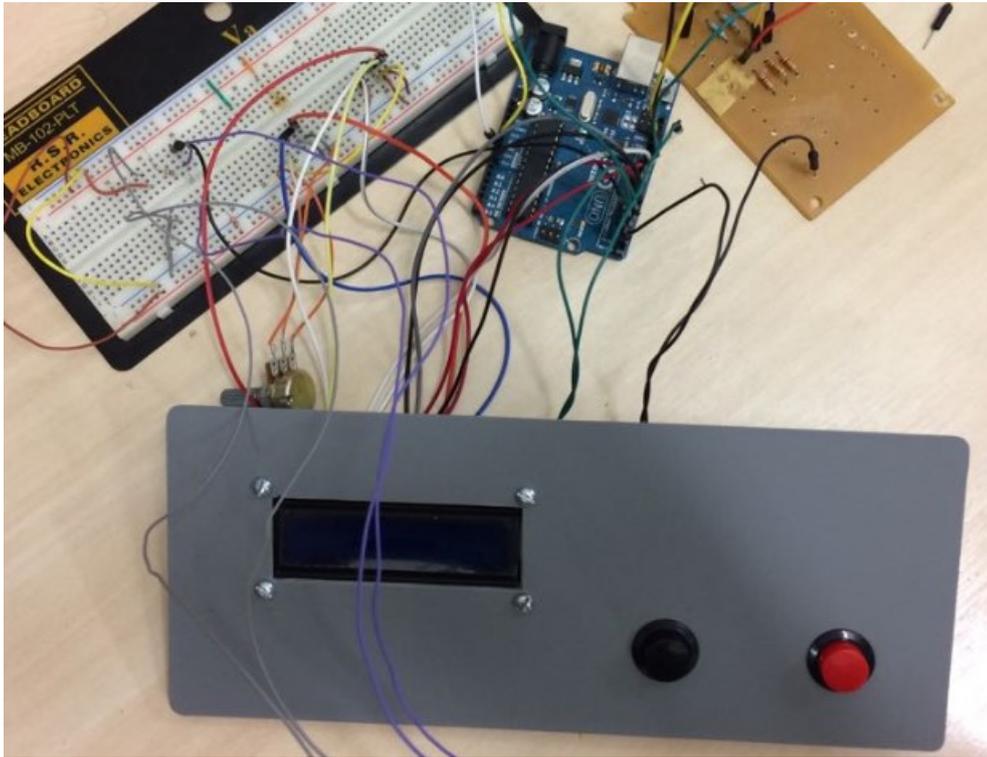


Figura 40 - Montagem do circuito na placa impressa



Figura 41 - Produto Final

Finalizando a confecção do sensor, realizou-se medições para fins de ajuste e validação do projeto desenvolvimento.

### A.3 Esquemáticos

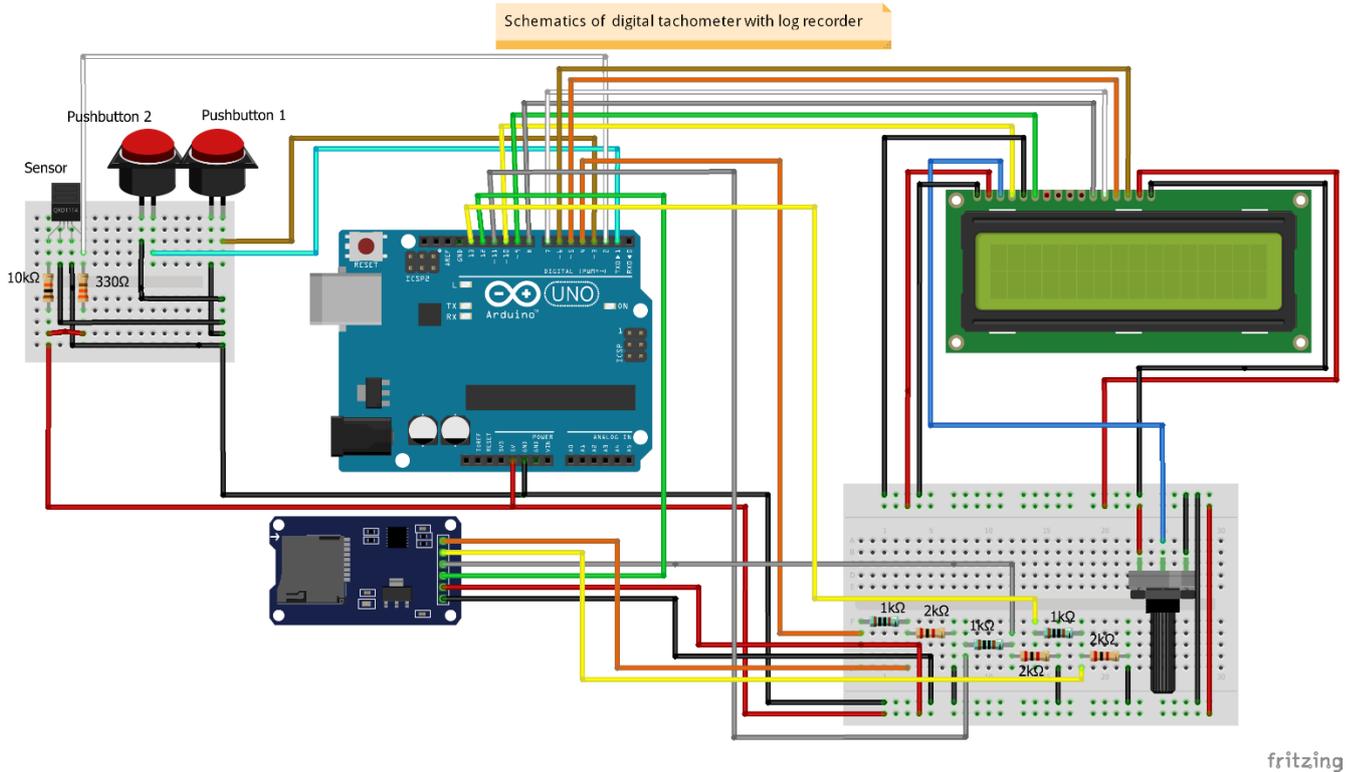


Figura 42 - Esquemático das ligações do projeto

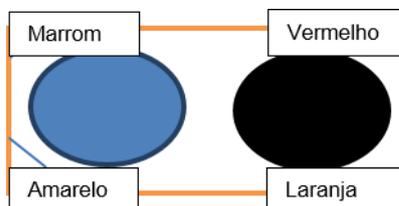


Figura 43 - Esquemático das ligações do sensor

#### A.4 Código do Tacômetro Digital

Visando uma maior interação entre homem e máquina, maior facilidade e praticidade na obtenção dos resultados, implementou-se no projeto algumas funções. Dentre tais funções estão, a opção de possuir ou não memória de massa, e caso a resposta seja positiva, limpar ou não o cartão SD. Segue abaixo o código fonte completo do projeto.

/\* Código de leitor de rotação

\* Desenvolvido no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica

\* O sensor tem como objetivo captar a rotação por minuto do eixo de um

motor

```
* gravando seus dados e calculando sua média.  
* 31/01/2018  
*/
```

```
#include <SD.h>  
#include<SPI.h>  
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
int CS_pin = 4;  
int pow_pin = 8;  
int buttonPin = 3;  
int buttonPin2 = 1;
```

```
LiquidCrystal lcd(10, 9, 8, 7, 5, 6); //Define os pinos que serão utilizados para  
ligação ao display
```

```
int pino = 2;  
int pulsos;  
int button1 = 1;  
int button2 =1;  
unsigned long r;  
unsigned long tempo1;  
unsigned long tempo2;  
float rpm;  
float cont;  
float soma;  
float rpm_medio;
```

```
// Conta o número de pulsos durante a rotação do motor  
void contagem () {
```

```
pulsos++;
```

```
}

// Deleta os arquivos existentes no cartao SD
void deletarfiles(){

    button1 = 1;
    button2 = 1;
    lcd.clear(); //Limpa a tela
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Delete all files? ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("1-YES 2-NO?");
    delay(1000);

    while (button1 == 1 && button2 == 1){

        button1 = digitalRead(buttonPin);
        button2 = digitalRead(buttonPin2);

        if(button1 == 0){

            SD.remove("RPM.txt");
            SD.remove("MEDIA.txt");

        }

        if(button2 == 0){

            button2 = 0;
        }

    }
    button2 = 1;
```

```
button1 = 0;

}

// Quando pressionado o botao 1, cria os arquivos e começa a copiar os
dados
void entrarbotao1(){

if ( pulsos == 2) {
    tempo1 = micros();
    delay(200);
}

if ( pulsos == 17) {
    tempo2 = micros();
    detachInterrupt(0);    // Para a função attachInterrupt e começa a calcular
    rpm = (60000000.0000 /(tempo2 - tempo1))*15.00;

    lcd.clear(); //Limpa a tela
    lcd.setCursor(0, 0); // Coloca o cursor no espaço especificado
    lcd.print("RPMi = ");
    lcd.print(rpm,3);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("RPMag = ");
    lcd.print(rpm_medio,3);

    File dataRpm = SD.open("RPM.txt", FILE_WRITE); // Cria o arquivo RPM.txt
    dataRpm.println(rpm);
    dataRpm.close();

    cont++;
    pulsos = 0;
    tempo1 = 0;
    tempo2 = 0;
```

```

    if (cont < 10){
        soma = soma + rpm;
    }

    if (cont == 10){
        File dataMedia = SD.open("MEDIA.txt", FILE_WRITE);
        rpm_medio = (soma + rpm)/(cont);
        dataMedia.println(rpm_medio);
        dataMedia.close();

        soma = 0;
        cont = 0;
    }
    attachInterrupt(0, contagem, FALLING); // Inicia a função para captar os
pulsos
}

}

// Quando pressionado o botao 2, apenas começa a ler os dados
void entrarbotao2(){

    if ( pulsos == 2) {
        tempo1 = micros();
        delay(200);
    }
    if ( pulsos == 17) {
        tempo2 = micros();
        detachInterrupt(0);
        rpm = (60000000.0000 /(tempo2 - tempo1))*15.0000;

        lcd.clear(); //Limpa a tela
        lcd.setCursor(0, 0);

```

```
lcd.print("RPMi = ");
lcd.print(rpm,3);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("RPMag = ");
lcd.print(rpm_medio,3);

cont++;
pulsos = 0;
tempo1 = 0;
tempo2 = 0;
attachInterrupt(0, contagem, RISING);

if (cont < 10){

    soma = soma + rpm;
}

if (cont == 10){
    rpm_medio = (soma + rpm)/cont;

    soma = 0;
    cont = 0;
}
}

if ( pulsos > 18) {

    pulsos =0;
    tempo1 = 0;
    tempo2 = 0;
    cont = 0;
}

}
```

```
void setup() {

  Serial.end(); // Necessario para uso das portas digitais 0 e 1
  lcd.begin(16, 2); //Define o número de colunas e linhas do LCD

  pinMode(CS_pin,OUTPUT); // Ativa o pino 4 necessario para o uso do SD
shield
  digitalWrite(CS_pin,HIGH);
  pinMode(pow_pin,OUTPUT); // Ativa o pino 8 necessario para o uso do SD
shield
  digitalWrite(pow_pin,HIGH);
  pinMode(10,OUTPUT);
  pinMode(buttonPin,INPUT_PULLUP); // Funcao pullup utiliza o resistor
interno do arduino
  pinMode(buttonPin2,INPUT_PULLUP);
  pinMode(pino, INPUT);

  lcd.clear(); //Limpa a tela
  lcd.setCursor(2, 0);
  lcd.print("Developed by");
  lcd.setCursor(5, 1);
  lcd.print("LADEE");
  delay(3000); // posso colocar delay aqui? sim

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("1- Log Recording");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("2- Display");

  while (button1 == 1 && button2 == 1){
```

```
button1 = digitalRead(buttonPin);  
button2 = digitalRead(buttonPin2);
```

```
if (button1 == 0){
```

```
    button1 = 0;
```

```
    while(!SD.begin(CS_pin))
```

```
    {
```

```
        lcd.clear(); //Limpa a tela
```

```
        lcd.setCursor(0, 0);
```

```
        lcd.print("Card Failed");
```

```
        //Serial.println("Card Failed");
```

```
        digitalWrite(6,HIGH);
```

```
        delay(2000);
```

```
        lcd.clear(); //Limpa a tela
```

```
        lcd.setCursor(5, 0);
```

```
        lcd.print("Error");
```

```
        lcd.setCursor(1, 1);
```

```
        lcd.print("Reinsert card.");
```

```
    }
```

```
        lcd.clear(); //Limpa a tela
```

```
        lcd.setCursor(0, 0);
```

```
        lcd.print("Card Ready");
```

```
        deletarfiles();
```

```
    }
```

```
if( button2 == 0) {
```

```
        button2 = 0;

    }

}

lcd.clear(); //Limpa a tela
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Initializing...");

pulsos = 0;
tempo1 = 0;
tempo2 = 0;
cont = 0;
soma = 0;
rpm_medio = 0;

attachInterrupt(0, contagem, FALLING); // Funcao que capta a subida de um
pulso
}

// É importante saber que o button1 é normalmente aberto, enquanto que o
button2 é normalmente fechado. Portanto, sem pressionar, button1 = 1 e button2 = 0
void loop() {

    if(button2 == 0){
        entrarbotao2();

    }

    if(button1 == 0){
```

```
entrarbotao1();  
}
```