



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CAMPUS ALEGRETE

IVANDRO TOSCANI CAVALHEIRO

**ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS GERADAS PELO ACIONAMENTO  
DE UM MOTOR ELÉTRICO ATRAVÉS DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

ALEGRETE  
2014

IVANDRO TOSCANI CAVALHEIRO

**ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS GERADAS PELO ACIONAMENTO  
DE UM MOTOR ELÉTRICO ATRAVÉS DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa – UNIPANPA como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jumar Luís Russi.

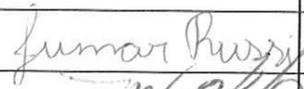
ALEGRETE  
2014

**Autoria:** Ivandro Toscani Cavalheiro

**Título:** Análise das Distorções Harmônicas Geradas pelo Acionamento de um Motor Elétrico Através de um Inversor de Frequência

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como parte das atividades para  
a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	Jumar Luís Russi	Prof. Dr.		unipampa
2	José Wagner Maciel Kaehler	Prof. Dr.		unipampa
3	Diego Berlezi Ramos	Prof. Dr.		unipampa

**Data da aprovação:** 25 de março de 2014.

Aos meus pais, Ivo e Evani, pelo apoio, carinho e amor, que sempre me foi dado, além da paciência que sempre precisaram ter comigo. A Danise, namorada, esposa, companheira, amiga, conselheira e que em todas as horas esteve presente e muito me ajudou. Ao meu filho amado, Miguel, que veio iluminar a minha vida. A minha irmã Ivana e ao meu cunhado Marco pelos auxílios dados quando precisei, e pelo companheirismo.

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço ao Prof. Dr. Jumar Russi, pela orientação, ensinamentos e apoio para que fosse possível a realização deste trabalho.*

*Ao Cleiton Lucatel, do Laboratório de Eletrotécnica, pelo apoio e incentivo prestados para a realização do trabalho.*

*A todos os colegas pelo companheirismo durante todo o curso.*

*Ao Carlitos Tevez, também conhecido como Carlos Vinicius Machado Silva, pelos vários dias de estudo que nos renderam uma grande amizade e um grande aprendizado mútuo.*

*E a todas as pessoas que de uma forma, ou outra, participaram desta caminhada comigo.*

## RESUMO

Atualmente o uso dos inversores de frequência para acionamento de máquinas de indução trifásica, no ambiente industrial, é amplamente difundido. Contudo o inversor de frequência, geralmente, em sua topologia possui no estágio de entrada um retificador que, conforme sua operação pode vir a afetar a qualidade da energia elétrica. Neste trabalho será avaliado um inversor de frequência que acionará um motor elétrico trifásico, com o objetivo de analisar os distúrbios que este acionamento gera na rede elétrica. Neste caso, o distúrbio causado será a distorção harmônica, que é justamente gerada por cargas não lineares presentes no sistema elétrico que é o inversor de frequência. Com a coleta e análise dos dados, buscaram-se soluções para amenizar ou até eliminar a distorção da rede elétrica, que poderá ser um filtro harmônico dependendo dos dados que serão coletados.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica. Inversor de frequência. Harmônicos.

## ABSTRACT

Currently the use of frequency inverters for driving three-phase induction machines in the industrial environment is widespread. However, the drive, usually present as the input stage rectifier whose operation is likely to affect the electric power quality. In this work a frequency inverter that feeds a three-phase electric motor is modelled aiming to analyze the disturbances that it generates on the grid. In this case, the disturbances caused is the generation of harmonic distortion, which is generated by nonlinear loads. From the data collection and analysis, some solutions to reduce or even eliminate the distortion of the grid, which may be a harmonic filter depending on the data to be collected.

Keywords: Quality of electric energy. Frequency inverter. Harmonics.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS .....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 TRABALHOS RELACIONADOS ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....	14
3.2 NORMAS MAIS IMPORTANTES QUE REGULAMENTAM AS HARMÔNICAS.....	15
3.2.1 Prodist – módulo 8 – qualidade de energia elétrica.....	15
3.2.2 IEC 61000-3-2.....	18
3.2.3 IEC 61000-3-4.....	19
3.2.4 IEEE 519 .....	22
3.3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .....	24
3.3.1 Fenômenos elétricos transitórios.....	25
3.3.2 Transitórios impulsivos .....	26
3.3.3 Transitórios oscilatórios .....	26
3.3.4 Variações de tensão de curta duração.....	27
3.3.5 Interrupção .....	28
3.3.6 Afundamento de tensão.....	29
3.3.7 Elevação de tensão .....	30
3.3.8 Variações de tensão de longa duração.....	31
3.3.9 Interrupções sustentadas.....	31
3.3.10 Afundamentos de tensão sustentados.....	31
3.3.11 Elevações de tensão sustentadas.....	32
3.3.12 Desequilíbrios de tensão.....	32
3.3.13 Distorções na forma de onda.....	33
3.3.14 Nível de corrente contínua .....	34
3.3.15 Flutuações ou oscilações de tensão .....	36
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS HARMÔNICOS.....	36
3.4.1 Harmônicos .....	36
3.4.2 Efeitos relacionados à presença de harmônicos na rede.....	38
3.4.3 Aquecimentos excessivos.....	38
3.4.4 Disparos de dispositivos de proteção .....	39
3.4.5 Ressonância.....	39
3.4.6 Vibrações e acoplamentos.....	40
3.5 FILTROS.....	40
3.5.1 Filtros ativos.....	40

3.5.2 Filtros passivos .....	41
3.6 INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	42
3.6.1 Retificador.....	43
3.6.2 Retificador não-controlado.....	43
3.6.3 Retificador controlado.....	45
3.6.4 Circuito intermediário .....	46
3.6.5 Inversores fonte de corrente .....	46
3.6.6 Inversor fonte de tensão .....	47
3.6.7 Circuito intermediário com tensão cc variável.....	47
3.6.8 Inversor .....	48
3.6.9 Circuito de controle.....	50
4.1 INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	51
4.2 MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO .....	52
4.3 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .....	53
5 RESULTADOS E ANÁLISES .....	57
5.1 MODELAGEM E ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....	57
5.1.1 Medições do motor atuando a 6 Hz.....	58
5.1.2 Medições do motor atuando a 12 Hz.....	62
5.1.3 Medições do motor atuando a 18 Hz.....	66
5.1.4 Medições do motor atuando a 24 Hz.....	70
5.1.5 Medições do motor atuando a 30 Hz.....	74
5.1.6 Medições do motor atuando a 36 Hz.....	78
5.1.7 Medições do motor atuando a 42 Hz.....	82
5.1.8 Medições do motor atuando a 48 Hz.....	86
5.1.9 Medições do motor atuando a 54 Hz.....	90
5.1.10 Medições do motor atuando a 60 Hz.....	94
5.2 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO SIMULADO.....	98
5.2.1 Modelagem da carga .....	99
5.2.2 Simulações .....	100
5.3 PROJETO DE FILTROS PASSIVOS .....	105
5.3.1 Filtro PASSA-BAIXA para harmônica de 3ª ordem.....	105
5.3.2 Filtro PASSA-BAIXA para harmônica de 5º ordem com filtro em derivação de 3º ordem.....	109
5.3.3 Filtro PASSA-BAIXA de 7º ordem com filtro em derivação para harmônica de 3º e 5º ordem.....	113
5.3.4 Filtro série sintonizado de 3º e 5º ordem.....	116
5.3.5 Filtro série sintonizado para harmônica de 3º, 5º e 7º ordem.....	119

5.3.6 Análise da utilização dos filtros .....	122
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	125
REFERÊNCIAS .....	126

# 1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a qualidade de energia elétrica tornou-se importante para fornecedores e consumidores a partir do fim dos anos 80 devido ao aumento do nível de harmônicos gerado por cargas eletrônicas e também à utilização crescente de sistemas de controle micro processados, resultando em cargas sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade da energia. De certa forma, a utilização de novas tecnologias obrigou fornecedores e consumidores a buscarem uma energia de maior qualidade, ou seja, sem desvios na tensão, corrente ou frequência que resultem na falha ou má operação dos equipamentos dos consumidores.

Existem vários distúrbios que afetam a qualidade da energia. A título de exemplo, destacam-se os transitórios impulsivos e oscilatórios, variações na tensão de curta e longa duração, interrupções, desequilíbrio de tensão, harmônicos, etc. Tais distúrbios são causados são causados por descargas atmosféricas, manobras no sistema, cargas desequilibradas e não lineares, partidas de motores, variações de carga, etc. Estes efeitos podem ter diferentes níveis de impactos dependendo da susceptibilidade do equipamento do usuário final. Para uma dada susceptibilidade do equipamento, o impacto dos distúrbios pode ser minimizado através de proteção contra sobretensões, uso de filtros, etc. Para a escolha da melhor opção se faz necessário um estudo econômico envolvendo custo e benefício, pois a qualidade de energia, depois da segurança pessoal, tem como objetivo principal uma energia de baixo custo.

A avaliação das alternativas de aperfeiçoamento da qualidade da energia é um exercício de economia. Os impactos econômicos das variações na qualidade da energia contra os custos de aperfeiçoamento do desempenho para as diferentes alternativas devem ser avaliados. A melhor escolha dependerá dos custos que o problema implica e dos custos de implementação de cada uma das várias soluções.

A qualidade da energia não considera apenas a variação de tensão em torno do valor nominal, mas também, os números e os tipos de distúrbios que podem afetar os serviços, tais como: variação de frequência, quedas de tensão temporárias, pequenas interrupções de energia, entre outros. Dentro deste contexto, uma das mais importantes fontes de distúrbios que afetam a qualidade da energia são as distorções harmônicas.

Um dos equipamentos que afetam esta qualidade de energia é o inversor de frequência, por ser uma carga não-linear geram na rede elétrica distúrbios que poluem a mesma. Estes equipamentos estão sendo amplamente utilizados tanto na área comercial, residencial e industrial. Por exemplo, nas indústrias é utilizado para controlar a velocidade dos motores na área de produção, nas lavouras é utilizado para controlar a velocidade dos motores responsáveis pela irrigação, entre outras aplicações. Este trabalho tem como foco analisar as distorções harmônicas geradas pelo acionamento de um motor através de um inversor de frequência. A partir destes resultados, será possível propor soluções para atenuar ou eliminar estas distorções através de simulações do circuito proposto na prática.

## 2 OBJETIVOS

O trabalho possui os seguintes objetivos:

- ✓ Analisar as distorções harmônicas geradas pelo acionamento de um motor elétrico com uma carga através de um inversor de frequência;
- ✓ Coletar dados das distorções harmônicas que possibilitem modelar um circuito que represente a carga real;
- ✓ Projetar e simular um filtro harmônico que seja capaz de atenuar as harmônicas de correntes geradas pela carga do motor.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito de distorção harmônica, das principais normas que regulamentam as emissões de harmônicas na rede elétrica e da qualidade de energia com suas principais características e seus distúrbios, objetivos e a contextualização do inversor de frequência e dos filtros ativo e passivo.

#### **3.1 TRABALHOS RELACIONADOS ÀS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Em [24], é apresentado um estudo sobre as distorções harmônicas onde é apresentada a fórmula da distorção harmônica total (THD). Também são analisadas as normas IEEE 519 e IEC 61000 – 3 – 2, através de tabelas dos limites harmônicos determinados pelas normas. O inversor de frequência é abordado, com explicações sobre seu funcionamento. Neste trabalho, foram realizados ensaios em laboratório com dois tipos de inversores de frequência. Uma plataforma de potência Dranetz/BMI foi conectada na entrada dos inversores para que fossem obtidas medições dos inversores operando na condição da rede elétrica. Para análise dos resultados foi utilizado o software Dranview que possibilitou a obtenção dos espectros harmônicos. Em seus resultados conclui-se que, quando o inversor opera a 60 Hz em ambos os ensaios, apenas a terceira harmônica se enquadra na norma IEC 61000 – 3 – 2, já quando o inversor opera a 10 Hz, todas as ordens harmônicas estão em conformidade com a norma em ambos os ensaios.

Em [18], são apresentadas as normas e recomendações IEEE 519/1992 e IEC 61000 – 3 – 2, destacando os limites para as distorções harmônicas de tensão e corrente. Também, é destacado o funcionamento do inversor de frequência. Foram realizados dois testes com dois tipos de inversores de frequência alimentados por uma fonte de tensão 220 V. Após os testes ficou constatado que as harmônicas de corrente não atendem os limites determinados pela IEC 61000 – 3 – 2, porém os índices das harmônicas de tensão atendem os limites estabelecidos pela norma IEEE 519/1992.

## 3.2 NORMAS MAIS IMPORTANTES QUE REGULAMENTAM AS HARMÔNICAS

### 3.2.1 Prodist – módulo 8 – qualidade de energia elétrica

Este documento foi desenvolvido pela ANEEL, com o objetivo de: “estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica – QEE, abordando a qualidade do produto e qualidade do serviço prestado”. Com relação à qualidade do produto, neste módulo é definida a terminologia que caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. Em relação à qualidade do serviço prestado, é estabelecida a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.[5]

Este módulo define distorções harmônicas como: “fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental”. Na Tabela 1 é sintetizada a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência para as distorções harmônicas.

**Tabela 1– Terminologia**

<b>Identificação da Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h$ %
Distorção harmônica total de tensão	DTT %
Tensão harmônica de ordem h	$V_h$
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	Hmax
Ordem harmônica mínima	Hmin
Tensão fundamental medida	$V_1$

Fonte: PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia, ANEEL.

Neste módulo do PRODIST também são determinadas as equações para o cálculo das grandezas  $DIT_h \%$  e  $DTT \%$ , como são mostradas nas Equações 1 e 2.

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$DTT \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª harmônica ( $h_{\min}=25$ ).

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão indicados na Tabela 2 a seguir.

**Tabela 2 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)**

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) %
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Fonte: PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia, ANEEL.

Os valores das distorções harmônicas individuais, que devem ser obedecidos, são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)**

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_N < 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_N \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_N \leq 230\text{kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia, ANEEL.

Como se pode observar este módulo da ANEEL não determina valores para as distorções harmônicas de corrente. Este é um documento ainda em implantação, necessitando de muitos ajustes, principalmente na especificação das normalizações dos parâmetros de qualidade de energia elétrica relacionados às harmônicas.

### 3.2.2 IEC 61000-3-2

A IEC (International Electrotechnical Commission) abrange essencialmente a Europa, mas é uma entidade internacional que gera recomendações técnicas na área de eletricidade. Esta norma estabelece limitações às harmônicas de corrente injetadas na rede pública. Os equipamentos elétricos e eletrônicos que esta norma abrange devem ter uma corrente de até 16 A por fase, conectados a uma rede pública de baixa tensão alternada, de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro entre 220 e 240 V.

Nesta norma, os equipamentos são divididos em quatro classes, que são:

- **Classe A:** equipamentos trifásicos equilibrados ou que não se enquadrem nas demais classes (B, C ou D);
- **Classe B:** ferramentas portáteis;
- **Classe C:** dispositivos de iluminação;
- **Classe D:** computadores pessoais, monitores de vídeo, aparelho de televisão, entre outros.

Na Tabela 4, são mostrados os limites de harmônicos de corrente para cada classe.

Tabela 4 - Limites para harmônicos de corrente

Ordem Harmônica (n)	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente [A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (>75W, <600W) [mA/W]
Harmônicas Ímpares				
3	2,30	3,45	30.FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,115	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 = \frac{15}{n}$	$0,225 = \frac{15}{n}$	3	$3,85/n$
Harmônicas Pares				
2	1,08	1,62	2	
4	0,43	0,645		
6	0,30	0,45		
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 = \frac{8}{n}$	$0,35 = \frac{8}{n}$		

Fonte: IEC 61000-3-2.

FP: Fator de Potência

### 3.2.3 IEC 61000-3-4

Esta norma é aplicada a qualquer equipamento elétrico ou eletrônico que possui uma corrente de entrada maior do que 16 A. Sua tensão de alimentação deve ser menor do que 240 V para equipamentos que sejam monofásicos ou menor que 600 V para equipamentos que sejam trifásicos. Já a frequência nominal, pode ser de 50 ou 60 Hz.

São apresentados, nesta norma, os limites para distorção harmônica em equipamentos cuja potência aparente seja menor ou igual a 33 vezes a potência de curto-circuito da instalação. Esta potência de curto-circuito ( $P_{scc}$ ) é definida como a relação entre a tensão nominal ao quadrado e a impedância de curto-circuito. A Tabela 5 traz os valores dos limites individuais de harmônicos de corrente em relação a fundamental.

**Tabela 5 - Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental**

<b>Componente Harmônico (n)</b>	<b>Harmônico Admissível <math>I_n/I_1</math> %</b>	<b>Componente Harmônico (n)</b>	<b>Harmônico Admissível <math>I_n/I_1</math> %</b>
3	21,6	21	$\leq 0,6$
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	$\leq 0,6$
11	3,1	29	0,7
13	2	31	0,7
15	0,7	$\leq 33$	$\leq 0,6$
17	1,2		
19	1,1	Sempre	$\leq 0,8/n$ ou $\leq 0,6$

Fonte: IEC 61000-3-4.

Caso os limites da Tabela 5 (acima) sejam excedidos pelo equipamento analisado e a potência de curto-circuito permitir, outros limites podem ser aplicados. Se este for monofásico ou trifásico desbalanceado podem-se utilizar os limites da Tabela 6, já para o caso em que este for trifásico equilibrado, utilizam-se os limites da Tabela 7.

**Tabela 6 - Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental**

Mínimo Psce	Fator de distorção harmônica admissível %		Limites individuais de harmônico admissível $I_n/I_1$ %					
	THD	PWHD	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$I_{11}$	$I_{13}$
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Fonte: IEC 61000-3-4.

**Tabela 7 - Limites individuais de harmônicos de corrente para equipamentos trifásicos em % da fundamental.**

Mínimo Psce	Fator de distorção harmônica admissível %		Limites individuais de harmônico admissível $I_n/I_1$ %			
	THD	PWHD	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

Fonte: IEC 61000-3-4.

### 3.2.4 IEEE 519

Esta norma descreve os principais fenômenos causadores da distorção harmônica, indicando métodos de medição e limites de distorção. Os limites que esta norma estabelece são referentes aos valores medidos no ponto de acoplamento comum (PAC). Neste caso não interessa o que ocorre internamente em uma instalação, e, sim, o que é refletido para o exterior, ou seja, para outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Nesta norma, define-se a TDD (Total Demand Distortion) como a distorção harmônica da corrente, em porcentagem da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 min). A medição da TDD deve ser realizada quando o consumo estiver no pico.

Na Tabela 8 são mostrados os limites de distorções harmônicas de corrente no PAC, sendo que os valores de tensão de linha são de 120 V a 69 kV.

**Tabela 8 - Limites de Distorção da Corrente Para Sistemas de Distribuição (120 V a 69 kV)**

<b>Máxima Corrente Harmônica em % da Corrente da Carga</b>						
<b>Ordem Harmônicas Ímpares</b>						
<b><math>I_{CC}/I_0</math></b>	<b>&lt;11</b>	<b><math>11 \leq n &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq n &lt; 23</math></b>	<b><math>23 \leq n &lt; 35</math></b>	<b><math>35 &lt; n</math></b>	<b>TDD (%)</b>
<b>&lt;20</b>	4	2	1,5	0,6	0,3	5
<b>20&lt;50</b>	7	3,5	2,5	1	0,5	8
<b>50&lt;100</b>	10	4,5	4	1,5	0,7	12
<b>100&lt;1000</b>	12	5,5	5	2	1	15
<b>&gt;1000</b>	15	7	6	2,5	1,4	20

Fonte: IEEE 519 – 1992.

$I_{CC}$ : Corrente de curto-circuito máxima (PAC).

$I_0$ : Corrente máxima da carga.

As harmônicas pares são limitadas em 25% do limite das harmônicas ímpares.

Na Tabela 9 são mostrados os limites de distorções harmônicas de corrente no PAC para os valores de tensão de 69 kV a 161 kV.

**Tabela 9 - Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Subdistribuição (69001 V a 161 kV)**

<b>Limites para Harmônicas de Corrente de Cargas Não-lineares no PAC com Outras Cargas</b>						
<b>Ordem Harmônicas Ímpares</b>						
<b><math>I_{cc}/I_o</math></b>	<b>&lt;11</b>	<b><math>11 \leq n &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq n &lt; 23</math></b>	<b><math>23 \leq n &lt; 35</math></b>	<b><math>35 &lt; n</math></b>	<b>TDD (%)</b>
<b>&lt;20</b>	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
<b>20&lt;50</b>	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
<b>50&lt;100</b>	5	2,25	2	0,75	0,35	6
<b>100&lt;1000</b>	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
<b>&gt;1000</b>	4,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Fonte: IEEE 519-1992.

Os valores dos limites de distorção de corrente para sistemas que possuam nível de tensão maior do que 161 kV e sistemas de geração e cogeração isolados são mostrados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>16 kV) e sistemas de geração e cogeração isolados**

$I_{CC}/I_o$	Harmônicas Ímpares					TDD (%)
	$<11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	
$< 50$	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: IEEE 519 – 1992.

Para os valores de distorção de tensão são estabelecidos um limite individual por componente e um limite para a distorção harmônica total. Estes valores são mostrados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Limites de distorção de tensão**

	Distorção individual	THD
69 kV e abaixo	3%	5%
69001 V até 161 kV	1,5%	2,5%
Acima de 161 kV	1%	1,5%

Fonte: IEEE 519–1992.

### 3.3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Até o final da década de 70, no Brasil, não havia preocupações com a qualidade de energia elétrica que era consumida, distribuída ou gerada. As cargas elétricas utilizadas até então eram lineares ou resistivas, cargas estas que não traziam nenhum prejuízo ao sistema elétrico de potência. Em uma residência, por exemplo, as maiores cargas encontradas eram o chuveiro e o ferro de passar roupas e os demais equipamentos eletrônicos resumiam-se a

aparelhos de televisão, aparelhos de som, refrigeradores. Ainda que os motores dos refrigeradores fossem cargas indutiva-resistiva, a demanda por energia elétrica consumida era considerada uma carga resistiva.

Nos dias de hoje, há um avanço tecnológico acelerado nas áreas da eletrônica de potência e digital, com a utilização de semicondutores nos equipamentos eletrônicos. Esta evolução tecnológica possibilitou a automatização dos equipamentos eletrônicos nos setores de consumidores industriais, residenciais e comerciais. No setor residencial, por exemplo, podem ser encontrados muitos dispositivos para facilitar e automatizar os serviços nas residências, tais como, chuveiros elétricos reguláveis, máquinas de lavar programáveis, computadores, controles automáticos de iluminação, fornos microondas, etc. Já no setor industrial os processos estão cada vez mais automatizados para que a produção seja mais ágil e utilize o menor tempo possível em suas fabricações. Enquanto que no setor comercial são encontrados sistemas de gerenciamento e fluxo de caixa informatizado, por exemplo.

Porém, toda esta tecnologia avançada pode resultar em alguns problemas para a qualidade da energia elétrica, pois as cargas que antes eram lineares passam a ser cargas não lineares. Estas cargas não lineares não necessitam constantemente de uma corrente elétrica, porém solicitam picos de energia em determinados momentos. Tais cargas distorcem as formas de onda de tensão e de corrente gerando, assim, uma “poluição” na rede de energia elétrica, que podem causar alguns tipos de distúrbios ou problemas na geração ou transmissão desta energia.

Os principais distúrbios causados na rede de energia elétrica serão apresentados a seguir.

### **3.3.1 Fenômenos elétricos transitórios**

São fenômenos definidos como manifestações ou respostas elétricas locais ou adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Este fenômeno tem geralmente a duração muito pequena, contudo é um fenômeno de grande importância, pois os equipamentos que estão presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente.

### **3.3.2 Transitórios impulsivos**

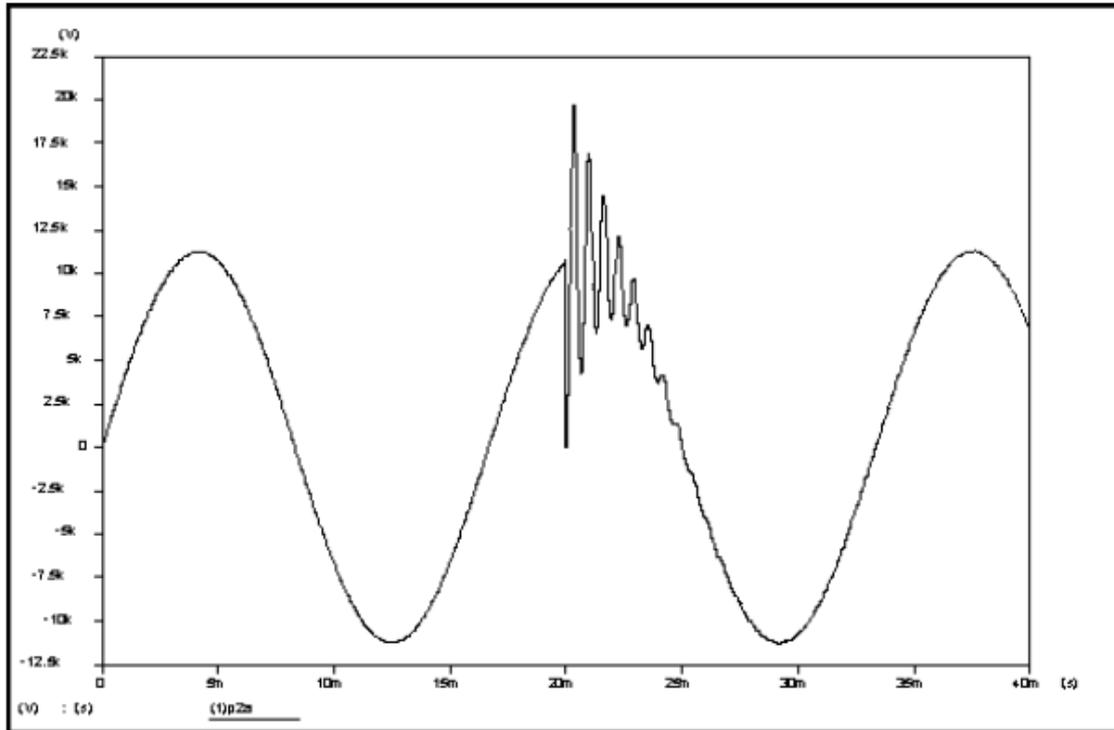
Os transitórios impulsivos são geralmente ocasionados por descargas atmosféricas e podem ser definidos como uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou de ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (positivo ou negativo) e nível de frequência bastante diferenciado com relação à frequência da rede elétrica.

### **3.3.3 Transitórios oscilatórios**

São ocasionados por energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de banco de capacitores e transformadores, entre outros.

Os transitórios oscilatórios de baixa frequência são frequentemente encontrados em sistemas de subtransmissão e distribuição e sua causa mais frequente é a energização de bancos de capacitores. A oscilação de tensão, geralmente, varia em uma frequência de 300 a 900Hz. Já os transitórios oscilatórios abaixo de 300Hz também podem ser encontrados no sistema de distribuição e suas causas estão geralmente associadas aos fenômenos de ferroressonância e energização de transformadores.

No caso dos transitórios oscilatórios de alta frequência, estes são ocasionados geralmente por descargas atmosféricas e chaveamento de circuitos indutivos. Para proteção das cargas contra este tipo de transitório, podem-se utilizar filtros de alta-frequência e transformadores isoladores. A Figura 1 mostra um exemplo de um transitório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores de 600kVAr e 13,8kV.



**Figura 1 - Transiente proveniente do chaveamento de um banco de capacitores de 600kVAr e 13,8kV.**

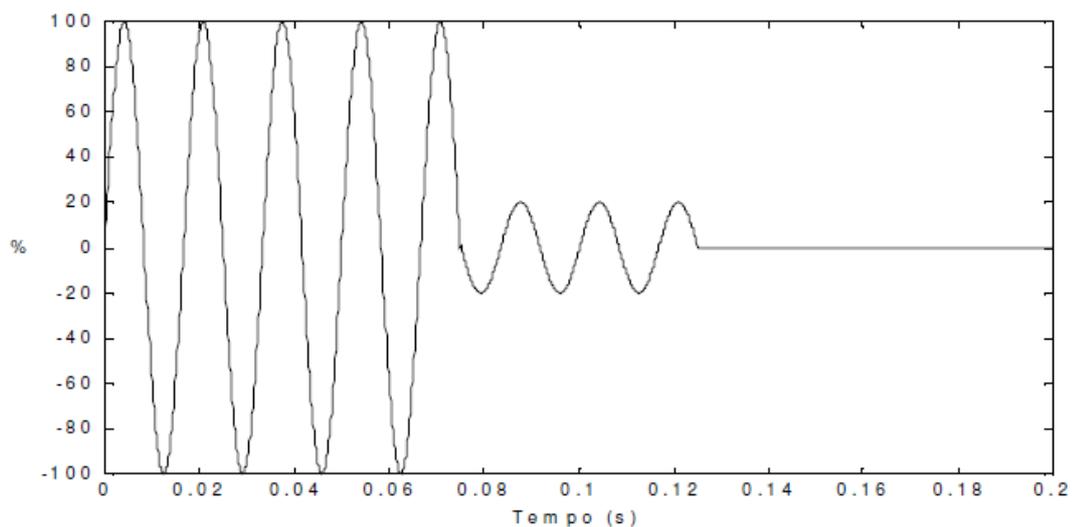
### 3.3.4 Variações de tensão de curta duração

São caracterizadas por alterações momentâneas, instantâneas ou temporárias, sendo que esta caracterização depende de sua duração. Normalmente, estas variações são ocasionadas por condições de falta, energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida ou por intermitentes falhas na conexão do sistema. Estas faltas podem causar tanto um afundamento de tensão temporário, como uma elevação de tensão ou ainda uma interrupção completa do sistema elétrico, porém isto depende do local da falta e das condições do sistema.

### 3.3.5 Interrupção

A interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto.

Uma interrupção deste tipo é causada por faltas no sistema de energia, falhas no equipamento e mau funcionamento de sistemas de controle. Estas interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão quando as mesmas são devidas a faltas no sistema supridor. Este afundamento ocorre no período de tempo entre o início de uma falta e a operação do dispositivo de proteção do sistema. Na Figura 2 é exemplificada uma interrupção sendo precedida por um afundamento de tensão.



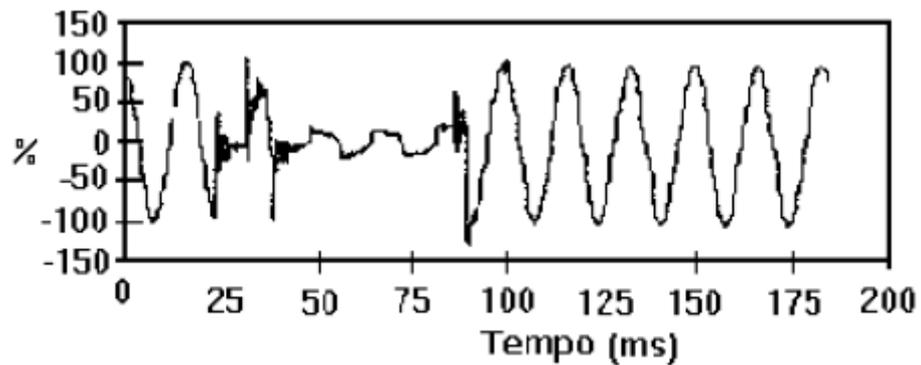
**Figura 2 - Interrupção de curta duração precedida por um afundamento de tensão.**

Observa-se na Figura 2 que a tensão cai para um valor de 20% e sua duração é de 3 ciclos até ocorrer a perda total de suprimento.

### 3.3.6 Afundamento de tensão

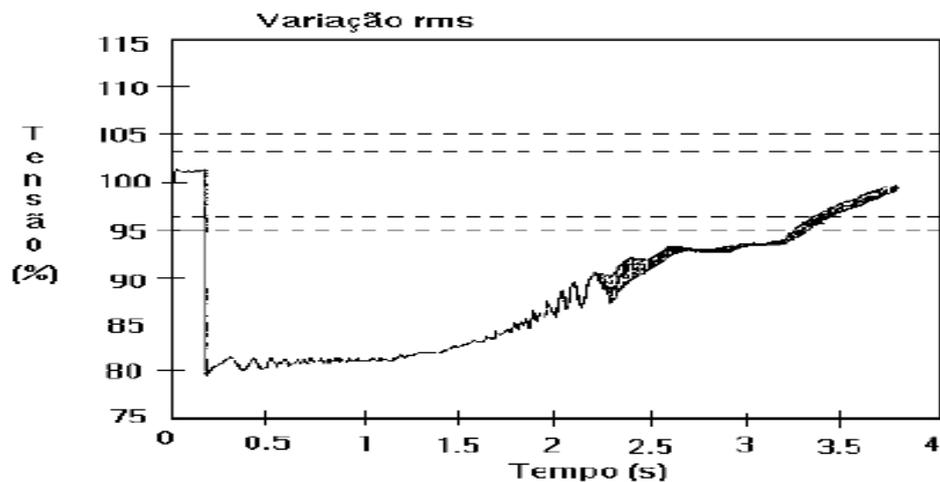
Os afundamentos de tensão tem uma duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto e sua redução no valor eficaz da tensão fica entre 0,1 e 0,9 pu, na sua frequência fundamental.

São causados, principalmente, por curtos-circuitos que ocorrem nas redes de distribuição. Porém, energização de grandes cargas, partida de grandes motores e corrente de indução de um transformador também podem ser fatores geradores deste distúrbio. Um afundamento de tensão de curta duração típico, gerado por uma falta fase-terra é mostrado na Figura 3.



**Figura 3 - Afundamento de tensão de curta duração ocasionado por uma falta fase-terra.**

Já a Figura 4 mostra um exemplo de decréscimo no valor eficaz de tensão gerado por uma partida em um motor.



**Figura 4 - Decréscimo de tensão ocasionado por uma partida de motor.**

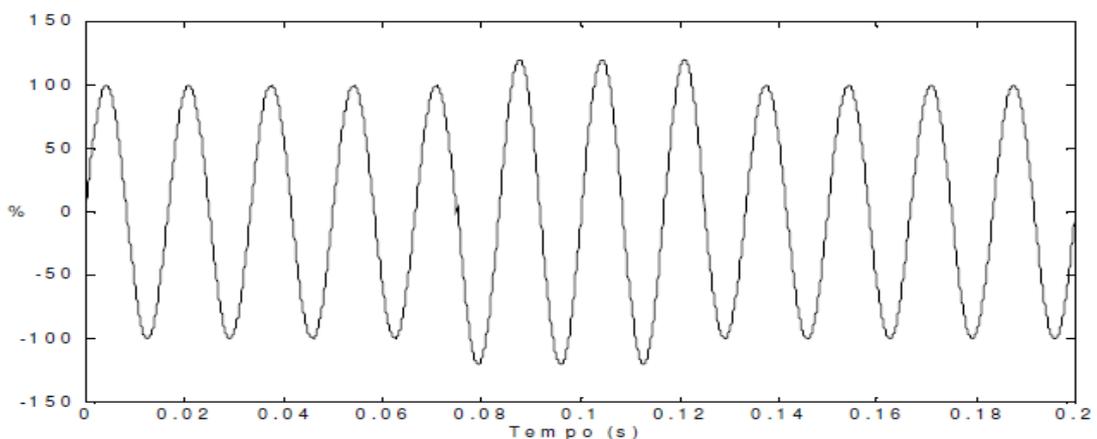
Este tipo de distúrbio acarreta, principalmente, uma má operação de equipamentos eletrônicos, em especial os sistemas computadorizados, que tem sido alvo de preocupações em órgãos de pesquisa em qualidade de energia.

### 3.3.7 Elevação de tensão

É definida como sendo um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, levando-se em conta a frequência do sistema. Sua duração é de 0,5 ciclo até 1 minuto.

Da mesma forma que o afundamento de tensão, este distúrbio é geralmente associado às condições de falta no sistema, principalmente se esta falta for um curto-circuito fase-terra. Também podem ser associados a este fenômeno saídas de grandes blocos de cargas ou a energização de grandes bancos de capacitores. Contudo, a incidência deste distúrbio por estes motivos é muito pequena se compararmos a incidência proveniente do curto-circuito fase-terra nas redes de transmissão e distribuição.

Conforme o número de ocorrências deste fenômeno pode-se ter como consequência falhas nos componentes de equipamentos. Alguns dispositivos eletrônicos como computadores e controladores eletrônicos podem apresentar falhas imediatas durante uma condição de elevação de tensão. Enquanto que transformadores, cabos, barramentos, dispositivos de chaveamento, transformadores de potencial, transformadores de corrente e máquinas rotativas podem ter sua vida útil reduzida. A Figura 5 mostra um típico distúrbio de elevação de tensão que pode ser causado por uma falta fase-terra.



**Figura 5 - Exemplo de uma elevação de tensão.**

### **3.3.8 Variações de tensão de longa duração**

Estas variações de tensão são caracterizadas por apresentarem uma duração superior a 1 minuto. Afundamentos de tensão, elevações de tensão ou interrupções sustentadas são os distúrbios ocasionados por estas variações.

### **3.3.9 Interrupções sustentadas**

Este tipo de distúrbio ocorre quando a tensão de suprimento permanece em zero por um período de tempo superior a um minuto. As interrupções sustentadas são na maioria das vezes permanentes e requerem a intervenção da concessionária para reparar o sistema e restaurar o fornecimento de energia.

Estas interrupções podem ocorrer de forma programada ou não. Em sua grande maioria estas interrupções não são programadas e são causadas, principalmente, por falhas nos disjuntores, queima de fusíveis, falha de componentes de circuito alimentador, entre outros. Quando as interrupções são programadas, suas causas são para execução de manutenção de rede, ou seja, serviços de troca de postes e cabos, mudança de tap do transformador, alteração de ajustes de equipamentos de proteção, entre outros.

### **3.3.10 Afundamentos de tensão sustentados**

Este distúrbio é caracterizado por um decréscimo no valor eficaz da tensão a valores menores que 0,9 pu, considerando-se a frequência do sistema, e com um período de duração maior que 1 minuto.

Sua principal causa é o carregamento excessivo dos circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, interagindo com a impedância da rede, dão origem a quedas de tensão acentuadas. Outros problemas que podem ocasionar este distúrbio

são a conexão de cargas à rede elétrica, o desligamento de banco de capacitores e, consequentemente, o excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão.

### **3.3.11 Elevações de tensão sustentadas**

Elevações de tensão sustentadas são caracterizadas por um aumento no valor eficaz da tensão acima de 1,1 pu por um período maior que 1 minuto.

Uma elevação de tensão sustentada pode resultar do desligamento de grandes cargas ou da energização de um banco de capacitores. Outra causa deste distúrbio pode ser a conexão realizada de forma errada de taps de transformadores.

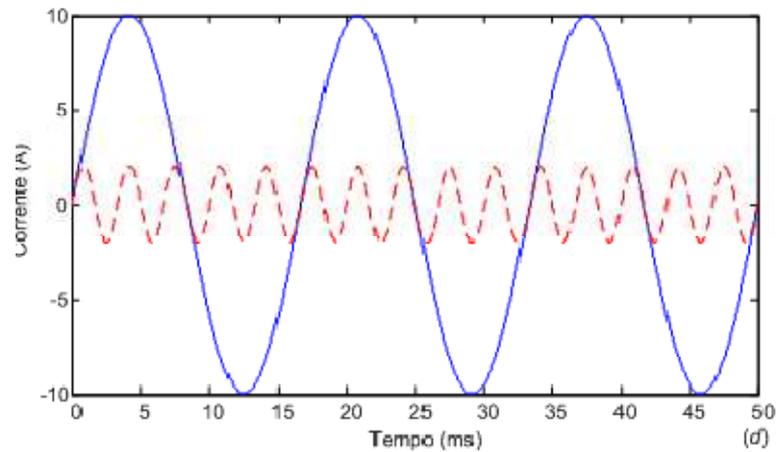
Entre as consequências deste distúrbio, pode estar à falha dos equipamentos. Os dispositivos eletrônicos podem sofrer algum tipo de dano durante as condições de sobretensão, contudo, transformadores, cabos, disjuntores, TC's, TP's e máquinas rotativas, geralmente, não apresentam falhas imediatas. O prejuízo para estes equipamentos pode ser a diminuição em sua vida útil.

Para correção deste distúrbio, destaca-se entre as opções a substituição de banco de capacitores fixos por banco de capacitores automáticos, seja no sistema de concessionárias, seja no sistema industrial e a instalação de compensadores estáticos de reativos, o que possibilita um maior controle no nível de tensão.

### **3.3.12 Desequilíbrios de tensão**

Este desequilíbrio ocorre quando as tensões de fase ou de linha variam de forma desigual e/ou quando a defasagem entre as fases de um circuito trifásico não é de 120°. As consequências que este desequilíbrio pode causar são sobretensões, sobrecorrentes, oscilações

de potência e vibrações em máquinas rotativas girantes. A Figura 6 mostra um exemplo de desequilíbrio de tensão com o surgimento de um 5º harmônico em relação à onda senoidal ideal, a onda senoidal em azul é a ideal e a onda em vermelho é a distorção.



**Figura 6 - Desequilíbrio de tensão com o surgimento de um 5º harmônico.**

### 3.3.13 Distorções na forma de onda

Distorções na forma de onda podem ser definidas como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral.

Há cinco tipos que podem ser consideradas as principais formas de distorções das ondas:

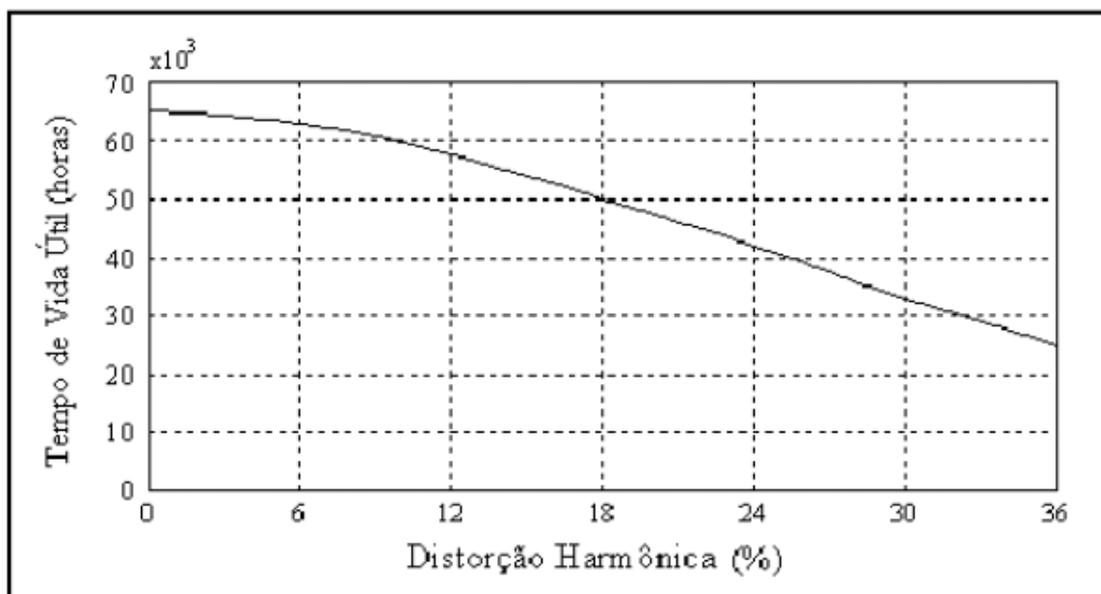
- Nível de corrente contínua (CC);
- Harmônicos;
- Inter-harmônicos;
- Notching;
- Ruídos.

### 3.3.14 Nível de corrente contínua

Quando há tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA, como consequência desta presença pode ocorrer a saturação de transformadores, o que resulta em perdas adicionais e redução na vida útil do equipamento. Também pode ocorrer corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores.

#### 3.3.14.1 Harmônicos

São as formas de onda que indicam as distorções periódicas das ondas senoidais de corrente ou de tensão. As cargas não-lineares são as principais geradoras de harmônicas na rede elétrica. Na figura 7 é mostrado um gráfico com a expectativa de vida útil de um transformador em relação à distorção harmônica de corrente.



**Figura 7 - Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente.**

### **3.3.14.2 Interharmônicos**

São componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60 Hz). Estes podem aparecer como frequências discretas ou como uma largura de faixa espectral.

Os interharmônicos podem ser encontrados em redes de diferentes classes de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, ciclo conversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais *carrier* (sinal superposto ao sinal de tensão utilizado para transmissão de informações) em linhas de potência também podem ser considerados interharmônicos.

### **3.3.14.3 Notching**

Este distúrbio é detectado através do conteúdo harmônico da tensão afetada. Ele ocorre quando um equipamento de eletrônica de potência em sua operação normal comuta sua corrente de uma fase para outra.

### **3.3.14.4 Ruídos**

Define-se um ruído, como um sinal elétrico indesejado que contém uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase ou encontradas em condutores de neutro.

Este distúrbio pode ser causado por equipamentos de eletrônica de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas e, por via de regra, estão relacionados com aterramentos impróprios. Um ruído resume-se a uma distorção

indesejada no sinal elétrico que não pode ser classificado como distorção harmônica ou transitório.

### **3.3.15 Flutuações ou oscilações de tensão**

São variações na magnitude da tensão e são tipicamente geradas por fornos a arco, aparelhos de solda elétrica, bombas e compressores. A variação desta carga pode provocar oscilações de potência na linha de alimentação, quando ocorre em grandes potências e podem provocar oscilações eletromecânicas entre geradores e ressonâncias sub-síncronas entre turbinas. A cintilação luminosa (*flicker*) é um dos principais efeitos causados pelas flutuações e ser percebido visualmente em lâmpadas incandescentes.

## **3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS HARMÔNICOS**

### **3.4.1 Harmônicos**

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações na forma de onda das tensões e das correntes em relação à onda senoidal na frequência fundamental.

Estas distorções harmônicas podem ser calculadas através das Séries de Fourier, que definem que toda função periódica não-senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões composta por:

- Uma expressão senoidal na frequência fundamental;
- Expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental
- Uma eventual componente contínua.

Assim, tem-se que para qualquer forma de onda periódica  $u(t)$ , é possível escrevê-la como mostra a Equação 3.

$$u(t) = U_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_k \text{sen}(n\omega_0 t)] \quad (3)$$

Onde

$$U_{dc} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt$$

Tais múltiplas inteiras da onda senoidal na frequência fundamental são chamadas de componentes harmônicas ou simplesmente harmônicas, cujas amplitudes correspondem, geralmente, a uma porcentagem da amplitude da fundamental.

Tem-se também, outra expressão para representar se uma forma de onda está distorcida ou não que é o THD (Total Harmonic Distortion). A equação xx mostra como pode-se encontrar este índice, que é expresso em porcentagem e pode variar de 0% (quando a onda senoidal é pura) a 100% (quando a onda senoidal está totalmente distorcida em relação a sua fundamental). O cálculo da THD é mostrado nas Equações 4 e 5, onde são mostradas as equações dos THD's total e individual.

$$THD_T = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \times 100 \quad (4)$$

Onde  $h_1, h_2, \dots, h_n$  tem o valor eficaz das harmônicas até ordem “n”. Normalmente as ordens harmônicas analisadas vão até a ordem 50, pois após esta ordem as harmônicas são consideradas sem valor significativo.

$$THD_I = \frac{h_n}{h_1} \times 100 \quad (5)$$

### 3.4.2 Efeitos relacionados à presença de harmônicos na rede

Quando há forma de onda não senoidal em uma rede elétrica, danos podem ser causados a esta rede e também, aos aparelhos que estão conectados a ela. Estes efeitos podem ser notados de forma visual, auditiva, registrados por medidores de temperatura ou por meio de equipamentos específicos para a sua detecção.

Aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, ressonância, vibrações e acoplamentos, aumento de queda de tensão e redução do fator de potência, tensão elevada entre neutro e terra podem ser os principais efeitos observados nas instalações elétricas e serão discutidos a seguir.

### 3.4.3 Aquecimentos excessivos

Os aquecimentos excessivos provenientes das distorções harmônicas podem estar presentes em cabos e fios das instalações elétricas, nos enrolamentos dos transformadores, motores e geradores, entre outros. Conforme ocorre o aumento da frequência do sinal de

corrente, a tendência é de que ela circule pela periferia do condutor, resultando em um aumento de sua resistência elétrica e, por consequência, ocasionando perdas pelo efeito Joule. Este efeito é considerado um dos mais importantes das correntes harmônicas.

#### **3.4.4 Disparos de dispositivos de proteção**

Alguns dispositivos de proteção termomagnéticos e diferenciais disparam devido aos altos valores de pico apresentados pelas correntes dos sinais harmônicos, embora tendo seus valores eficazes pequenos. Isto é ocasionado pelo aquecimento das correntes harmônicas ou um campo magnético mais elevado em relação aquele que seria sem a presença dos harmônicos.

Quando há em um local uma grande concentração de aparelhos eletroeletrônicos, os disparos imprevistos das proteções são comuns de acontecer, o que pode ocasionar a perda de dados nos computadores dos usuários.

#### **3.4.5 Ressonância**

Um circuito ressonante é formado quando o capacitor está em paralelo com a indutância e este circuito é capaz de amplificar os sinais de uma dada frequência. Com isso, algumas harmônicas podem ser amplificadas, o que pode provocar danos nos capacitores, levando-os à queima ou explosões.

Para que não ocorram estes danos, as harmônicas presentes devem ser quantificadas e as devidas providências devem ser tomadas para torná-las inofensivas aos capacitores antes da instalação do banco de capacitores.

### **3.4.6 Vibrações e acoplamentos**

Quando as harmônicas geram altas frequências, interferências eletromagnéticas ou conduzidas podem ser provocadas, que tem como consequência vibrações em quadros elétricos, em transformadores e/ou acoplamentos em redes de comunicações, prejudicando a qualidade da conversação ou da troca de dados e sinais em geral.

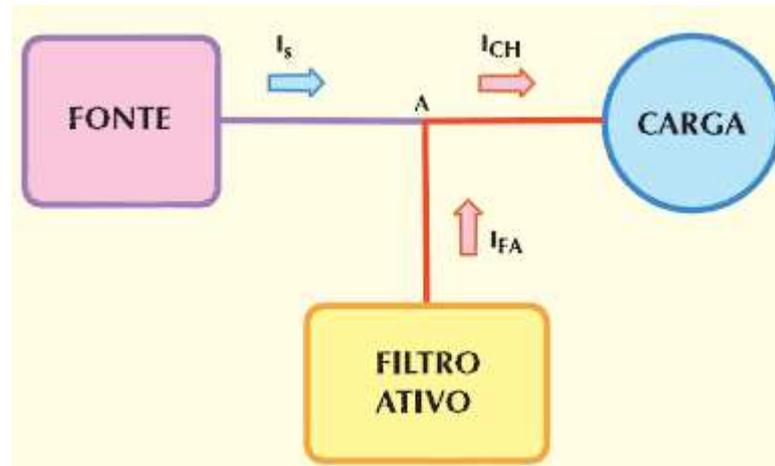
## **3.5 FILTROS**

Os filtros podem ser definidos como dispositivos que permitem a passagem da frequência fundamental, que no caso do Brasil é de 60Hz, pela linha e bloqueia ou drenam as frequências indesejadas (harmônicos) com a intenção de reduzir ao mínimo os distúrbios da rede[1]. Os filtros podem ser classificados como ativos ou passivos e a união entre estes dois tipos de filtros pode ser chamado de filtro híbrido.

### **3.5.1 Filtros ativos**

O filtro ativo utiliza-se da eletrônica para gerar componentes que sejam capazes de cancelar os harmônicos gerados pelas cargas não-lineares. Basicamente, um circuito ativo gera e injeta correntes harmônicas com ângulo de fase oposta àquelas produzidas pela carga não-linear [1], com isso, é possível reduzir consideravelmente a presença de harmônicos. Estes filtros podem ser conectados em paralelo ou em série com a carga geradora de harmônicas.

A Figura 8 mostra um exemplo de um filtro ativo conectado em paralelo.



**Figura 8 - Filtro conectado em paralelo. [Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas Efeitos e Soluções – PROCOBRE].**

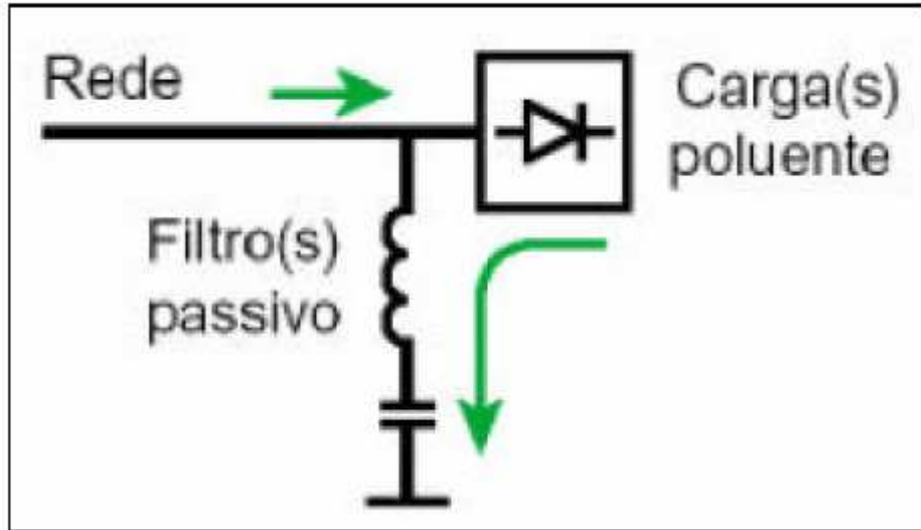
### 3.5.2 Filtros passivos

O filtro passivo é um dispositivo eletrônico, geralmente composto de componentes lineares e passivos (resistor, indutor, capacitor), cuja finalidade é retificar a forma de onda de tensão e de corrente. [26] Podem ser instalados em derivação ou em série.

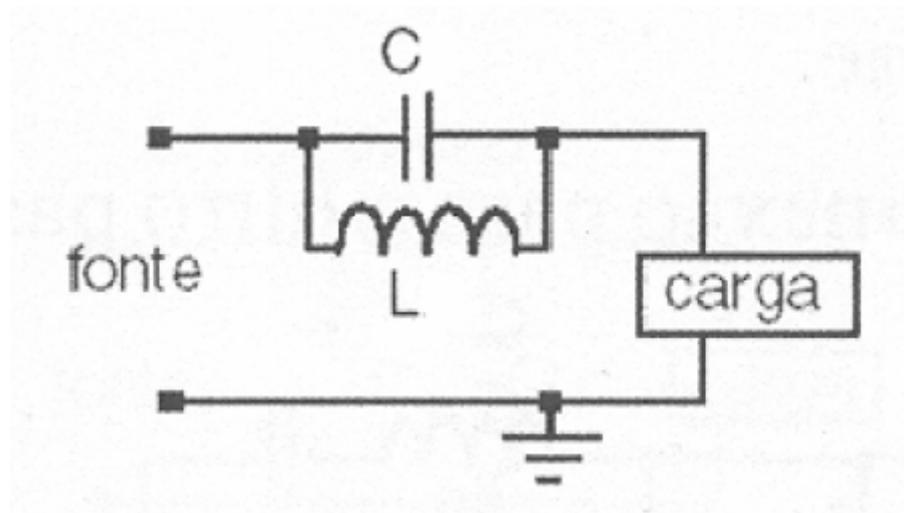
O dimensionamento dos condutores deve seguir a relação entre a frequência da corrente que se deseja drenar e a sua intensidade. A Equação 6 apresenta esta relação a ser seguida.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

A Figura 9 traz um exemplo de filtro passivo em derivação e a Figura 10 mostra um exemplo de filtro passivo em série.



**Figura 9 - Exemplo de um filtro passivo em derivação.**[Fonte: Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas Efeitos e Soluções – PROCOBRE].

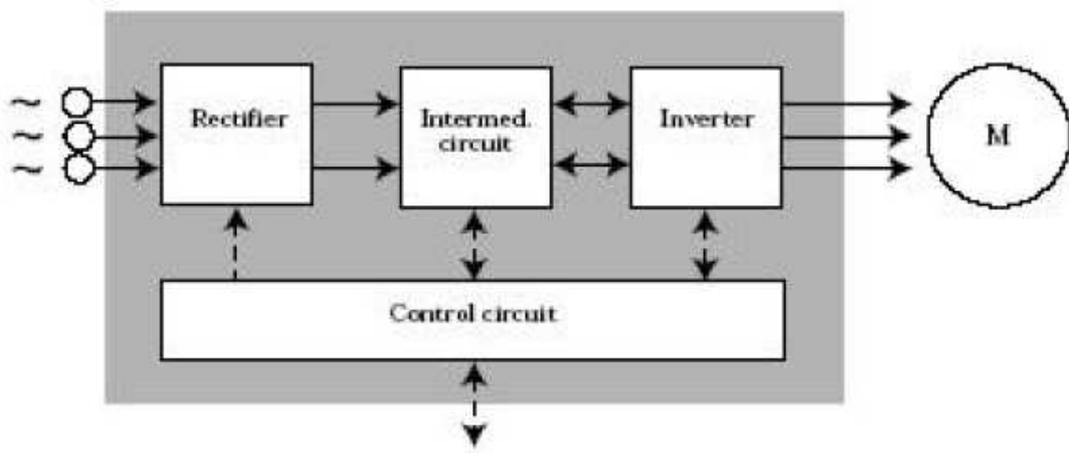


**Figura 10 - Exemplo de filtro passivo em série.**

### 3.6 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Os inversores de frequência estão, desde a década de 60, sofrendo muitas e rápidas mudanças, devido ao grande desenvolvimento dos semi-condutores e dos microprocessadores e, também, pela redução do preço. Contudo, os inversores de frequência continuam com seus

mesmos princípios básicos e podem ser divididos em quatro componentes principais: o retificador, o circuito intermediário, o inversor e o circuito de controle. A Figura 11 mostra o esquema simplificado de um inversor de frequência.



**Figura 11 - Inversor de frequência simplificado. [Fonte: EJM Engenharia].**

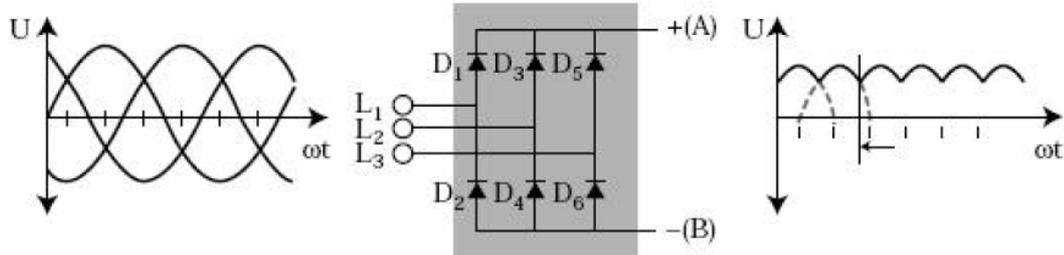
### 3.6.1 Retificador

O retificador pode ser classificado como: controlado, não-controlado e semi-controlado. Quando o mesmo é composto apenas por diodos, o retificador é classificado como não-controlado, quando sua composição possui apenas tiristores, é controlado e se ambos são utilizados é um retificador semi-controlado. Sua tensão de entrada pode ser monofásica ou trifásica.

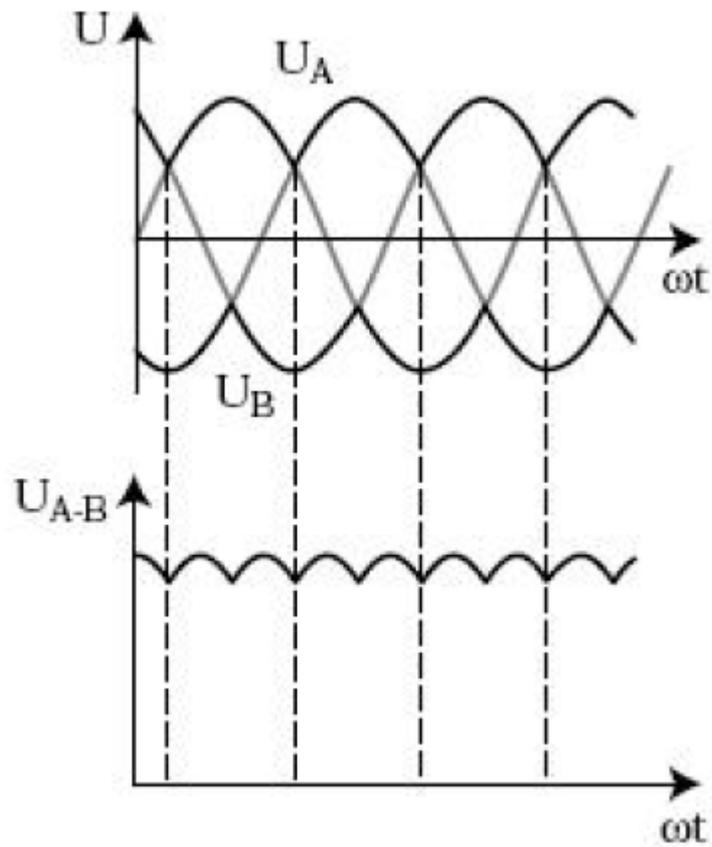
### 3.6.2 Retificador não-controlado

Os diodos são componentes que possibilitam a passagem de corrente em apenas uma direção: do ânodo para o cátodo. Dessa forma, a tensão alternada sobre o diodo é convertida

em uma tensão CC pulsante. A Figura 12 mostra o comportamento de um retificador não-controlado e a Figura 13 mostra a saída do retificador não-controlado.



**Figura 12 - Retificador não-controlado.**

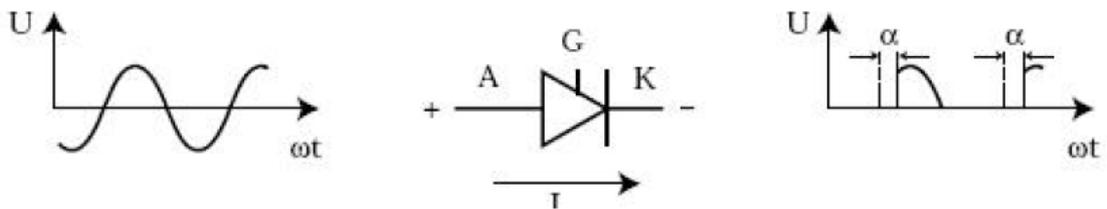


**Figura 13 - Saída de um retificador não-controlado.**

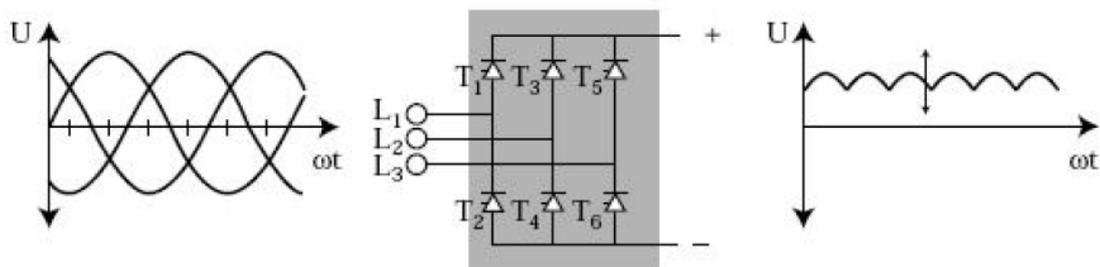
### 3.6.3 Retificador controlado

Nesta configuração de retificador os diodos são trocados pelos tiristores. Assim como os diodos, os tiristores permitem a passagem de corrente em apenas um sentido, porém sua diferença está em um terceiro terminal, denominado gate ou porta (G). Esta porta deve ser comandada por um sinal antes do tiristor conduzir. A corrente será conduzida até que atinja um valor nulo quando passar pelo tiristor.

O sinal para a porta é o sinal de controle  $\alpha$  do tiristor que é um atraso de tempo, expresso em graus. O valor em graus representa o atraso entre a passagem da tensão por zero e o instante em que o tiristor inicia sua condução. [25] A Figura 14 mostra o comportamento da condução do tiristor e a Figura 15 mostra o comportamento do retificador trifásico controlado.



**Figura 14 - Condução do tiristor.**



**Figura 15 - Retificador controlado trifásico.**

As configurações dos retificadores controlado e não-controlado são basicamente as mesmas. O que diferencia estas configurações é a capacidade do tiristor de ser controlado

por um pulso defasado por um período  $\alpha$  e dessa forma, reduzir o seu período de condução. A regulação permite a variação do valor da tensão contínua na saída do retificador.

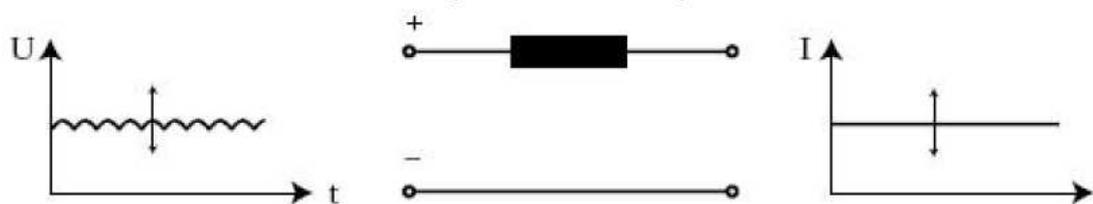
Se for comparado com o retificador não-controlado, o controlado causa maiores perdas e distúrbios na rede de alimentação. Isto ocorre pelo fato de que o retificador drena uma corrente reativa maior se o tiristor conduzir por um curto período de tempo. A principal vantagem do retificador controlado é que a energia pode ser devolvida para a rede.

### 3.6.4 Circuito intermediário

O circuito intermediário pode ser visto como um reservatório, no qual o motor pode drenar energia através do inversor. Três princípios diferentes podem determinar sua construção, dependendo do tipo de retificador e inversor.

### 3.6.5 Inversores fonte de corrente

Nos inversores fonte de corrente o circuito intermediário é composto de um grande indutor e é combinado apenas com um retificador controlado. O indutor tem como função transformar a tensão variável do retificador em uma corrente contínua variável. Cabe a carga determinar a amplitude da tensão do motor. A Figura 16 mostra o inversor fonte de corrente.



**Figura 16 - Inversor fonte de corrente.**

### 3.6.6 Inversor fonte de tensão

O circuito intermediário é composto por um filtro capacitivo e pode ser combinado com os dois tipos de retificador. A função do filtro é atenuar a tensão pulsante do retificador.

No retificador não-controlado, a tensão na entrada do conversor é uma tensão CC com amplitude constante. Já no retificador controlado, a tensão é constante em uma dada frequência e é fornecida ao inversor como uma tensão contínua pura com amplitude variável. A Figura 17 mostra o inversor fonte de tensão.

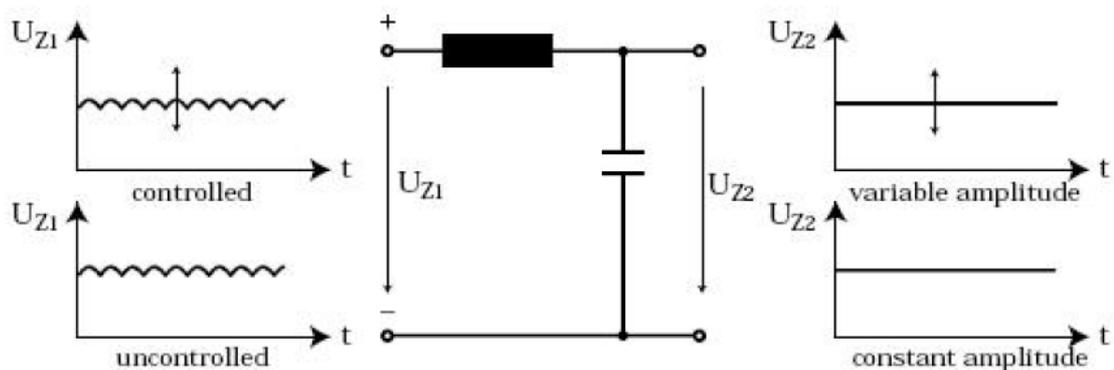


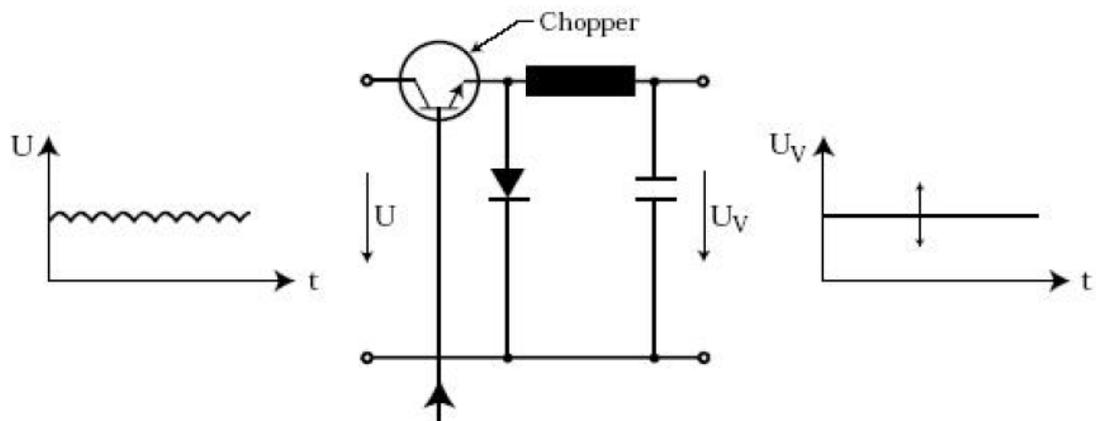
Figura 17 - Inversor fonte de tensão.

### 3.6.7 Circuito intermediário com tensão cc variável

Nesta topologia de circuito intermediário, um “*chopper*” pode ser inserido na frente do filtro, que funciona como uma chave para ligar e desligar a tensão do retificador. O circuito de controle regula o “*chopper*” através da comparação da tensão variável depois do filtro com um sinal de entrada. Se houver diferença, a relação é regulada pelo tempo que o transistor conduz e tempo que ele é bloqueado. Isso varia o valor efetivo e o tamanho da tensão.

Quando a corrente é interrompida pelo transistor do “*chopper*”, a bobina do filtro faz com que a tensão através do transistor seja muito grande. Para impedir que isso aconteça, um diodo de roda livre realiza a proteção.

O filtro do circuito intermediário atenua a tensão quadrada que é fornecida pelo “*chopper*”. O filtro capacitivo e indutivo mantém a tensão constante para uma dada frequência. A Figura 18 mostra o circuito intermediário com tensão CC variável.



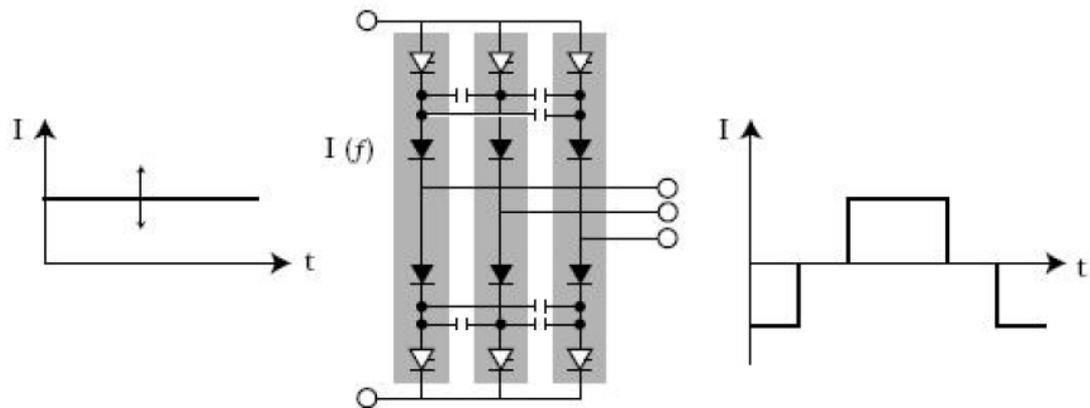
**Figura 18 - Circuito intermediário com tensão CC variável.**

### 3.6.8 Inversor

É no inversor que ocorre a adaptação da tensão de saída, sendo o último ponto de conexão antes do motor. O circuito intermediário pode fornecer ao inversor corrente e tensão contínua variável e tensão contínua constante. A frequência para o motor é gerada no inversor. Quando o inversor recebe tensão ou corrente variável, gera apenas frequência. Se a tensão recebida é constante, são geradas tensão e frequência pelo inversor. Embora estejam trabalhando de formas diferentes, a estrutura do inversor é basicamente a mesma, sendo formado principalmente por semicondutores controláveis.

Atualmente por possuírem maiores velocidades, os transistores estão substituindo os tiristores. Mesmo que dependa do tipo de semicondutor utilizado, a frequência de chaveamento está entre 300Hz e 20kHz. Os semicondutores são ligados e desligados por

sinais gerados no circuito de controle. Os sinais podem ser controlados de diversas maneiras. A Figura 19 mostra o comportamento de um inversor tradicional e sua estrutura.



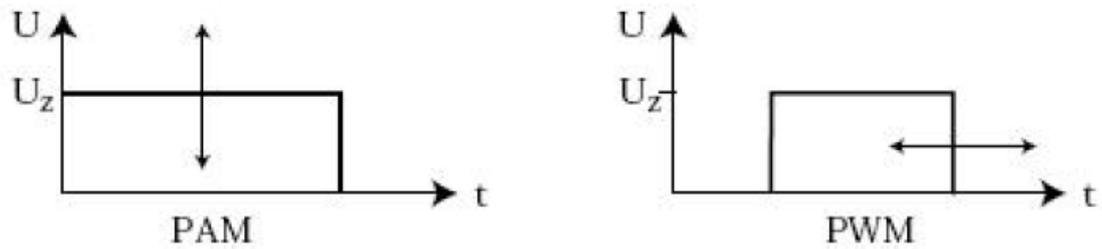
**Figura 19 - Inversor tradicional.**

Inversores tradicionais, trabalhando principalmente com circuitos intermediários de tensão variável, consistem de seis diodos, seis tiristores e seis capacitores. Em inversores com circuitos intermediários de tensão constante ou variável há seis componentes chaveadores e independentemente do tipo de semicondutor utilizado, a função é basicamente a mesma. O circuito de controle chaveia os semicondutores utilizando-se das mais diversas técnicas de modulação, mudando, dessa forma, a frequência de saída do inversor.

Há duas técnicas principais de modulação utilizadas: PAM (Pulse Amplitude Modulation) e PWM (Pulse Width Modulation).

A primeira principal técnica utiliza tensão ou corrente variável no circuito intermediário. Há uma sequência de chaveamento que é controlada pela amplitude da tensão ou corrente do circuito intermediário. [25]

Na segunda técnica, o circuito de controle determina os tempos de chaveamento dos semicondutores através da intersecção entre uma tensão triangular e uma tensão senoidal superposta. O circuito intermediário utiliza tensão constante. A tensão no motor é obtida quando é aplicada a tensão do circuito intermediário por períodos mais longos ou mais curtos. A frequência é alterada através da variação dos pulsos de tensão ao longo do eixo do tempo. A Figura 20 mostra o comportamento das duas técnicas. [25]



**Figura 20 - Técnicas PAM e PWM.**

### 3.6.9 Circuito de controle

O circuito de controle possui quatro tarefas principais e é a última etapa do inversor de frequência. As etapas são:

- Controlar os semicondutores do inversor de frequência;
- Troca de dados entre o inversor de frequência e os periféricos;
- Verificar e reportar mensagens de falha;
- Cuidar das funções de proteção do inversor de frequência e do motor.

Os micro-processadores têm aumentado a velocidade e capacidade de processamento dos inversores de frequência. Além de que o processamento passa a ser integrado dentro do inversor de frequência e este está apto a determinar o melhor padrão de chaveamento para cada estado de operação.

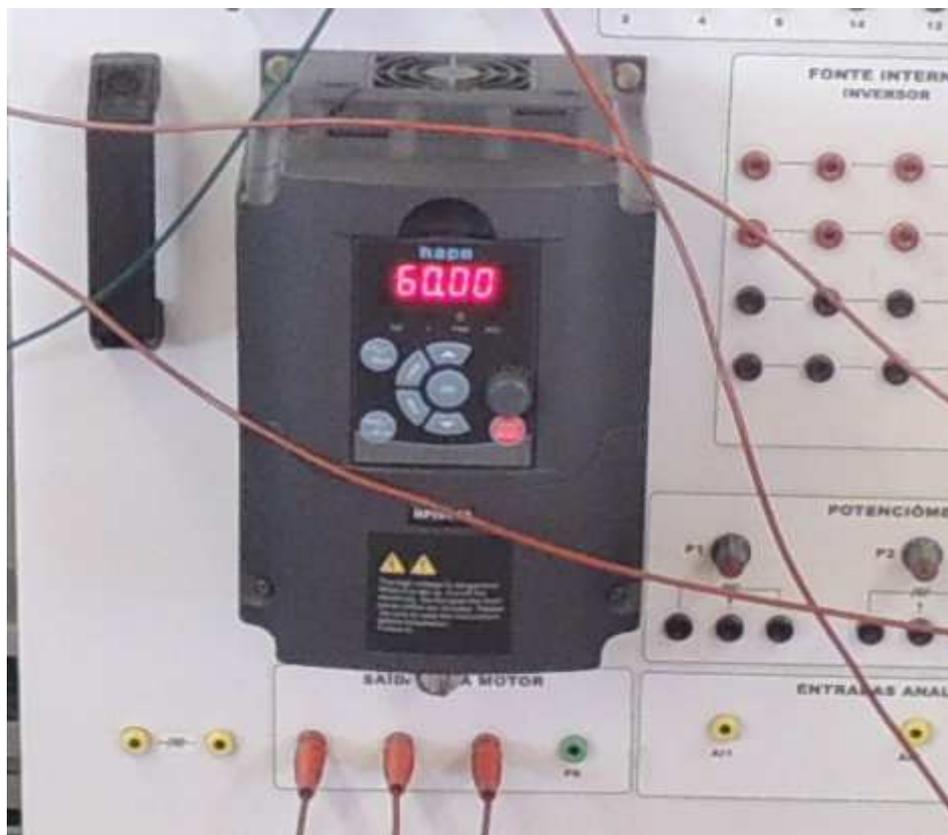
## 4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Neste experimento foi realizado o acionamento de um motor elétrico trifásico através de um inversor de frequência. Após a realização do acionamento, foram colhidos dados deste acionamento com a utilização de um analisador de qualidade de energia elétrica, através dos dados obtidos foi possível simular o circuito com o auxílio do software PSIM. Após a simulação do circuito, possíveis soluções para os problemas identificados foram propostas e analisadas.

### 4.1 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência utilizado neste experimento é da marca Solcom & HAPN (Shanghai) Electric Co., Ltda, modelo HPI 6000.

Este é um inversor universal de frequência, utilizado para acionamento de motores elétricos. A Figura 21 mostra este inversor.



**Figura 21 - Inversor de frequência**

## 4.2 MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO

Já o motor elétrico utilizado no experimento é da marca WEG e do modelo W21 de Alto Rendimento Plus. É um motor que pode ser utilizado em bombas, ventiladores, exaustores, britadores, moinhos, compressores, talhas, enfim, em várias aplicações que requerem um motor assíncrono de indução trifásico com o máximo de rendimento e que possua um baixo consumo. A Figura 22 mostra o motor, enquanto a Figura 23 mostra a sua placa de especificações.



**Figura 22 - Motor elétrico trifásico.**

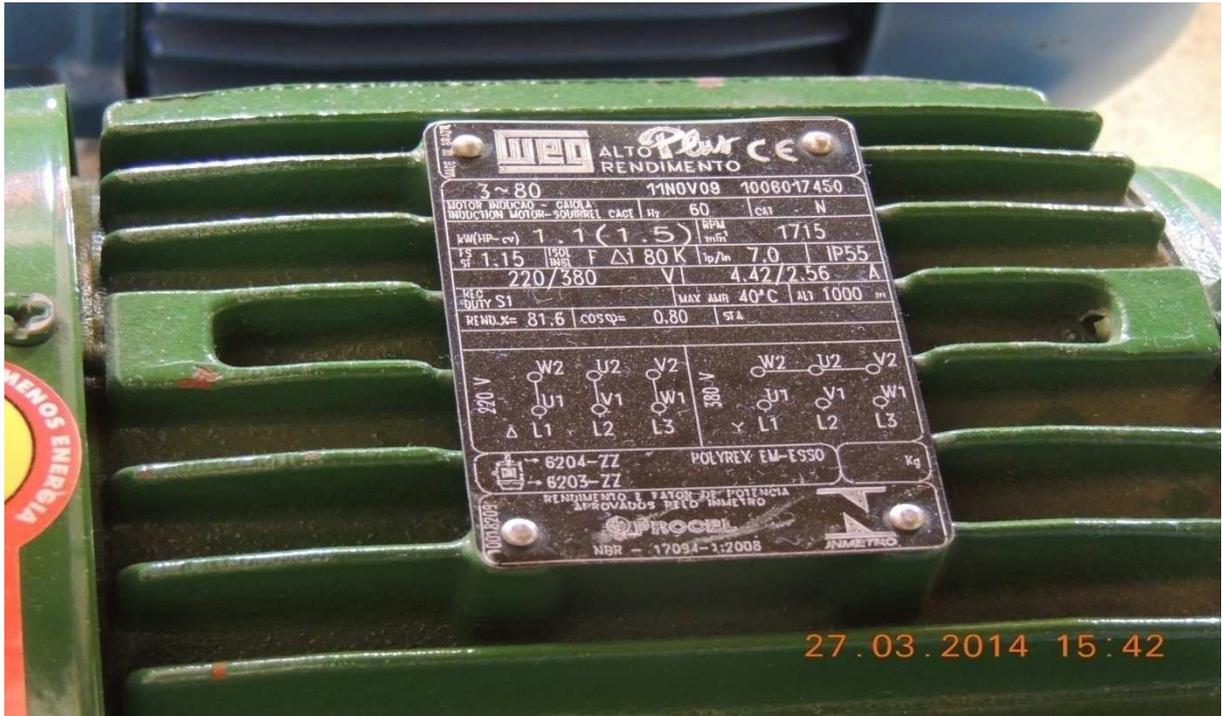


Figura 23 - Placa do motor elétrico.

#### 4.3 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Este instrumento é capaz de medir variações de distúrbios desde muito pequenos (nanossegundos) a muito longos (vários dias), bem como registrar as ocorrências e imprimí-las em papel ou qualquer mídia para PC.

Basicamente podemos encontrar dois tipos de analisadores no mercado: convencional e o de análise gráfica.

O primeiro deles pode apresentar apenas um resumo das principais ocorrências, tais como: quedas de tensão temporárias, elevação de tensão, transientes, harmônicos, fator de potência, entre outros. Contudo, com um pequeno número de amostras, muitos distúrbios podem ocorrer sem serem detectados, visto que este tipo de instrumento analisa a rede em intervalos de tempo, se o fenômeno ocorrer entre os intervalos de tempo da amostra ele não será detectado.

Já o analisador gráfico funciona de modo diferente, pois monitora a rede em tempo real, isto ocorre devido a possuir um hardware mais complexo que o convencional, ou seja, tem

uma maior velocidade no processamento dos dados e possui um maior espaço de memória para armazenamento dos dados.

Neste experimento foi utilizado o analisador de qualidade de energia elétrica KEW 6310 da KYORITSU ELECTRICAL INSTRUMENTS WORKS LTD, que é mostrado na Figura 24.

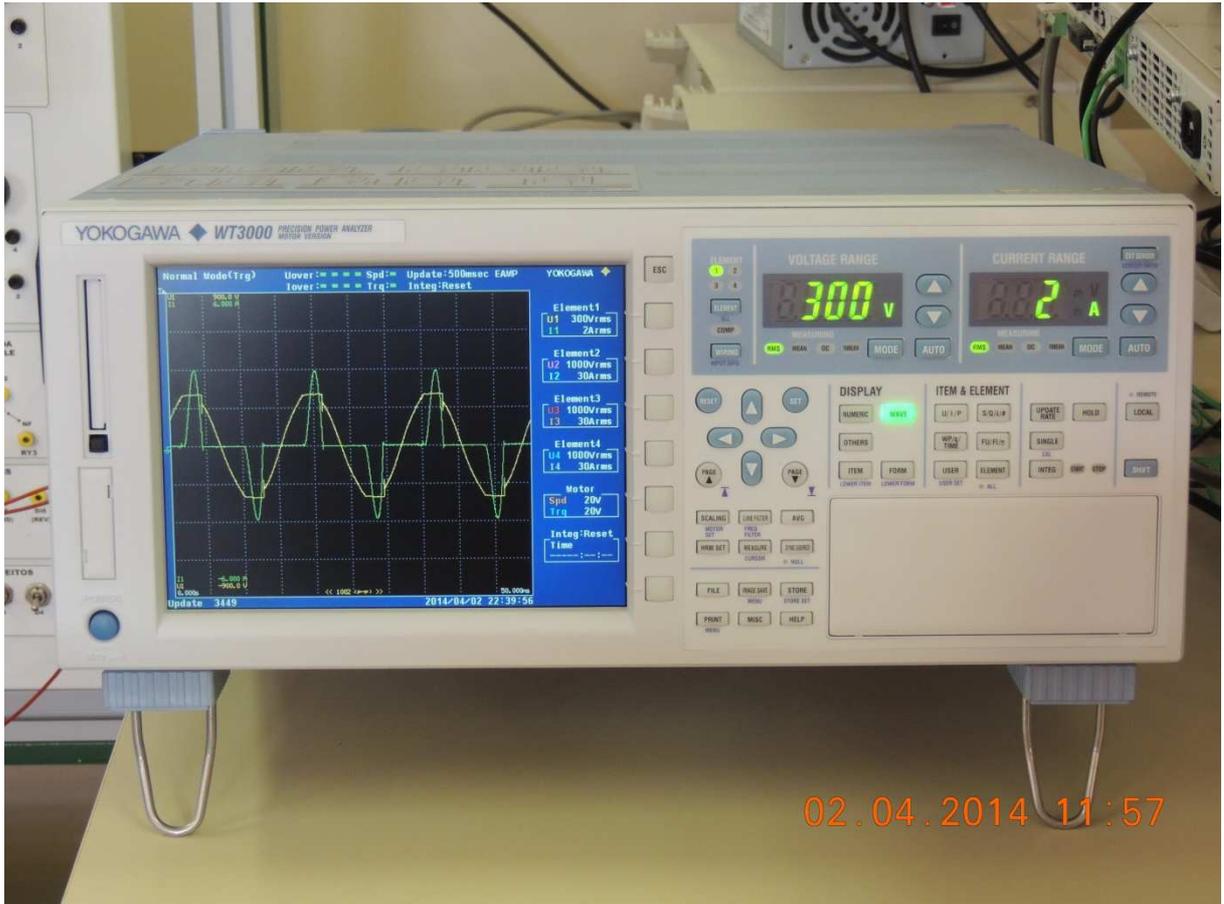


**Figura 24 - Analisador de energia digital.**

#### 4.4 WATTÍMETRO

Neste caso, foi utilizado o wattímetro WT3000, da marca YOKOGAWA. Este tipo de equipamento é capaz de medir pequenas correntes até medições de correntes de grande dimensão para avaliar grande porte de cargas. Suporta medir tensões que variam de 1,5 V até 1000 V, o que permite uma grande variedade de aplicações. Isto ocorre, pois aceita sinal de entrada de até 6 fases. Também podem ser medidas potências de entrada e de saída, teor harmônico, entre outras medições.

A Figura 25, mostra o wattímetro WT3000.



**Figura 25 - Wattímetro WT3000.**

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

### 5.1 MODELAGEM E ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Para que fosse possível realizar a análise das distorções harmônicas de corrente geradas pelo acionamento de um motor elétrico através de um inversor de frequência, foram coletados dados com a utilização de um analisador de qualidade de energia elétrica KEW 6310 da marca KYORITSU ELECTRICAL INSTRUMENTS WORKS LTD e de um wattímetro WT3000 da marca YOKOGAWA. Estas coletas foram realizadas com o inversor de frequência acionando o motor elétrico nas frequências variando de 6 em 6 Hz no intervalo de 6 a 60 Hz (6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60 Hz) para análise do comportamento das distorções harmônicas de corrente com o motor atuando a vazio. Também foram feitas medições nas mesmas condições anteriores para o acionamento com uma força mecânica atuando no eixo do motor simulando assim o comportamento das distorções harmônicas de corrente quando uma carga é solicitada ao motor.

Através do analisador de qualidade de energia elétrica foram coletados os dados individuais de cada harmônica (1ª a 25ª), os quais eram salvos no intervalo 15 em 15 segundos por aproximadamente 5 minutos, enquanto que o wattímetro foi utilizado para coleta das formas de onda de tensão e corrente, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência e tensão e corrente de pico.

A Figura 26 mostra o esquema de ligação no qual o inversor de frequência aciona o motor elétrico e os dados foram coletados pelo analisador e pelo wattímetro.



**Figura 26 - Esquema de ligação.**

### **5.1.1 Medições do motor atuando a 6 Hz**

Inicialmente foram coletados dados do motor atuando com uma frequência de 6 Hz de duas formas: a vazio e com uma força mecânica atuando no eixo do motor para simular uma carga. As ordens harmônicas utilizadas foram da ordem 1 a 25, tendo em vista que as harmônicas acima da 25ª ordem não têm influência no resultado assim como as harmônicas pares. Os resultados obtidos, individualmente para cada ordem harmônica através coleta do motor atuando a vazio, são mostrados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando a vazio com uma frequência de 6 Hz.**

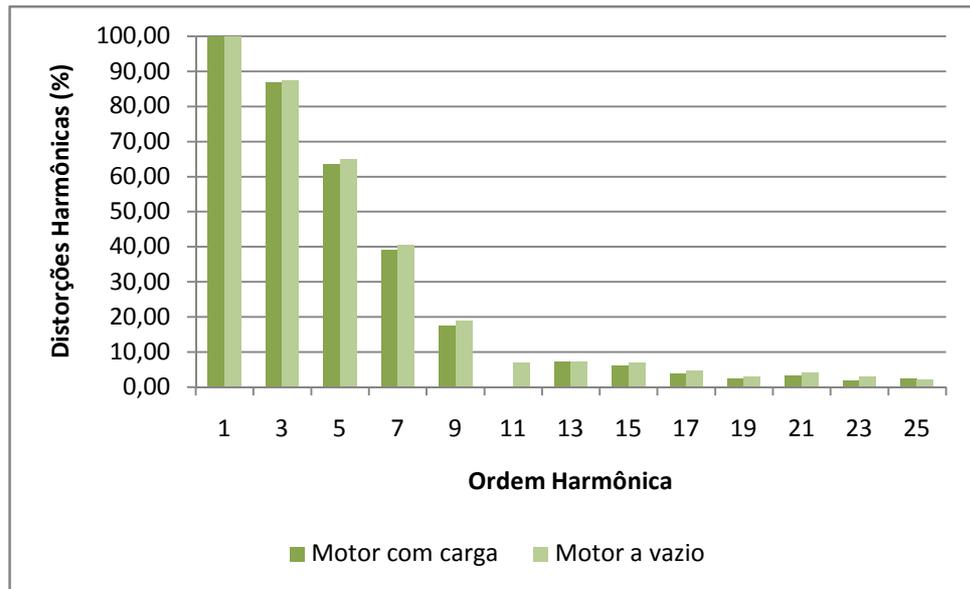
	<b>THD<sub>i</sub> = 119,3%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 12,05A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	87,53	-174,29
5	64,98	11,07
7	40,37	-161,16
9	19,02	35,27
11	6,80	-91,30
13	7,32	158,81
15	7,09	10,39
17	4,73	-112,19
19	2,93	90,58
21	4,10	-19,36
23	2,99	-13,85
25	1,99	66,43

Na Tabela 13 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 13 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 6 Hz.**

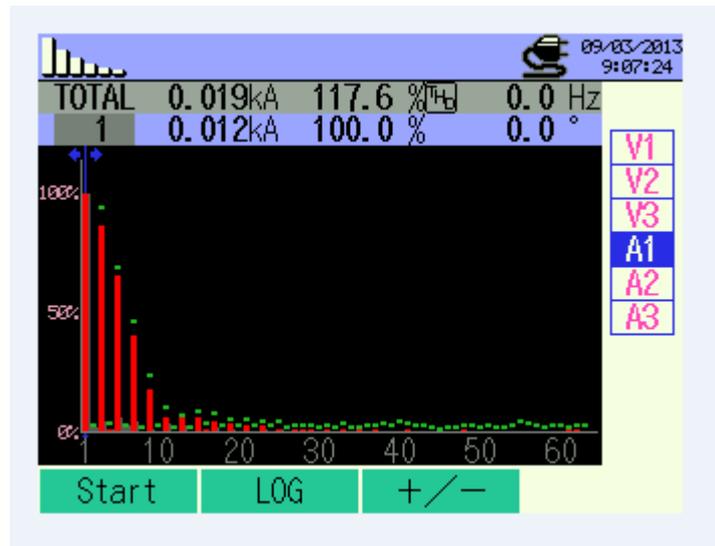
	<b>THD<sub>i</sub> = 116,88%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 12,81A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	86,65	-175,39
5	63,49	8,69
7	39,01	-163,92
9	17,37	32,89
11	0,24	-88,61
13	7,26	140,71
15	6,18	5,49
17	3,69	-142,31
19	2,48	96,20
21	3,19	-22,74
23	1,87	-27,91
25	2,26	42,75

Na Figura 27 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 6 Hz.



**Figura 27 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como nota-se no gráfico acima não há muita diferença nas distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação quando o mesmo atua com a carga. Utilizando o analisador de qualidade de energia elétrica foram coletadas as distorções harmônicas do motor atuando com a frequência de 6 Hz e com a carga, como mostra a Figura 28.



**Figura 28 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 6 Hz.**

O  $THD_i$  e a corrente da primeira harmônica também podem ser vistos na Figura xx. Através da utilização do wattímetro foi possível coletar dados tais como potência ativa, potência reativa, potência aparente, entre outros valores como mostra a Figura 29 quando o

motor atua sem carga e a Figura 30 mostra os valores obtidos quando o motor atua com carga, ambos com a frequência de 6 Hz.

No.	Function	Element	Order	Data	Units	Max	Min
1	Urms	1	---	229.909	V	230.251	229.693
2	Irms	1	---	0.97099	A	0.99270	0.91692
3	P	1	---	140.681	W	144.267	132.164
4	S	1	---	223.240	VA	228.398	210.873
5	Q	1	---	-173.334	var	-164.317	-177.067
6	PF	1	---	0.63018		0.63165	0.62675
7	Phi	1	---	-50.937	deg	-50.828	-51.189
8	FreqU	1	---	59.977	Hz	60.000	59.951
9	Freql	1	---	59.988	Hz	59.998	59.949
10	Uppeak	1	---	324.951	V	325.901	319.830
11	Umpeak	1	---	-333.593	V	-322.298	-335.662
12	Ippeak	1	---	2.83002	A	2.87617	2.76531

**Figura 29 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 6 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	226.320	V	227.838	226.303
2	Irms	1	---	1.80988	A	1.90057	0.88166
3	P	1	---	0.27767k	W	0.29381k	0.12517k
4	S	1	---	0.40961k	VA	0.43026k	0.20064k
5	Q	1	---	0.30114k	var	0.31433k	0.15678k
6	PF	1	---	0.67788		0.68286	0.62387
7	Phi	1	---	47.322	deg	51.401	46.933
8	FreqU	1	---	60.022	Hz	60.033	60.006
9	Freql	1	---	60.002	Hz	60.048	60.001
10	Uppeak	1	---	309.918	V	322.095	306.254
11	Umpeak	1	---	-309.959	V	-307.178	-317.489
12	Ippeak	1	---	4.98921	A	5.10898	2.59873

**Figura 30 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 6 Hz com carga.**

### 5.1.2 Medições do motor atuando a 12 Hz

Na Tabela 14 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 12 Hz.

**Tabela 14 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando a vazio com uma frequência de 12 Hz**

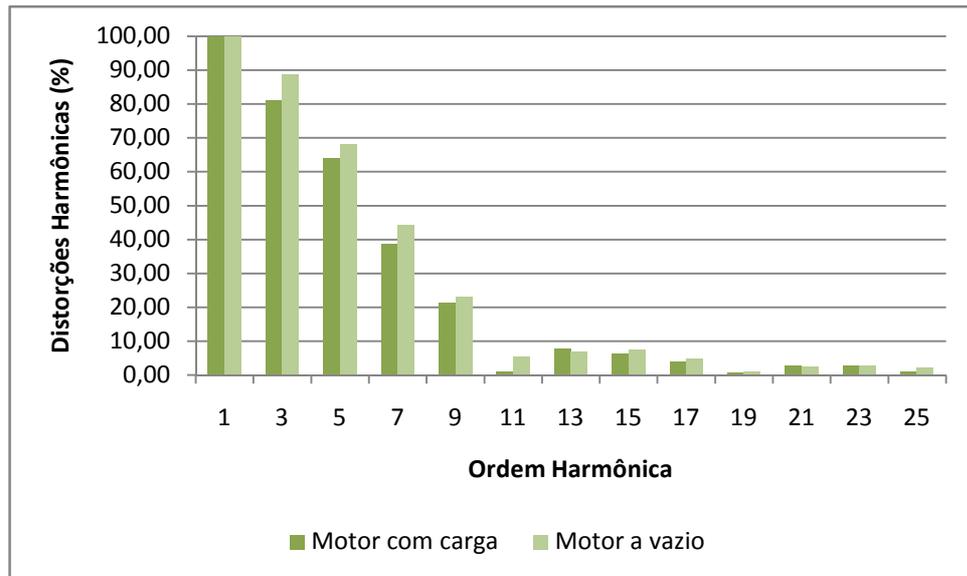
	<b>THD<sub>i</sub> = 124,13%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 10,04A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	88,63	-149,33
5	68,19	11,97
7	44,33	-159,63
9	23,04	34,82
11	5,44	-105,68
13	6,78	123,46
15	7,61	3,30
17	4,83	-117,48
19	1,06	44,20
21	2,67	-42,51
23	2,85	18,20
25	2,11	21,74

Na Tabela 15 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 15 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 12 Hz**

	<b>THD<sub>i</sub> = 118,29%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 11,67A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	81,01	-148,82
5	63,84	12,91
7	38,64	-152,10
9	21,51	32,13
11	0,92	-91,26
13	7,75	135,87
15	6,39	8,30
17	4,10	-109,86
19	0,74	88,47
21	2,82	-20,89
23	2,76	-45,80
25	1,18	47,93

Na Figura 31 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 12 Hz.



**Figura 31 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como foi visto quando o motor estava atuando com uma frequência de 6 Hz, nota-se no gráfico que não há uma diferença significativa nas distorções harmônicas quando o motor está a vazio em relação a quando ele atua com a carga. Este será o mesmo comportamento nas demais frequências como será mostrado a seguir. Utilizando do wattímetro alguns valores puderam ser coletados para análise e utilização nas simulações. Na Figura 32 são mostrados estes valores para o motor atuando a 12 Hz sem carga e a Figura 33 mostra para o motor atuando a 12 Hz com carga.

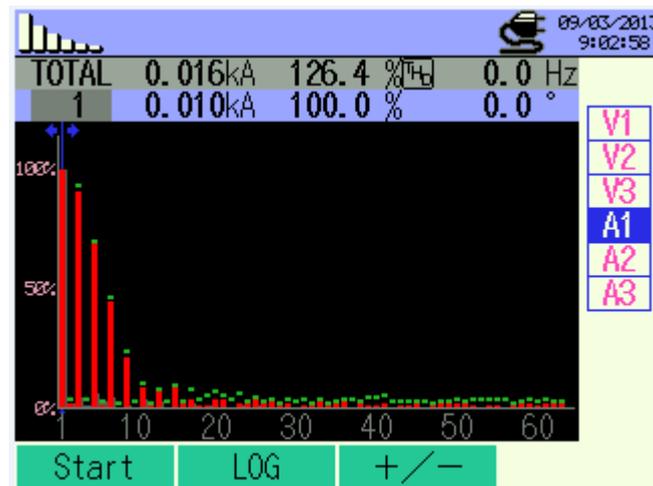
1	Urms	1	---	230.188	V	230.234	230.104
2	Irms	1	---	0.86113	A	0.86476	0.85394
3	P	1	---	123.467	W	124.062	122.365
4	S	1	---	198.221	VA	199.096	196.519
5	Q	1	---	-155.073	var	-153.774	-155.717
6	PF	1	---	0.62287		0.62313	0.62266
7	Phi	1	---	-51.474	deg	-51.455	-51.489
8	FreqU	1	---	60.019	Hz	60.021	60.018
9	Freql	1	---	60.015	Hz	60.023	60.015
10	Upeak	1	---	325.358	V	325.358	323.764
11	Umpeak	1	---	-332.304	V	-329.116	-332.304
12	Ippeak	1	---	2.48905	A	2.52438	2.48905

**Figura 32 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 12 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	225.993	V	227.990	225.606
2	Irms	1	---	2.11331	A	2.39816	0.78571
3	P	1	---	0.32925k	W	0.37822k	0.11012k
4	S	1	---	0.47759k	VA	0.54104k	0.17892k
5	Q	1	---	0.34596k	var	0.38687k	0.14102k
6	PF	1	---	0.68940		0.69907	0.61548
7	Phi	1	---	46.418	deg	52.013	45.648
8	FreqU	1	---	60.024	Hz	60.034	59.985
9	FreqI	1	---	60.011	Hz	60.068	59.982
10	Uppeak	1	---	305.813	V	322.977	303.982
11	Umpeak	1	---	-306.669	V	-305.108	-321.186
12	Ippeak	1	---	5.96837	A	6.39557	2.35476

**Figura 33 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 12 Hz com carga.**

A Figura 34 mostra as distorções harmônicas de corrente obtidas quando o motor atuava com carga a uma frequência de 12 Hz. Nesta figura pode ser observado o  $THD_i$  e a corrente.



**Figura 34 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 12 Hz.**

### 5.1.3 Medições do motor atuando a 18 Hz

Na Tabela 16 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 18 Hz.

**Tabela 16 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando vazio a uma frequência de 18 Hz.**

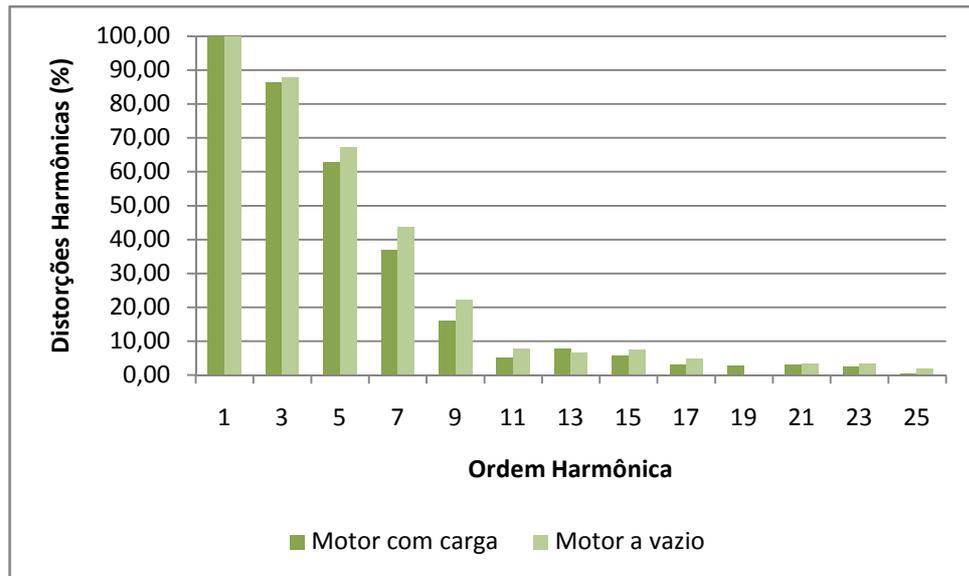
	<b>THD<sub>i</sub> = 122,90%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 10,30A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	87,90	-174,10
5	67,35	10,82
7	43,77	-161,94
9	22,33	31,47
11	7,71	-109,14
13	6,62	128,66
15	7,58	-1,35
17	4,95	-112,38
19	0,26	70,30
21	3,54	-19,67
23	3,31	-7,46
25	1,77	18,42

Na Tabela 17 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 17 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 18 Hz.**

	<b>THD<sub>i</sub> = 115,49%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 13,50A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	86,42	-148,82
5	62,82	12,91
7	37,01	-152,10
9	15,91	32,13
11	5,20	-91,26
13	7,83	135,87
15	5,82	8,30
17	3,11	-109,86
19	2,75	88,47
21	3,15	-20,89
23	2,40	-45,80
25	0,60	47,93

Na Figura 35 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 18 Hz.



**Figura 35 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como mostra o gráfico da Figura 35, não há uma diferença significativa entre as distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação ao motor atuando com carga em uma frequência de 18 Hz. A Figura 36 mostra os dados coletados quando o motor atuava sem a presença da carga, enquanto que a Figura 37 mostra os dados quando o motor atuava com a carga, dados estes coletados pelo wattímetro. Já a Figura 38 mostra as distorções harmônicas de corrente coletadas pelo analisador enquanto o motor atuava com a carga.

1	Urms	1	---	230.219	V	230.534	230.192
2	Irms	1	---	0.87499	A	0.88008	0.86732
3	P	1	---	125.577	W	126.651	124.506
4	S	1	---	201.439	VA	202.744	199.672
5	Q	1	---	-157.506	var	-156.050	-158.318
6	PF	1	---	0.62340		0.62469	0.62250
7	Phi	1	---	-51.435	deg	-51.341	-51.501
8	FreqU	1	---	59.995	Hz	60.042	59.991
9	FreqI	1	---	59.992	Hz	60.046	59.988
10	Uppeak	1	---	323.391	V	325.426	321.390
11	Umpeak	1	---	-333.695	V	-324.130	-334.509
12	Ippeak	1	---	2.59638	A	2.59638	2.53940

**Figura 36 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 18 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	224.783	V	227.853	224.783
2	Irms	1	---	2.90674	A	2.90674	0.81530
3	P	1	---	0.46404k	W	0.46404k	0.11495k
4	S	1	---	0.65339k	VA	0.65339k	0.18573k
5	Q	1	---	0.45998k	var	0.45998k	0.14589k
6	PF	1	---	0.71021		0.71021	0.61887
7	Phi	1	---	44.748	deg	51.767	44.748
8	FreqU	1	---	60.029	Hz	60.029	59.993
9	FreqI	1	---	60.040	Hz	60.041	59.993
10	Uppeak	1	---	304.117	V	322.061	302.659
11	Umpeak	1	---	-304.464	V	-302.056	-320.203
12	Ippeak	1	---	7.83781	A	7.83781	2.42486

Figura 37 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 18 Hz com carga.

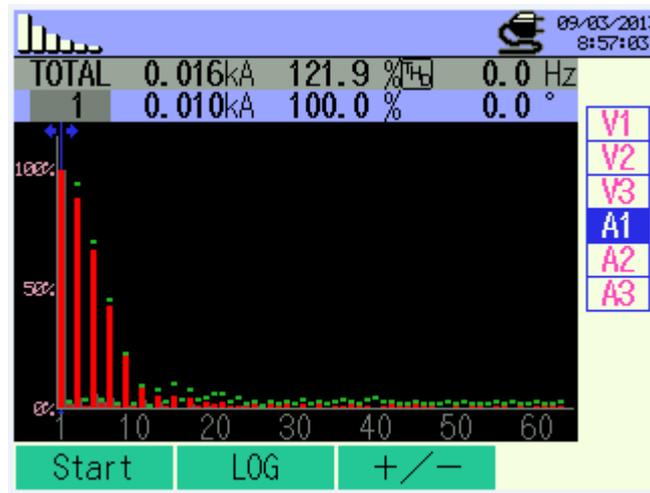


Figura 11 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 18 Hz.

#### 5.1.4 Medições do motor atuando a 24 Hz

Na Tabela 18 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 24 Hz.

**Tabela 18 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando vazio a uma frequência de 24 Hz.**

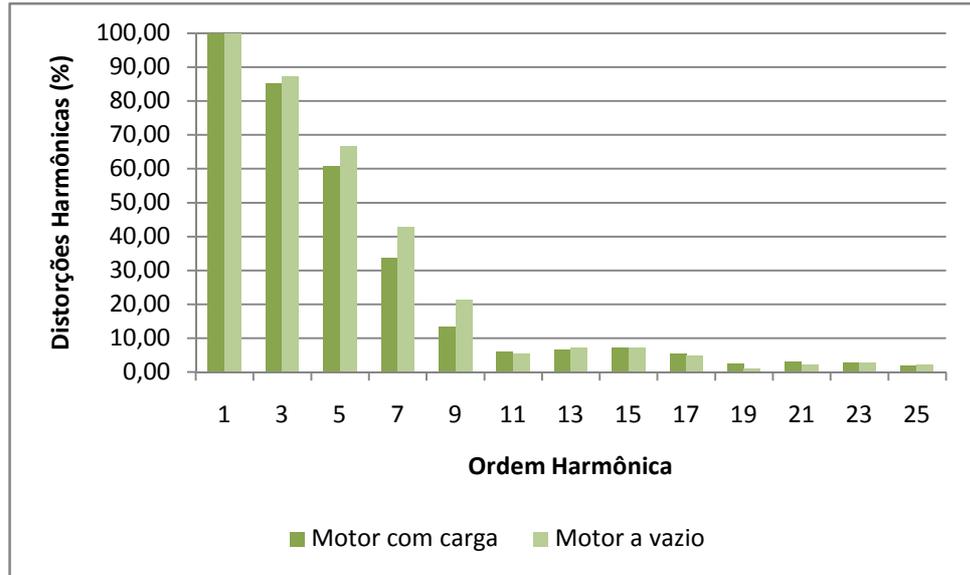
	<b>THD<sub>i</sub> = 121,64%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 10,77A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	87,37	-173,53
5	66,75	10,36
7	42,87	-162,55
9	21,42	31,57
11	5,34	-105,00
13	7,29	118,11
15	7,21	-0,69
17	4,74	-121,19
19	0,94	91,56
21	2,21	-18,53
23	2,72	15,34
25	2,31	36,55

Na Tabela 19 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 19 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 24 Hz.**

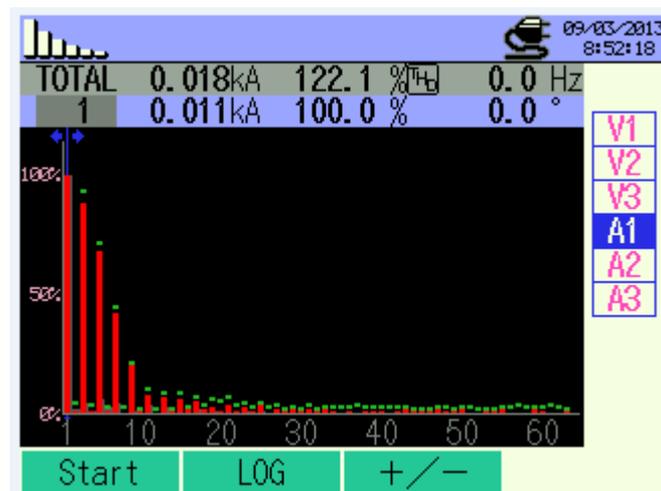
	<b>THD<sub>i</sub> = 111,93%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 15,70A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	85,29	-176,80
5	60,73	7,15
7	33,83	-165,56
9	13,40	36,54
11	6,05	-63,58
13	6,62	161,73
15	7,34	12,75
17	5,40	-117,77
19	2,50	128,76
21	3,18	-8,60
23	2,87	-84,07
25	1,97	92,28

Na Figura 39 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 24 Hz.



**Figura 39 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como mostra o gráfico da Figura 39, não há uma diferença significativa entre as distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação ao motor atuando com carga em uma frequência de 24 Hz. Da mesma forma que ocorreu para outras frequências, dados foram coletados através do wattímetro e do analisador de qualidade de energia elétrica. Estes valores foram utilizados para que a simulação pudesse ser realizada. Para que não haja repetição textual as figuras serão inseridas com as legendas para esta e as demais frequências analisadas.



**Figura 40 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 24 Hz.**

1	Urms	1	---	229.853	V	230.329	229.853
2	Irms	1	---	0.90055	A	0.91338	0.90055
3	P	1	---	129.418	W	131.705	129.418
4	S	1	---	206.994	VA	210.377	206.994
5	Q	1	---	-161.547	var	-161.547	-164.050
6	PF	1	---	0.62523		0.62611	0.62471
7	Phi	1	---	-51.301	deg	-51.236	-51.339
8	FreqU	1	---	60.037	Hz	60.037	59.986
9	Freql	1	---	60.036	Hz	60.036	59.992
10	Uppeak	1	---	323.052	V	326.003	321.797
11	Umpeak	1	---	-330.032	V	-324.299	-332.610
12	Ippeak	1	---	2.62442	A	2.69465	2.61978

**Figura 41 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 24 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	225.027	V	227.937	225.027
2	Irms	1	---	2.82821	A	2.82821	0.84428
3	P	1	---	0.44880k	W	0.44880k	0.11987k
4	S	1	---	0.63643k	VA	0.63643k	0.19234k
5	Q	1	---	0.45124k	var	0.45124k	0.15042k
6	PF	1	---	0.70519		0.70519	0.62284
7	Phi	1	---	45.155	deg	51.476	45.155
8	FreqU	1	---	60.010	Hz	60.032	59.990
9	Freql	1	---	59.987	Hz	60.037	59.955
10	Uppeak	1	---	303.405	V	322.909	302.998
11	Umpeak	1	---	-304.803	V	-302.090	-319.490
12	Ippeak	1	---	7.80801	A	8.06853	2.49110

**Figura 42 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 24 Hz com carga.**

#### 4.1.5 Medições do motor atuando a 30 Hz

Na Tabela 20 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 30 Hz.

**Tabela 20 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando vazio a uma frequência de 30 Hz.**

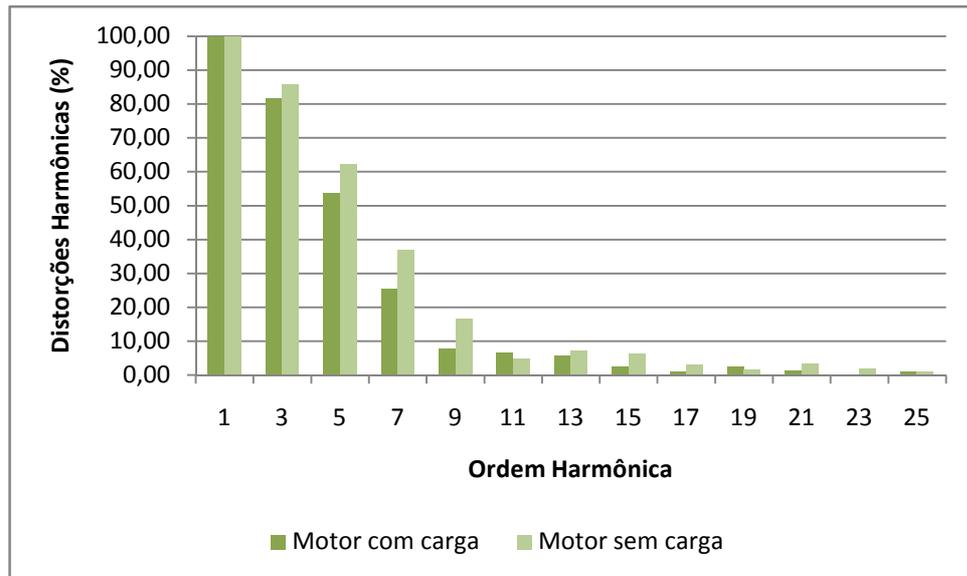
	<b>THD<sub>i</sub> = 114,80%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 13,68A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	85,82	-175,62
5	62,41	8,90
7	37,06	-163,24
9	16,51	35,46
11	4,88	-79,07
13	7,35	161,28
15	6,44	3,88
17	3,14	-122,21
19	1,63	117,06
21	3,28	-15,55
23	1,85	-62,26
25	1,09	76,00

Na Tabela 21 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 21 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 30 Hz.**

	<b>THD<sub>i</sub> = 102,77%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 22,19A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	81,72	-156,25
5	53,59	6,34
7	25,52	-164,54
9	7,81	57,06
11	6,47	-35,89
13	5,89	92,01
15	2,48	39,78
17	1,19	-70,68
19	2,49	97,27
21	1,29	21,81
23	0,17	-70,14
25	1,04	56,40

Na Figura 43 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 30 Hz.



**Figura 43 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

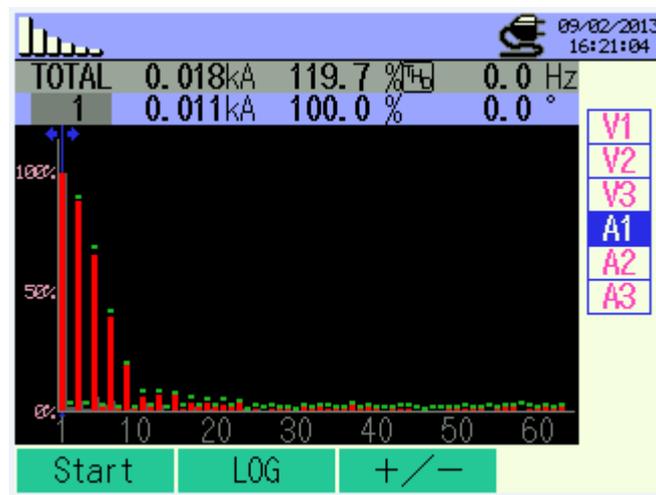
Como mostra o gráfico da Figura 43, não há uma diferença significativa entre as distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação ao motor atuando com carga em uma frequência de 30 Hz.

1	Urms	1	---	229.764	V	229.992	229.692
2	Irms	1	---	0.94505	A	0.95160	0.93906
3	P	1	---	136.436	W	137.712	135.554
4	S	1	---	217.138	VA	218.756	215.752
5	Q	1	---	-168.921	var	-167.851	-169.970
6	PF	1	---	0.62834		0.62953	0.62829
7	Phi	1	---	-51.072	deg	-50.985	-51.076
8	FreqU	1	---	60.024	Hz	60.024	60.008
9	Freql	1	---	60.017	Hz	60.020	60.007
10	Upeak	1	---	324.680	V	325.053	321.661
11	Umpeak	1	---	-328.472	V	-322.705	-330.032
12	Ipeak	1	---	2.82649	A	2.82649	2.75516

**Figura 44 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 30 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	224.339	V	227.878	224.143
2	Irms	1	---	3.12362	A	3.29903	0.90274
3	P	1	---	0.50352k	W	0.53431k	0.12889k
4	S	1	---	0.70075k	VA	0.73945k	0.20571k
5	Q	1	---	0.48736k	var	0.51118k	0.16033k
6	PF	1	---	0.71855		0.72339	0.62626
7	Phi	1	---	44.065	deg	51.226	43.665
8	FreqU	1	---	59.995	Hz	60.016	59.994
9	FreqI	1	---	59.987	Hz	60.027	58.656
10	Uppeak	1	---	304.491	V	322.366	299.844
11	Umpeak	1	---	-301.106	V	-297.171	-319.117
12	Ippeak	1	---	7.96034	A	8.58791	2.62522

**Figura 45 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 30 Hz com carga.**



**Figura 46 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 30 Hz.**

### 5.1.6 Medições do motor atuando a 36 Hz

Na Tabela 22 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 36 Hz.

**Tabela 22 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando vazio a uma frequência de 36 Hz.**

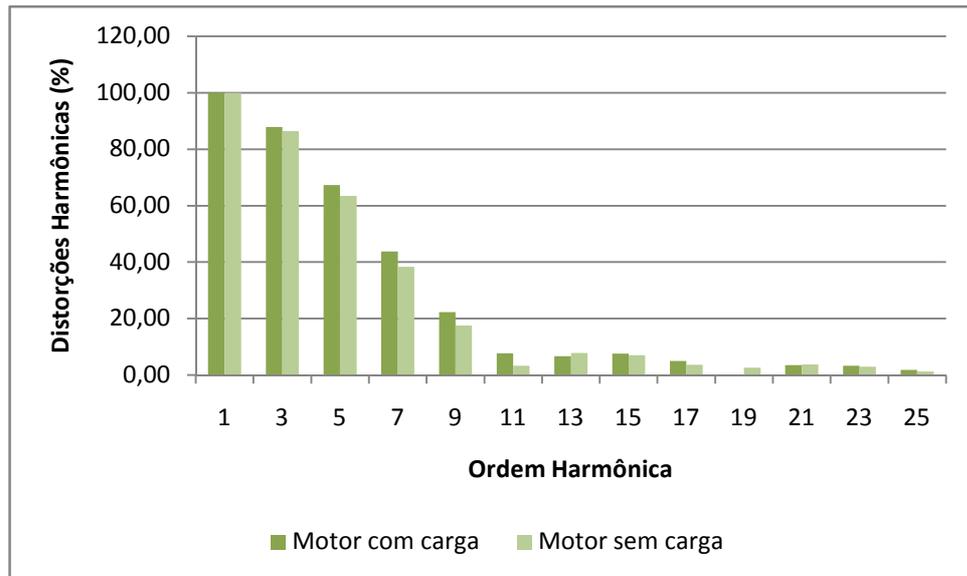
	<b>THD<sub>i</sub> = 116,61%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 12,73A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	86,40	-151,53
5	63,49	9,11
7	38,32	-163,53
9	17,48	34,41
11	3,29	-84,83
13	7,84	157,69
15	7,05	5,26
17	3,66	-144,45
19	2,63	106,96
21	3,68	-28,21
23	2,91	-12,03
25	1,22	58,50

Na Tabela 23 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 23 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 36 Hz.**

	<b>THD<sub>i</sub> = 102,67%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 21,79A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	87,90	-177,02
5	67,35	6,15
7	43,77	-165,50
9	22,33	49,09
11	7,71	-31,22
13	6,62	71,43
15	7,58	32,95
17	4,95	-55,75
19	0,26	85,72
21	3,54	4,82
23	3,31	-62,66
25	1,77	77,60

Na Figura 47 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 36 Hz.



**Figura 47 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como mostra o gráfico da Figura 47, não há uma diferença significativa entre as distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação ao motor atuando com carga em uma frequência de 36 Hz.



**Figura 12 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 36 Hz.**

1	Urms	1	---	229.716	V	229.887	229.324
2	Irms	1	---	0.99552	A	1.00235	0.99084
3	P	1	---	144.747	W	145.726	143.887
4	S	1	---	228.686	VA	230.148	227.683
5	Q	1	---	-177.047	var	-176.454	-178.136
6	PF	1	---	0.63295		0.63364	0.63196
7	Phi	1	---	-50.732	deg	-50.681	-50.805
8	FreqU	1	---	60.012	Hz	60.016	59.988
9	Freql	1	---	60.008	Hz	60.014	59.989
10	Uppeak	1	---	322.068	V	323.866	320.033
11	Umpeak	1	---	-328.268	V	-319.890	-331.423
12	Ippeak	1	---	2.86447	A	2.92520	2.86447

**Figura 13 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 36 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	223.017	V	227.540	221.281
2	Irms	1	---	3.88787	A	4.25883	0.91534
3	P	1	---	0.63540k	W	0.70092k	0.12682k
4	S	1	---	0.86706k	VA	0.94642k	0.20527k
5	Q	1	---	0.58997k	var	0.60392k	-0.63653k
6	PF	1	---	0.73282		0.74060	0.61783
7	Phi	1	---	42.877	deg	51.842	-44.484
8	FreqU	1	---	59.985	Hz	60.021	59.980
9	Freql	1	---	61.202	Hz	61.336	58.672
10	Uppeak	1	---	297.062	V	321.111	294.383
11	Umpeak	1	---	-297.714	V	-293.813	-318.439
12	Ippeak	1	---	10.0141	A	10.8216	2.63074

**Figura 14 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 36 Hz com carga.**

### 5.1.7 Medições do motor atuando a 42 Hz

Na Tabela 24 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 42 Hz.

**Tabela 24 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando vazio a uma frequência de 42 Hz.**

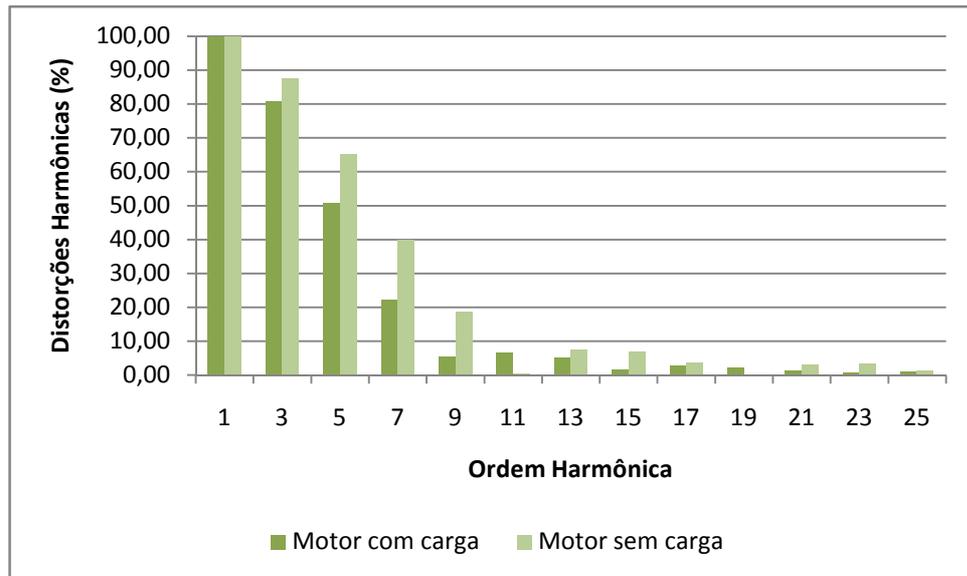
	<b>THD<sub>i</sub> = 119,15%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 12,03A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	87,40	-174,75
5	65,33	10,26
7	39,90	-161,60
9	18,74	35,57
11	0,60	-88,33
13	7,44	159,48
15	6,94	7,93
17	3,67	-134,59
19	0,09	89,82
21	3,01	-30,88
23	3,31	-98,67
25	1,40	61,94

Na Tabela 25 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 25 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 42 Hz.**

	<b>THD<sub>i</sub> = 98,94%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 26,06A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	80,74	-177,04
5	50,78	7,05
7	22,18	-161,72
9	5,34	76,69
11	6,73	-22,86
13	5,26	-102,30
15	1,51	70,40
17	2,72	-46,12
19	2,18	57,56
21	1,31	43,24
23	0,73	-73,22
25	1,13	32,52

Na Figura 51 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 42 Hz.



**Figura 51 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como mostra o gráfico da Figura 52, não há uma diferença significativa entre as distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação ao motor atuando com carga em uma frequência de 42 Hz.

1	Urms	1	---	229.190	V	229.816	229.190
2	Irms	1	---	1.02546	A	1.04083	1.02546
3	P	1	---	149.235	W	151.956	149.235
4	S	1	---	235.025	VA	239.122	235.025
5	Q	1	---	-181.564	var	-181.564	-184.632
6	PF	1	---	0.63497		0.63547	0.63473
7	Phi	1	---	-50.582	deg	-50.545	-50.600
8	FreqU	1	---	59.993	Hz	60.019	59.992
9	Freql	1	---	59.985	Hz	60.017	59.985
10	Uppeak	1	---	318.032	V	324.171	318.032
11	Umpeak	1	---	-323.689	V	-323.689	-330.201
12	Ippeak	1	---	2.97157	A	3.02126	2.97157

**Figura 52 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 42 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	223.026	V	227.402	221.169
2	Irms	1	---	3.82945	A	4.97395	0.98446
3	P	1	---	0.62817k	W	0.82920k	0.14170k
4	S	1	---	0.85407k	VA	1.10008k	0.22363k
5	Q	1	---	0.57865k	var	0.64351k	-0.72291k
6	PF	1	---	0.73551		0.75377	0.63272
7	Phi	1	---	42.650	deg	50.749	-42.242
8	FreqU	1	---	60.023	Hz	60.033	59.986
9	FreqI	1	---	60.015	Hz	61.352	58.772
10	Upeak	1	---	297.300	V	320.534	290.923
11	Umpeak	1	---	-295.441	V	-290.828	-317.421
12	Ipeak	1	---	9.37940	A	11.5188	2.81840

Figura 53 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 42 Hz com carga.



Figura 54 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 42 Hz.

### 5.1.8 Medições do motor atuando a 48 Hz

Na Tabela 26 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 48 Hz.

**Tabela 26 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando vazio a uma frequência de 48 Hz.**

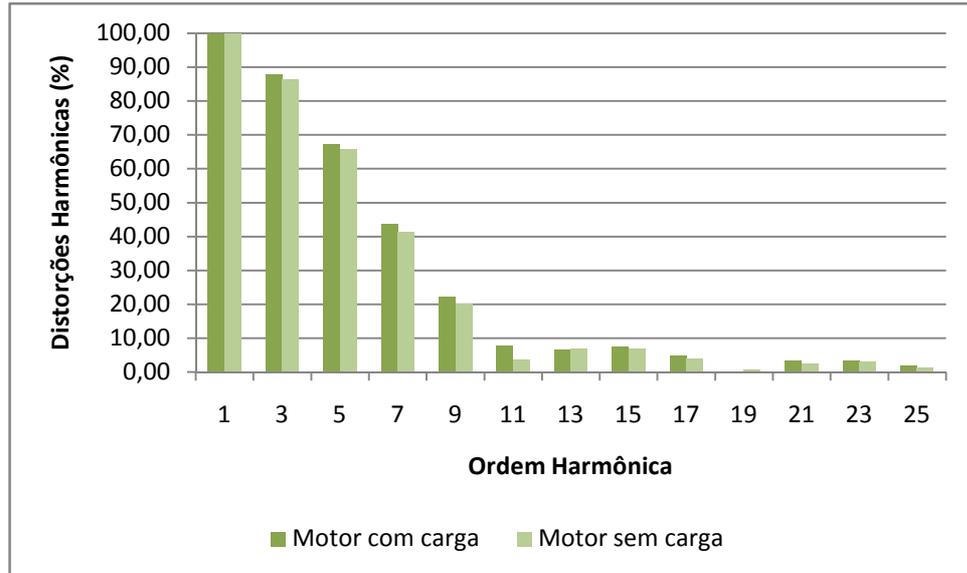
	<b>THD<sub>i</sub> = 119,51%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 11,42A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	86,49	-174,70
5	65,74	9,20
7	41,43	-161,70
9	20,04	31,44
11	3,55	-97,71
13	6,87	123,21
15	6,84	2,93
17	4,04	-144,05
19	0,63	101,48
21	2,50	-43,44
23	3,18	39,35
25	1,41	48,34

Na Tabela 27 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 27 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 48 Hz.**

	<b>THD<sub>i</sub> = 95,23%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 26,06A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	87,90	-177,79
5	67,35	6,63
7	43,77	-159,96
9	22,33	97,42
11	7,71	-18,08
13	6,62	-143,76
15	7,58	88,84
17	4,95	-30,49
19	0,26	-30,62
21	3,54	56,35
23	3,31	-46,94
25	1,77	-21,00

Na Figura 55 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 48 Hz.



**Figura 55 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como mostra o gráfico da Figura 55, não há uma diferença significativa entre as distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação ao motor atuando com carga em uma frequência de 48 Hz.



**Figura 56 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 48 Hz.**

1	Urms	1	---	228.782	V	229.670	228.782
2	Irms	1	---	1.07920	A	1.09553	1.07028
3	P	1	---	157.811	W	160.852	156.522
4	S	1	---	246.902	VA	251.560	245.285
5	Q	1	---	-189.885	var	-188.853	-193.414
6	PF	1	---	0.63916		0.63994	0.63812
7	Phi	1	---	-50.271	deg	-50.213	-50.348
8	FreqU	1	---	60.000	Hz	60.031	60.000
9	FreqI	1	---	60.004	Hz	60.030	59.995
10	Uppeak	1	---	320.644	V	323.255	319.490
11	Umpeak	1	---	-324.232	V	-319.076	-330.405
12	Ippeak	1	---	3.10540	A	3.15641	3.10540

**Figura 57 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 48 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	223.430	V	227.231	223.328
2	Irms	1	---	3.52348	A	3.54655	1.04772
3	P	1	---	0.57293k	W	0.57762k	0.15177k
4	S	1	---	0.78725k	VA	0.79217k	0.23806k
5	Q	1	---	0.53992k	var	0.54212k	-0.54207k
6	PF	1	---	0.72776		0.72916	0.63732
7	Phi	1	---	43.301	deg	50.408	-43.567
8	FreqU	1	---	59.992	Hz	60.008	59.983
9	FreqI	1	---	59.987	Hz	60.045	59.981
10	Uppeak	1	---	297.435	V	319.686	296.689
11	Umpeak	1	---	-299.240	V	-296.425	-316.607
12	Ippeak	1	---	8.96655	A	8.96655	2.98619

**Figura 58 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 48 Hz com carga.**

### 5.1.9 Medições do motor atuando a 54 Hz

Na Tabela 28 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 54 Hz.

**Tabela 28 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando vazio a uma frequência de 54 Hz.**

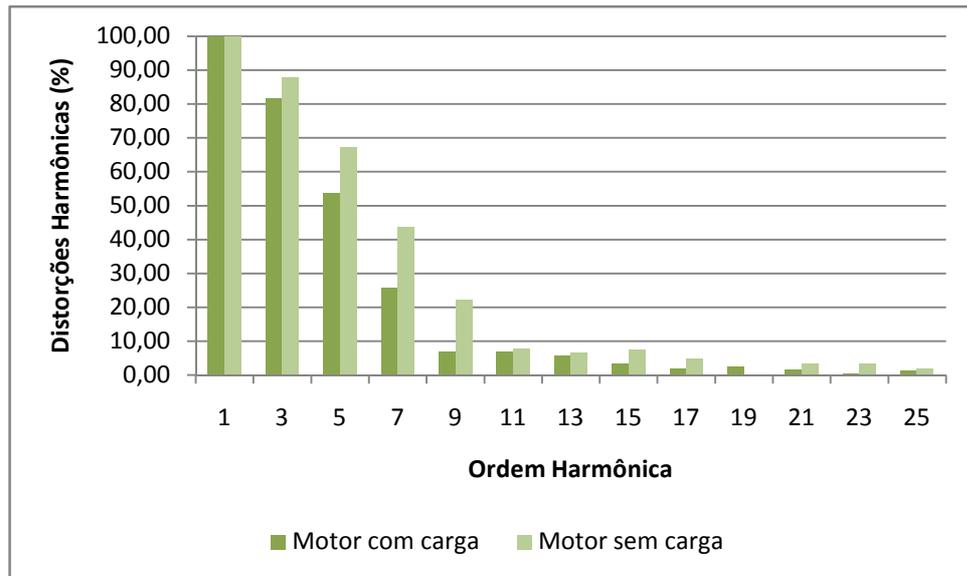
	<b>THD<sub>i</sub> = 114,86%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 14,41A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	87,90	-175,43
5	67,35	8,96
7	43,77	-163,29
9	22,33	37,51
11	7,71	-74,27
13	6,62	114,57
15	7,58	15,31
17	4,95	-128,14
19	0,26	120,84
21	3,54	-23,70
23	3,31	-91,71
25	1,77	76,09

Na Tabela 29 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 29 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 54 Hz.**

	<b>THD<sub>i</sub> = 104,02%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 22,20A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	81,76	-146,11
5	53,69	6,57
7	25,83	-163,55
9	6,91	59,37
11	6,77	-39,89
13	5,90	19,87
15	3,46	41,70
17	1,84	-70,82
19	2,52	65,43
21	1,64	27,73
23	0,54	-61,45
25	1,29	75,15

Na Figura 59 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 54 Hz.



**Figura 59 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como mostra o gráfico da Figura 59, não há uma diferença significativa entre as distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação ao motor atuando com carga em uma frequência de 54 Hz.

1	Urms	1	---	228.865	V	228.943	228.700
2	Irms	1	---	1.09189	A	1.09296	1.08255
3	P	1	---	0.16129k	W	0.16170k	0.15992k
4	S	1	---	0.24989k	VA	0.25023k	0.24761k
5	Q	1	---	0.19088k	var	0.19096k	0.18904k
6	PF	1	---	0.64542		0.64623	0.64530
7	Phi	1	---	49.803	deg	49.812	49.742
8	FreqU	1	---	60.018	Hz	60.035	60.015
9	FreqI	1	---	60.010	Hz	60.038	60.010
10	Upeak	1	---	317.380	V	320.500	315.921
11	Umpeak	1	---	-316.302	V	-315.624	-319.117
12	Ipeak	1	---	3.05589	A	3.17677	3.03933

**Figura 60 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 54 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	220.992	V	227.112	220.973
2	Irms	1	---	4.97788	A	5.00377	1.06558
3	P	1	---	0.82421k	W	0.82968k	0.15448k
4	S	1	---	1.10007k	VA	1.10570k	0.24173k
5	Q	1	---	-0.72858k	var	0.65575k	-0.73088k
6	PF	1	---	0.74924		0.75037	0.63907
7	Phi	1	---	-41.476	deg	50.277	-44.803
8	FreqU	1	---	60.020	Hz	60.024	59.966
9	FreqI	1	---	59.962	Hz	61.227	58.729
10	Uppeak	1	---	294.857	V	319.110	290.651
11	Umpeak	1	---	-294.254	V	-291.269	-316.980
12	Ippeak	1	---	12.3665	A	12.4002	3.06512

Figura 61 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 54 Hz com carga.



Figura 62 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 54 Hz.

### 5.1.10 Medições do motor atuando a 60 Hz

Na Tabela 30 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua a vazio e com uma frequência de 60 Hz.

**Tabela 30 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando vazio a uma frequência de 60 Hz.**

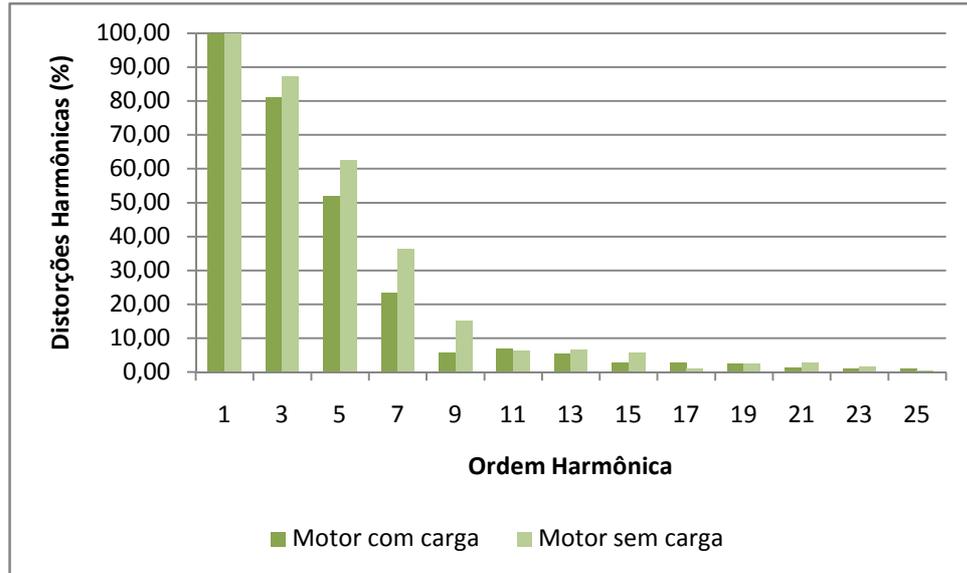
	<b>THD<sub>i</sub> = 115,24%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 14,73A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	87,21	-175,63
5	62,42	8,01
7	36,36	-163,76
9	15,23	36,28
11	6,34	-70,31
13	6,69	119,99
15	5,87	6,85
17	0,97	-125,42
19	2,61	90,03
21	2,79	-12,20
23	1,58	-68,03
25	0,52	83,69

Na Tabela 31 são mostrados os dados coletados individualmente para cada ordem harmônica quando o motor atua com a carga.

**Tabela 31 - Dados distorções harmônicas de corrente do motor atuando com uma carga a uma frequência de 60 Hz.**

	<b>THD<sub>i</sub> = 100,16%</b>	<b>I<sub>RMS</sub> = 25,17A</b>
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Módulo (%)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
1	100	0,00
3	81,02	-177,11
5	51,84	7,05
7	23,34	-161,80
9	5,64	69,88
11	6,94	-26,63
13	5,39	-48,51
15	2,81	61,54
17	2,96	-49,08
19	2,53	67,24
21	1,36	36,94
23	1,12	-65,92
25	1,15	77,07

Na Figura 63 é mostrado um gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com a carga a uma frequência de 60 Hz.



**Figura 63 - Gráfico comparativo das distorções harmônicas do motor atuando a vazio e com carga.**

Como mostra o gráfico da Figura 63, não há uma diferença significativa entre as distorções harmônicas do motor atuando a vazio em relação ao motor atuando com carga em uma frequência de 60 Hz.



**Figura 64 - Distorções harmônicas do motor atuando com a carga e com frequência de 60 Hz.**

1	Urms	1	---	228.765	V	228.943	226.174
2	Irms	1	---	1.11140	A	1.11451	1.05307
3	P	1	---	0.16440k	W	0.16493k	0.15382k
4	S	1	---	0.25425k	VA	0.25477k	0.23824k
5	Q	1	---	0.19395k	var	0.19420k	0.18193k
6	PF	1	---	0.64660		0.64905	0.64496
7	Phi	1	---	49.714	deg	49.838	49.530
8	FreqU	1	---	60.023	Hz	60.035	60.002
9	Freql	1	---	60.026	Hz	60.038	59.997
10	Uppeak	1	---	314.395	V	320.500	314.056
11	Umpeak	1	---	-317.455	V	-311.248	-319.117
12	Ippeak	1	---	3.09232	A	3.17677	2.96317

**Figura 65 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 60 Hz sem carga.**

1	Urms	1	---	222.192	V	227.112	221.563
2	Irms	1	---	4.33562	A	4.59543	1.12808
3	P	1	---	0.71719k	W	0.76249k	0.16472k
4	S	1	---	0.96334k	VA	1.01818k	0.25616k
5	Q	1	---	0.64317k	var	0.64317k	-0.67476k
6	PF	1	---	0.74448		0.74887	0.64296
7	Phi	1	---	41.885	deg	49.987	-42.077
8	FreqU	1	---	60.000	Hz	60.008	59.979
9	Freql	1	---	58.752	Hz	61.227	58.737
10	Uppeak	1	---	292.483	V	318.805	291.330
11	Umpeak	1	---	-293.271	V	-292.762	-315.556
12	Ippeak	1	---	10.2520	A	10.6285	3.11700

**Figura 66 - Valores obtidos quando o motor atua a uma frequência de 60 Hz com carga.**

Analisando as tabelas acima, pode-se concluir que, na grande maioria das frequências, as maiores distorções estão nas ordens harmônicas 3, 5, 7 e 9. Sendo assim, estas ordens que serão o foco para que sejam atenuadas de forma a diminuir as correntes harmônicas presentes no sistema. Além de constatar-se os altos  $THD_i$ 's.

## 5.2 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO SIMULADO

A partir da coleta dos dados reais, tornou-se possível a simulação do circuito com o auxílio de um software. Neste caso, o software escolhido foi o PSIM.

Com o objetivo de aproximar-se o máximo possível dos resultados reais, o circuito foi modelado utilizando-se a alimentação da rede e a carga não-linear presentes no circuito real.

### 5.2.1 Modelagem da carga

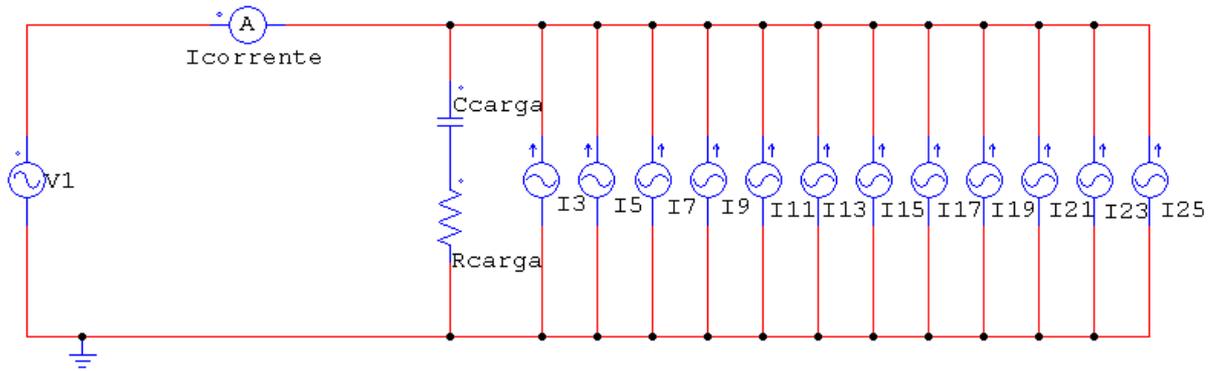
Através dos dados coletados das correntes harmônicas decidiu-se que as mesmas seriam representadas por fontes de corrente em paralelo, uma para cada ordem harmônica. Tendo em vista que a carga tem um comportamento capacitivo, decidiu-se que esta seria representada por um indutor e um capacitor. Para que fosse possível chegar ao valor da impedância da carga, utilizou-se a Equação 7. A partir da definição da impedância da carga foi possível determinar os valores do resistor e do capacitor, a Equação 8 mostra como calcular o capacitor. O cálculo do resistor é mostrado pela Equação 9.

$$Z_{carga} = \frac{V \angle \theta}{I \angle \Phi} = Z \angle \theta - \Phi = R + jX(7)$$

$$C_{carga} = \frac{1}{W \cdot X_{carga}} \quad (8)$$

$$R_{carga} = Z \cos(\theta - \Phi) \quad (9)$$

A alimentação da rede foi representada por uma fonte de tensão (V1), enquanto que o medidor de corrente (Icorrente) indica onde é realizada a medição de corrente no circuito. A Figura 67 mostra o modelo do circuito a ser simulado.



**Figura 67- Modelo do circuito a ser simulado.**

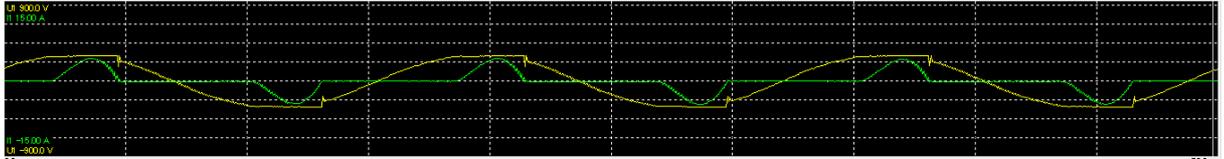
### 5.2.2 Simulações

Com a determinação do circuito a ser implementado no software, partiu-se para as simulações com o objetivo de realizar a comparação dos dados simulados com os dados reais. Os dados utilizados para a simulação foram retirados da coleta realizada através do analisador de qualidade de energia e do wattímetro. Tendo em vista que o objetivo é analisar o comportamento do circuito quando uma carga é aplicada ao motor e que, como visto anteriormente, houve uma diferença muito pequena entre o  $THD_i$  do motor a vazio em relação ao motor com carga, foram realizadas as simulações com os dados coletados quando a carga era aplicada.

Tendo em vista que as variações de frequências propostas não apresentarão diferenças significativas, decidiu-se que serão apresentados os resultados da maior e da menor frequência analisada, 60 e 6 Hz, respectivamente.

#### 5.2.2.1 Resultados do motor atuando a 6 Hz

Na Figura 68 é mostrada a forma de onda real adquirida com a utilização do wattímetro.



**Figura 68 - Forma de onda de tensão e corrente reais a 6 Hz.**

A forma de onda de tensão está na cor amarela e é apenas apresentada para informação, enquanto que a onda de corrente está na cor verde, sendo o foco principal do trabalho. Nota-se na forma de onda de corrente uma elevada distorção harmônica com um  $THD_i$  alcançando 116,88%.

Para que fosse possível realizar a simulação da onda de corrente do motor atuando a 6 Hz com a carga, as ordens harmônicas coletadas foram utilizadas. A carga foi representada pelo resistor e capacitor, como foi determinado anteriormente. Já para fonte de tensão que representa a rede de alimentação foram utilizados os seguintes parâmetros coletados: tensão de pico de 311V, frequência de 60Hz e um ângulo de fase medido de  $-47,32^\circ$ .

Conforme a Equação 11 foi determinada a impedância da carga.

$$Z_{carga} = \frac{V_p \angle \theta}{I_p \angle \Phi} = \frac{311 \angle -47,32^\circ}{12,05 \angle 0^\circ} = 25,81 \angle -47,32^\circ \quad (10)$$

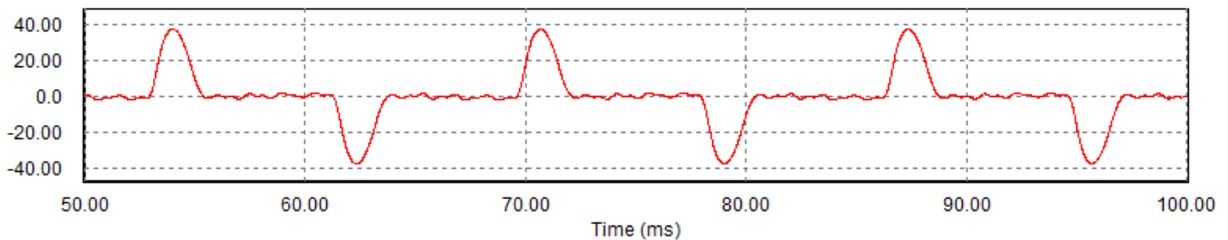
Determinando a impedância da carga foi possível encontrar o valor do resistor que representou a carga, através da Equação 11.

$$R_{carga} = 25,81 \cos(-47,32) = 17,5 \Omega (11)$$

Por fim, foi encontrado o valor do capacitor utilizando a Equação 12.

$$C_{carga} = \frac{1}{\omega |X_c|} = \frac{1}{2\pi \cdot 6 \cdot |25,81 \text{sen}(-47,32)|} = 1,4 \text{mF} \quad (12)$$

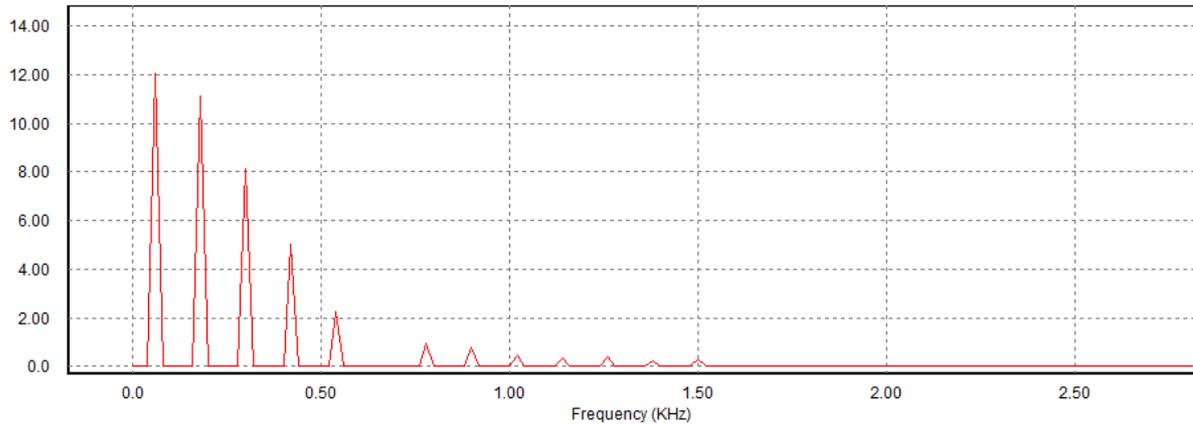
Na Figura 69 é mostrado o resultado da simulação da forma de onda de corrente do circuito, medida na carga.



**Figura 69 - Forma de onda de corrente simulada a 6 Hz.**

Nota-se que foi possível uma boa aproximação entre a forma de onda de corrente simulada e forma de onda de corrente real. O  $\text{THD}_i$  da simulação foi de 123,44%, valor este muito próximo do real. Há esta diferença devido ao fato de que na simulação foram consideradas as harmônicas da 3ª a 25ª ordem, que são as mais significativas.

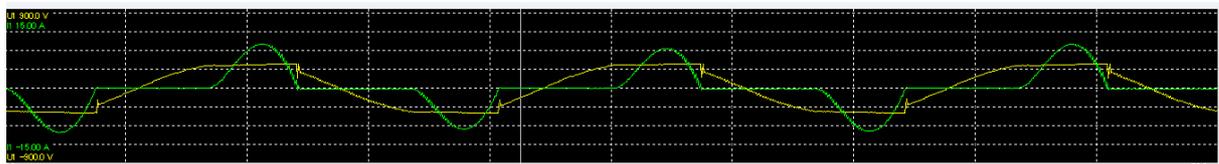
Após a simulação da forma de onda de corrente foi possível visualizar as principais harmônicas e suas amplitudes com a utilização da função FFT, como é apresentada na Figura 70. As harmônicas que apresentam maior magnitude são as da 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem.



**Figura 70 - FFT do formato de onda de corrente simulado.**

### 5.2.2.2 Resultados do motor atuando a 60 Hz

Na Figura 71 é mostrada a forma de onda real adquirida com a utilização do wattímetro.

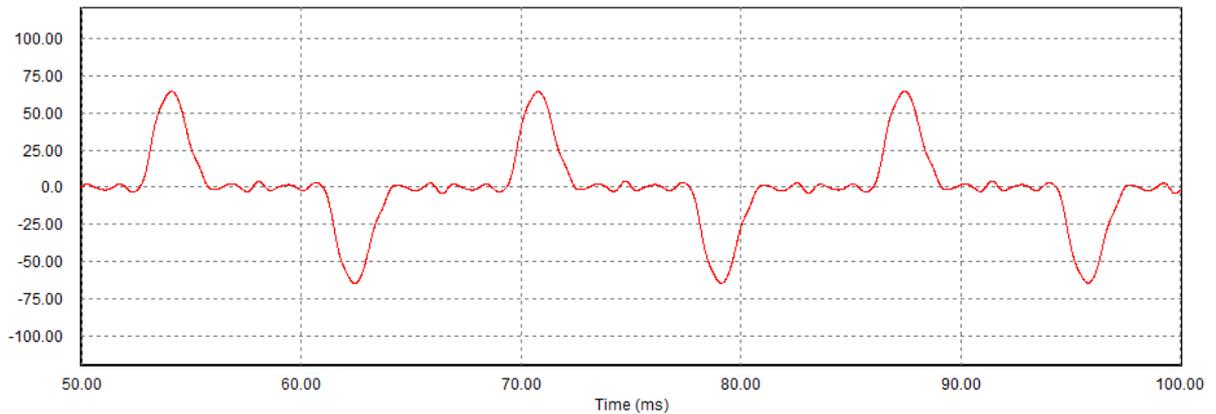


**Figura 71 - Forma de onda de tensão e corrente reais a 60 Hz.**

Como foi visto anteriormente, a forma de onda de tensão está na cor amarela e é apenas apresentada para informação, enquanto que a onda de corrente está na cor verde, sendo o foco principal do trabalho. Nota-se na forma de onda de corrente uma elevada distorção harmônica com um  $THD_i$  alcançando 100,16%.

Utilizando a mesma metodologia para modelagem do circuito a 60 Hz, obteve-se o valor de  $9,19\Omega$  para o resistor da carga e  $321,74\mu\text{F}$  para o capacitor da carga. O ângulo de fase medido foi de  $-41,88^\circ$ , com tensão de pico de 311V e frequência de 60 Hz. Com a obtenção dos valores para o capacitor e indutor da carga, fonte de tensão e amplitudes e ângulo de fase

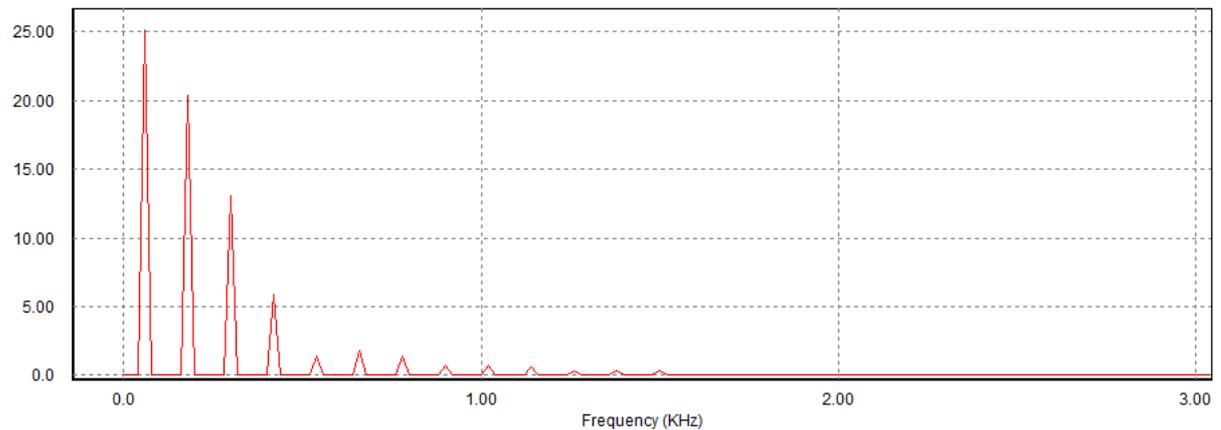
das ordens harmônicas, o circuito foi simulado e a seguinte forma de onda de corrente foi gerada, conforme mostra a Figura 72.



**Figura 72 - Forma de onda de corrente simulada a 60 Hz.**

Novamente é possível notar uma boa aproximação da forma de onda de corrente simulada e real. O  $THD_i$  da simulação foi de 99,58%, valor este próximo do real. Há esta diferença devido ao fato de que na simulação foram consideradas as harmônicas da 3ª a 25ª ordem, que são as mais significativas.

Após a simulação da forma de onda de corrente foi possível visualizar as principais harmônicas e suas amplitudes com a utilização da função FFT, como é apresentada na Figura 73. As harmônicas que apresentam maior magnitude são as da 3ª, 5ª e 7ª ordem.



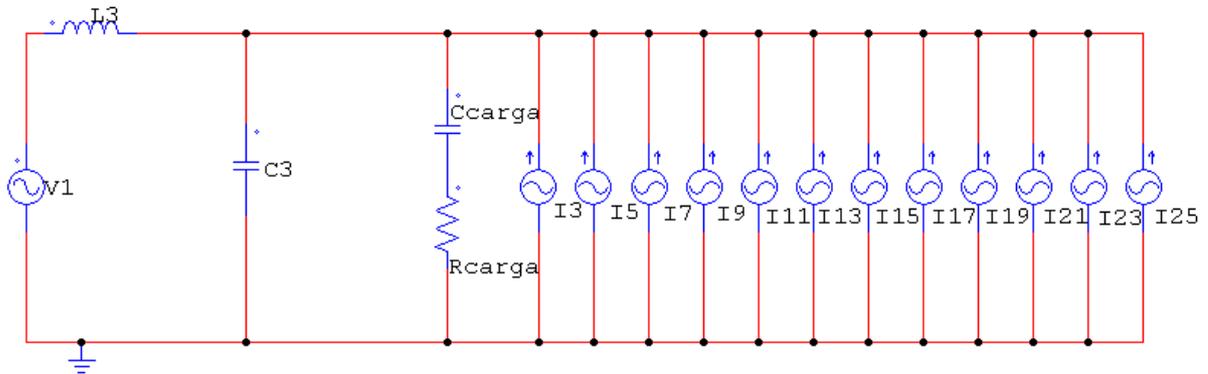
**Figura 73 - FFT do formato de onda de corrente simulado a 60 Hz.**

### **5.3 PROJETO DE FILTROS PASSIVOS**

Após a realização da modelagem e simulação do circuito foi possível projetar filtros. A função de um filtro é atenuar as frequências harmônicas que não são desejadas, permitindo que apenas passem as frequências desejadas. Com esta meta, foram simulados e projetados filtros que fossem capazes de atenuar as maiores distorções harmônicas presentes nos circuitos simulados para frequências de 6 e 60 Hz. A seguir serão apresentadas as topologias dos filtros passivos simulados e seus resultados.

#### **5.3.1 Filtro PASSA-BAIXA para harmônica de 3ª ordem**

Este filtro possui sua frequência de corte de 180Hz por ser para harmônica de 3ª ordem. O objetivo deste filtro é de bloquear que frequências superiores a frequência de corte circulem no circuito, permitindo que apenas frequências inferiores a de corte circulem. A Figura 74 mostra a topologia do filtro.



**Figura 74 – Filtro passa-baixa para harmônica de 3ª ordem.**

Com a determinação do modelo do filtro, partiu-se para o projeto. Foi utilizada a Equação 13 da frequência de corte.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (13)$$

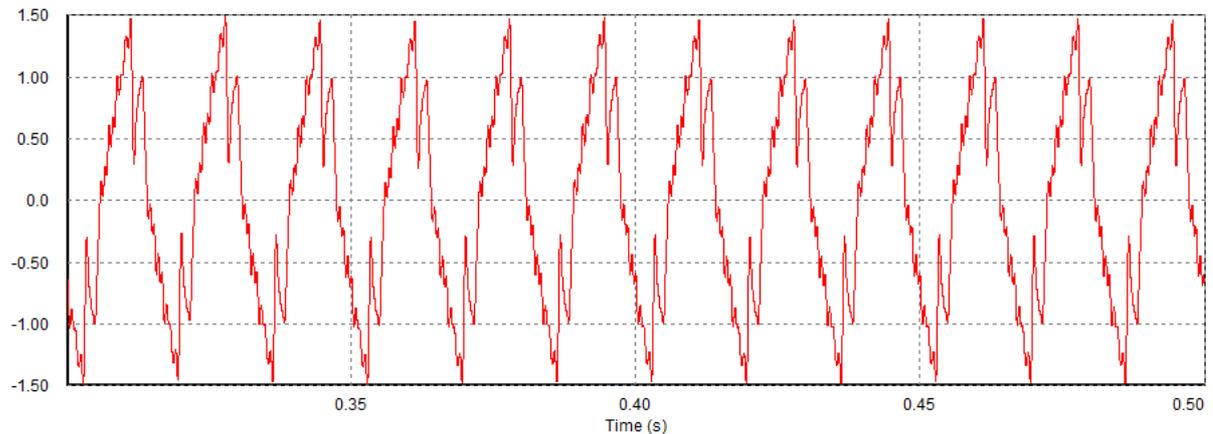
Como na Equação 13 apenas a frequência de corte era conhecida para a realização do projeto do filtro, ou seja, a 3ª ordem harmônica tem uma frequência de corte de 180 Hz (3x60Hz), a 5ª ordem tem uma frequência de 300 Hz (5x60Hz), assim sucessivamente. Com isso, a Equação 13 foi manipulada de forma que o “L” foi isolado como é mostrado na Equação 14.

$$L = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 C} \quad (14)$$

Para que fosse possível determinar os valores para o indutor e o capacitor, foram atribuídos valores para o capacitor e os mesmos testados no filtro até que se encontrasse a melhor resposta. Então se determinou que o valor do capacitor utilizado fosse de 1µF, com isso obteve-se o valor para o indutor utilizando a Equação 14 e é mostrado na Equação 15.

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 180)^2 \times 1 \times 10^{-6}} = 782 \text{mH} \quad (15)$$

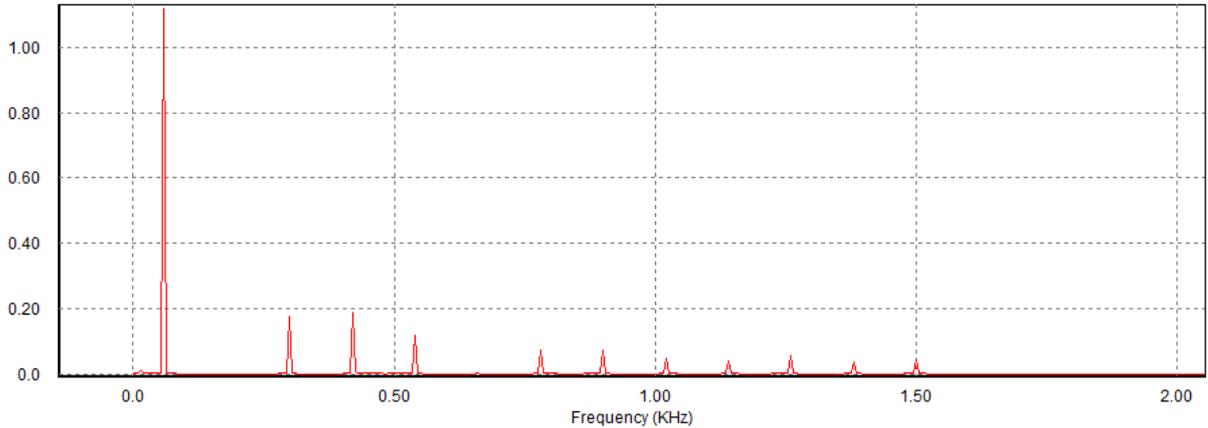
A Figura 75 mostra o resultado obtido após a aplicação do filtro no circuito atuando a 6 Hz, esta é a corrente de saída de “V1” mostrado na Figura 74.



**Figura 75 - Forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 3ª ordem.**

Pode-se notar que a forma de onda de corrente está na forma senoidal, porém distorcida. O THD<sub>i</sub> que era de 116,88% passou a ser de 28,05%.

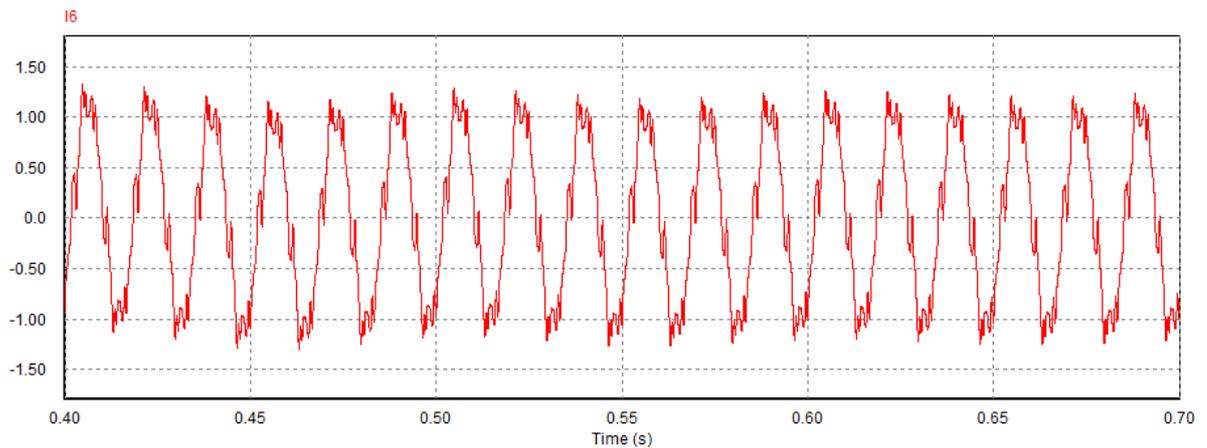
Na Figura 76 é mostrada a FFT do sinal simulado utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 3ª ordem.



**Figura 76 - FFT da forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando filtro passa-baixa para harmônica de 3ª ordem.**

Utilizando-se da mesma metodologia do circuito de 6 Hz, os valores foram mantidos para a simulação do circuito de 60 Hz.

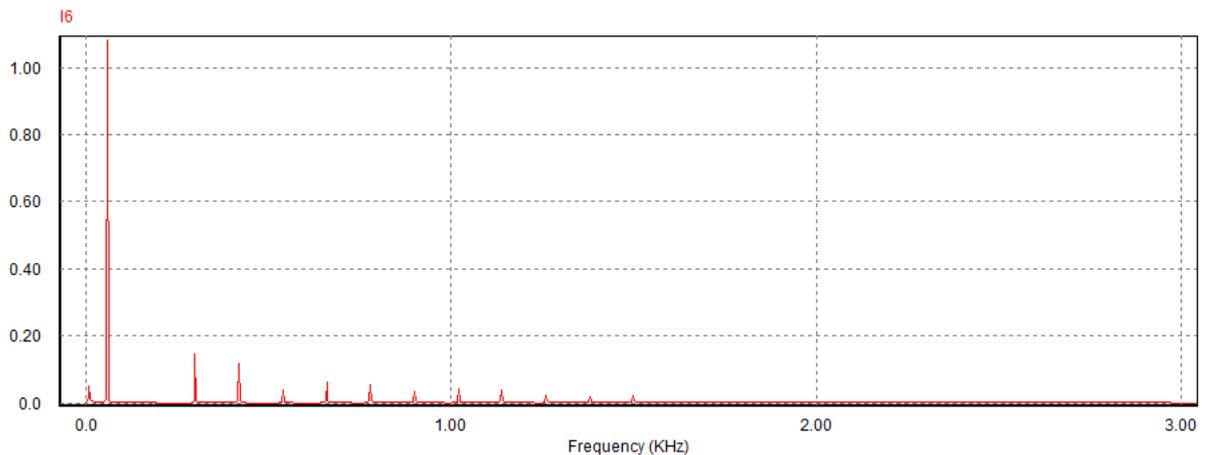
O resultado da simulação da forma de onda de corrente para o circuito de 60 Hz é mostrado na Figura 77. A corrente “I6” é da saída de “V1” mostrado na Figura 74.



**Figura 77 - Forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 3ª ordem.**

Como foi visto na simulação do circuito a 60 Hz, a forma de onda de corrente está na forma senoidal, porém distorcida. O  $THD_i$  que era de 100,16% passou a ser de 20,43%.

Na Figura 78 é mostrada a FFT do sinal simulado utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 3ª ordem.

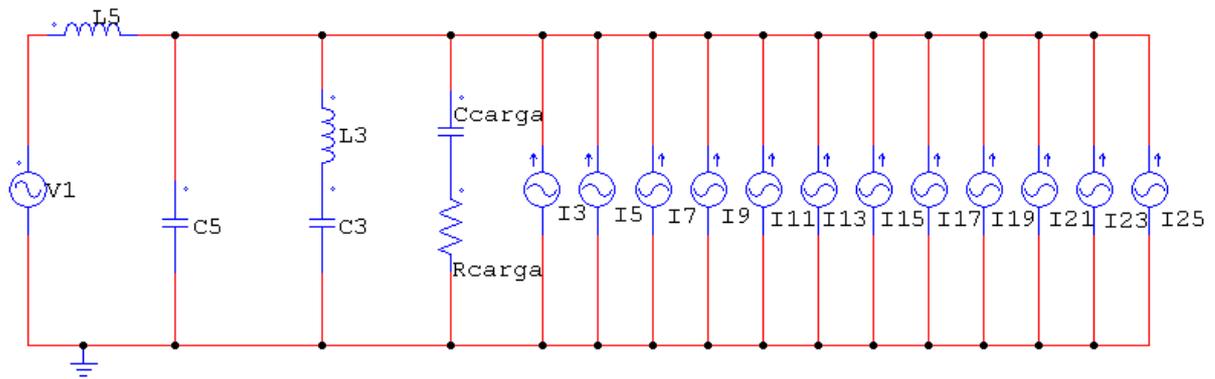


**Figura 78 - FFT da forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 3ª ordem.**

Os resultados obtidos utilizando este filtro atendem a norma IEC que exige  $THD_i$  até 30% nas duas frequências analisadas, enquanto que a norma IEEE exige que este  $THD_i$  seja de até 20% e com isso apenas quando o motor atua a 60 Hz esta norma é atendida.

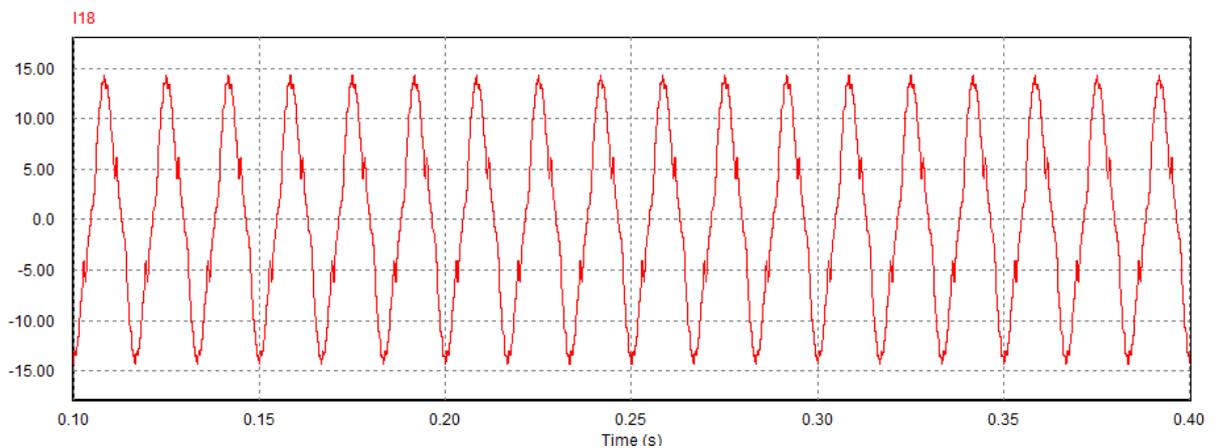
### **5.3.2 Filtro PASSA-BAIXA para harmônica de 5º ordem com filtro em derivação de 3º ordem**

Este filtro possui as frequências de corte de 300Hz e 180Hz, para 5ª e 3ª harmônicas, respectivamente. Como no filtro anterior, são permitidas as passagens de frequências abaixo as de corte. A Figura 79 mostra sua topologia.



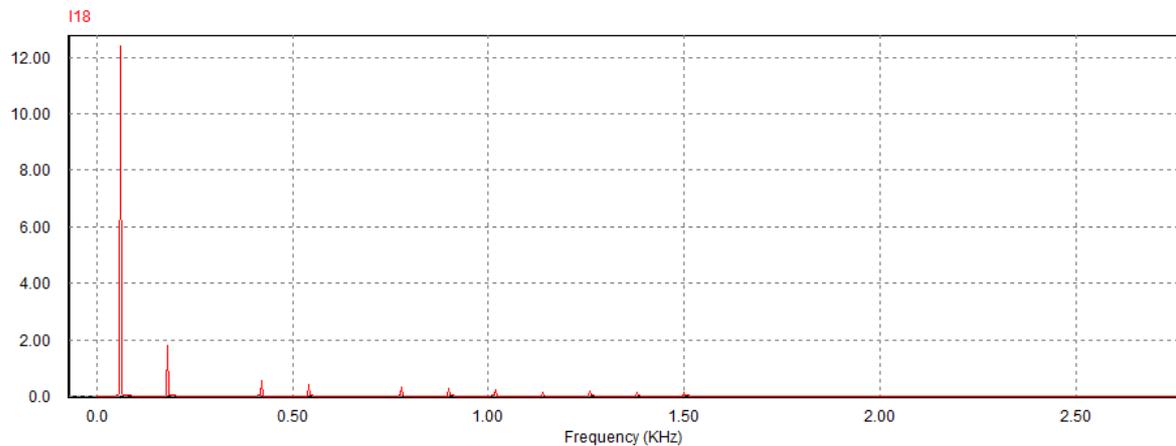
**Figura 79 - Filtro passa-baixa para harmônica de 5ª ordem com filtro em derivação de 3ª ordem.**

Utilizando-se da mesma metodologia do filtro anterior foram definidos os valores do indutor e do capacitor. Para a frequência de corte de 300Hz, definiu-se um valor de  $5\mu\text{F}$  para o capacitor e através da Equação 15 chegou-se ao valor do indutor que foi de 56,3mH. Já para a frequência de corte de 180Hz, definiu-se  $3\mu\text{F}$  para o capacitor e chegou-se ao valor de 260,6mH para o indutor. As correntes “I18” da Figura 80 e “I6” da Figura 82 são da saída de “V1” mostrado na Figura 79. A Figura 80 mostra a aplicação do filtro no circuito atuando a 6Hz.



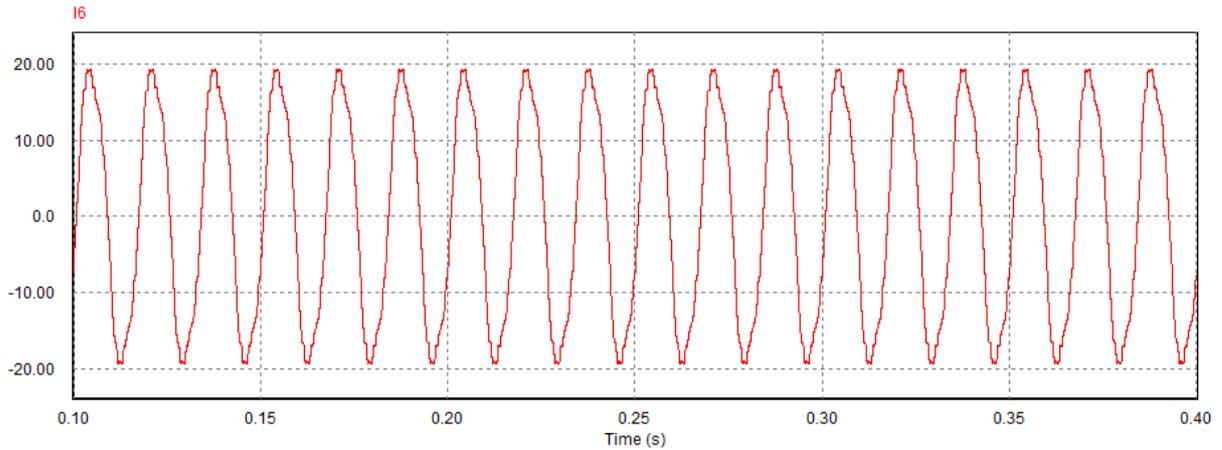
**Figura 80 - Forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 5ª ordem com filtro em derivação para harmônica de 3ª ordem.**

Se compararmos com o filtro anterior, a forma de onda de corrente neste caso está menos distorcida. O  $THD_i$  que era de 116,88% passou para 16,21%. A Figura 81 mostra a aplicação da função FFT no circuito de 6Hz.



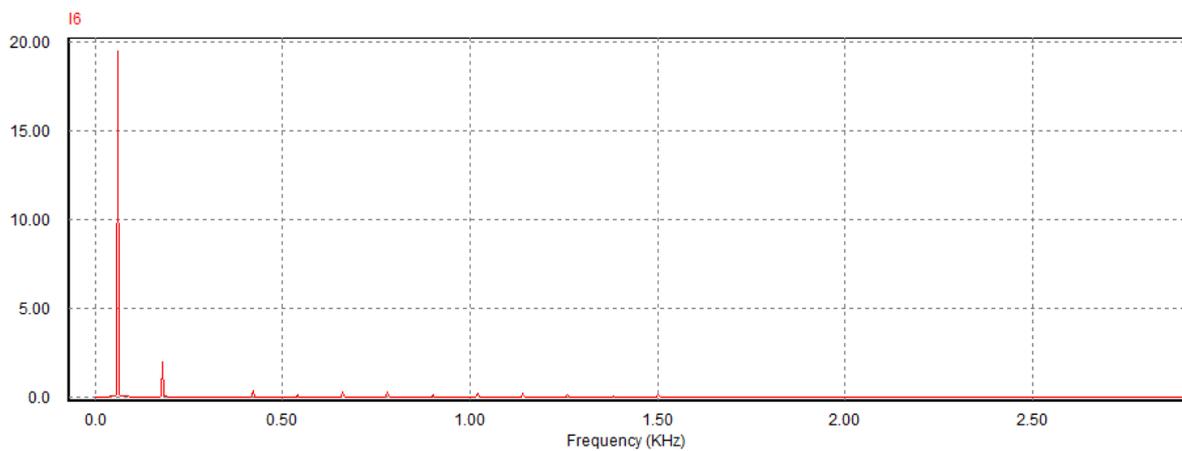
**Figura 81 - FFT da forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando filtro passa-baixa para harmônica de 5ª ordem com filtro em derivação para 3ª ordem.**

Para a simulação do circuito atuando a 60Hz, os valores dos indutores e capacitores para a 5ª e 3ª harmônicas foram mantidos. A Figura 82 mostra a forma de onda de corrente da simulação após a aplicação do filtro.



**Figura 82 - Forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 5ª ordem com filtro em derivação para harmônica de 3ª ordem.**

Observa-se na Figura 82 que praticamente não há distorções na forma de onda.



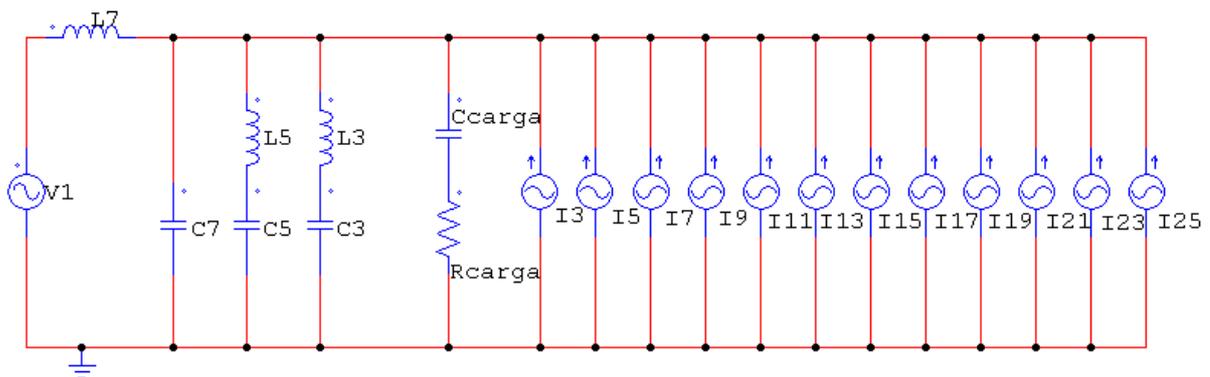
**Figura 83 - FFT da forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando filtro passa-baixa para harmônica de 5ª ordem com filtro em derivação para 3ª ordem.**

São visíveis nas FFT's das Figuras 82 e 83 a atenuação das frequências harmônicas. O  $THD_i$  que era 100,16% diminuiu para 10,77%, quando o circuito atua com 60Hz.

Neste filtro a norma IEC, que exige um THDi de até 30% e a norma IEEE que exige o THDi de até 20% são atendidas quando o motor atua a 6 e a 60 Hz.

### 5.3.3 Filtro PASSA-BAIXA de 7º ordem com filtro em derivação para harmônica de 3º e 5º ordem

A Figura 84 mostra a topologia do filtro passa-baixa de 7ª ordem com filtro em derivação para harmônica de 3ª e 5ª ordem.

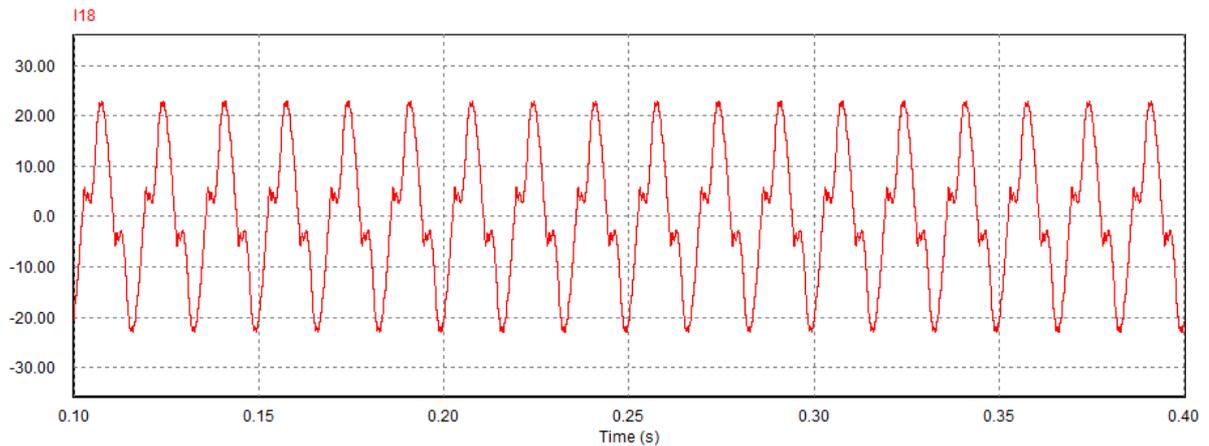


**Figura 84 - Filtro passa-baixa de 7ª ordem com filtro em derivação para harmônica de 3ª e 5ª ordem.**

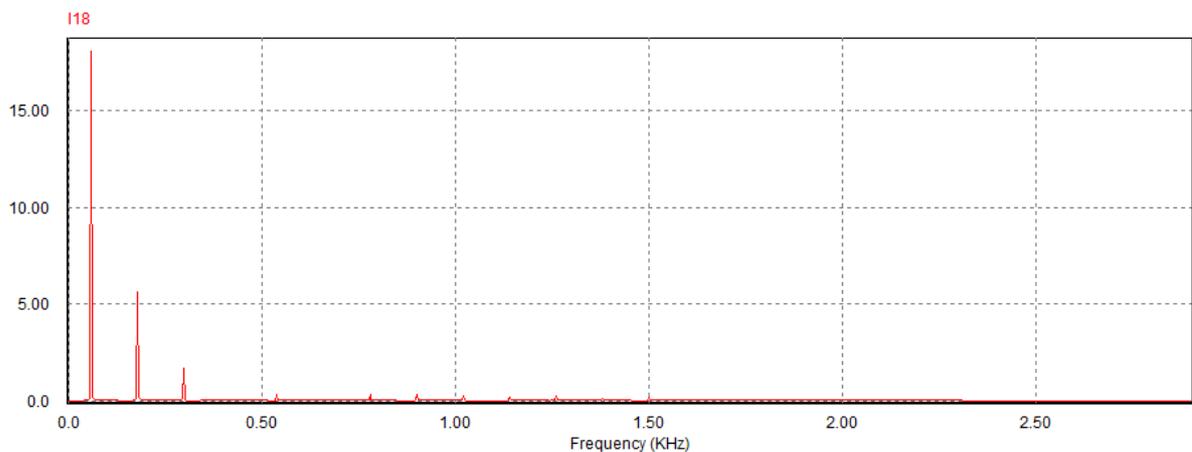
Este filtro tem a mesma configuração dos anteriores, contudo, a quinta harmônica passa a ser um filtro em derivação e é acrescida a frequência de corte de 420Hz da sétima ordem harmônica.

Os mesmos cálculos anteriores foram utilizados para que fossem encontrados os valores para os capacitores e indutores do filtro. Os valores de  $C_3$  ( $3\mu\text{F}$ ),  $L_3$  (260,6m),  $C_5$  ( $5\mu\text{F}$ ) e  $L_5$  (56,3m) foram mantidos. Então se determinou um valor de  $7\mu\text{F}$  para  $C_7$  e encontrou-se 20,51m para  $L_7$ . Aplicando-se estes valores aos componentes do filtro, foram obtidos os

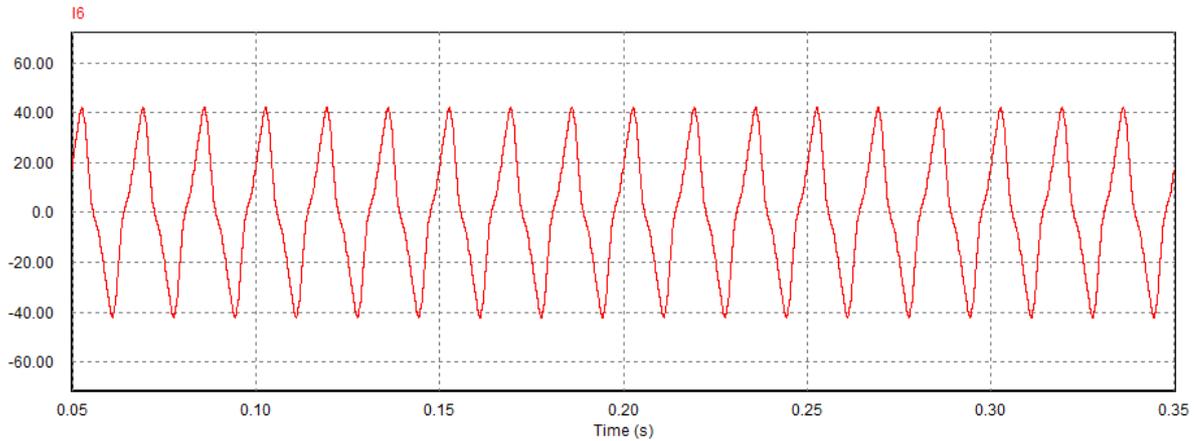
resultados das simulações para o circuito atuando a 6Hz, como mostram as Figuras 85 e 86 e os resultados das simulações para o circuito atuando a 60Hz, mostrados nas Figuras 87 e 88. As correntes “I18” da Figura 85 e “I6” da Figura 87 são da saída de “V1” mostrado na Figura 85.



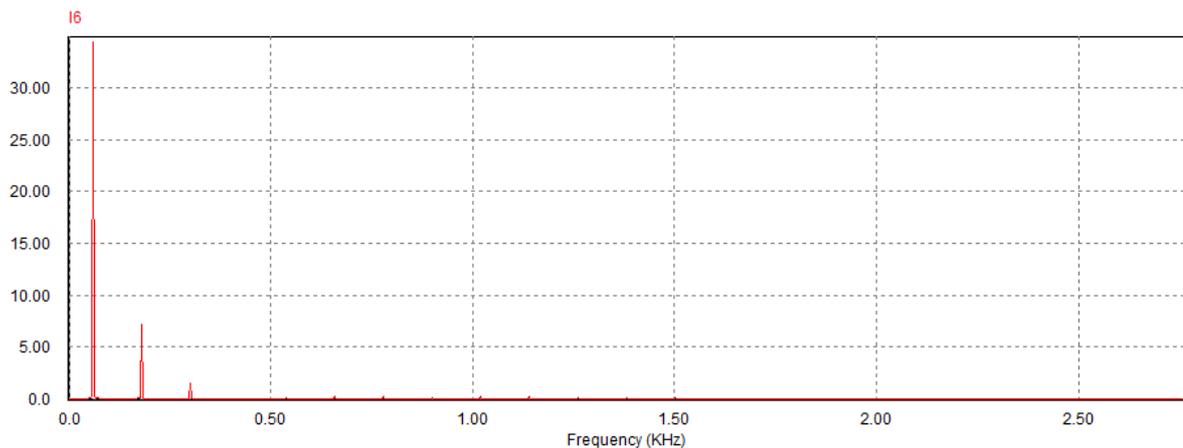
**Figura 85 - Forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 7ª ordem com filtro em derivação para harmônica de 3ª e 5ª ordem.**



**Figura 86 - FFT da forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 7ª ordem com filtro em derivação para harmônica de 3ª e 5ª ordem.**



**Figura 87 - Forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 7ª ordem com filtro em derivação para harmônica de 3ª e 5ª ordem.**

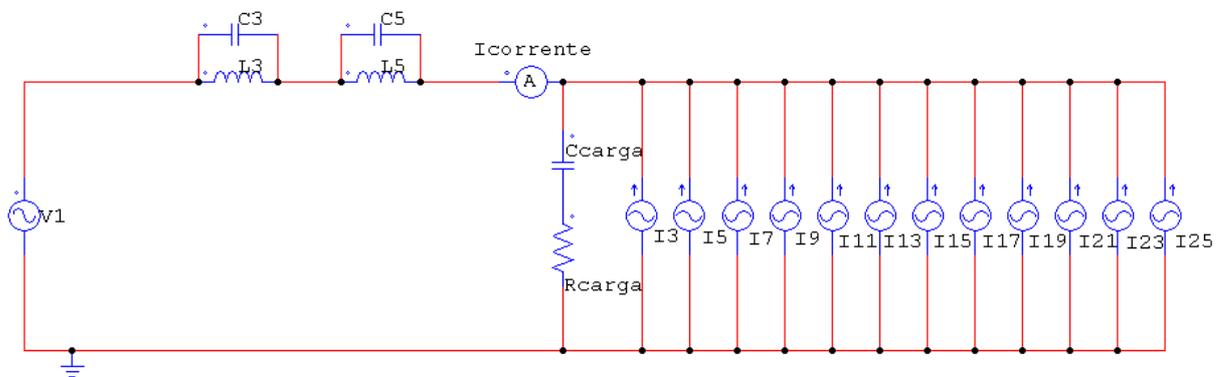


**Figura 88 - FFT da forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro passa-baixa para harmônica de 7ª ordem com filtro em derivação para harmônica de 3ª e 5ª ordem.**

O THDi após a aplicação do filtro para o circuito atuando a 6Hz e a 60Hz, foram de 32,76% e 20,93%, respectivamente. Nota-se nas FFT's resultantes da aplicação do filtro que as correntes fundamentais ficaram altas. O filtro em questão atende apenas a norma IEEE quando o motor atua a 60 Hz.

### 5.3.4 Filtro série sintonizado de 3º e 5º ordem

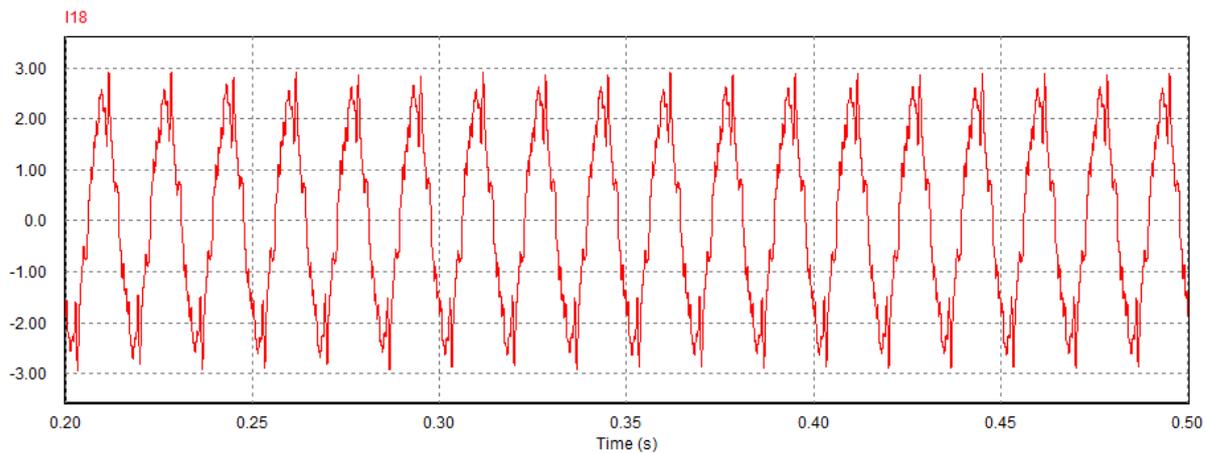
Este tipo de filtro segue a topologia dos filtros rejeita-faixa e são compostos por um circuito composto por um indutor e um capacitor ressonantes que impedem a passagem de uma faixa de frequência. As frequências de corte utilizadas nesta configuração foram de 180Hz e 300Hz. A Figura 89 mostra a topologia deste filtro.



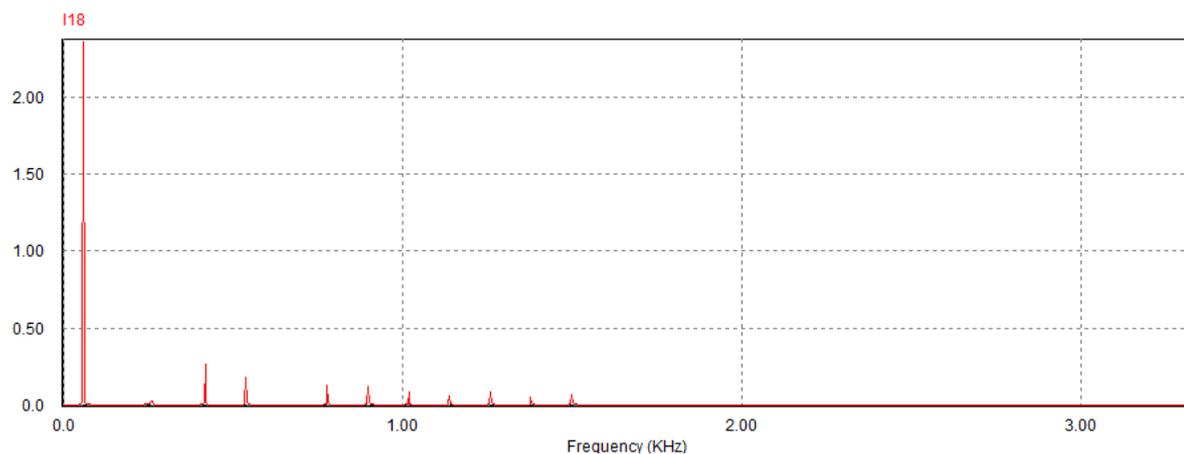
**Figura 89 - Filtro série sintonizado de 3ª e 5ª ordem.**

Após a definição da topologia do filtro a ser simulado, foram geradas a forma de onda de corrente e a FFT resultante desta forma de onda. Os valores dos indutores e capacitores foram mantidos, com  $C_3$  ( $3\mu\text{F}$ ),  $L_3$  ( $260,60\text{mH}$ ),  $C_5$  ( $5\mu\text{F}$ ) e  $L_5$  ( $56,30\text{mH}$ ).

A Figura 90 mostra a forma de onda de corrente com o circuito atuando a 6Hz e a Figura 91 mostra a FFT desta forma de onda de corrente. As formas de onda de corrente para o motor atuando a 6 Hz e 60 Hz são obtidos através do medidor de corrente “Icorrente” mostrado na Figura 89.

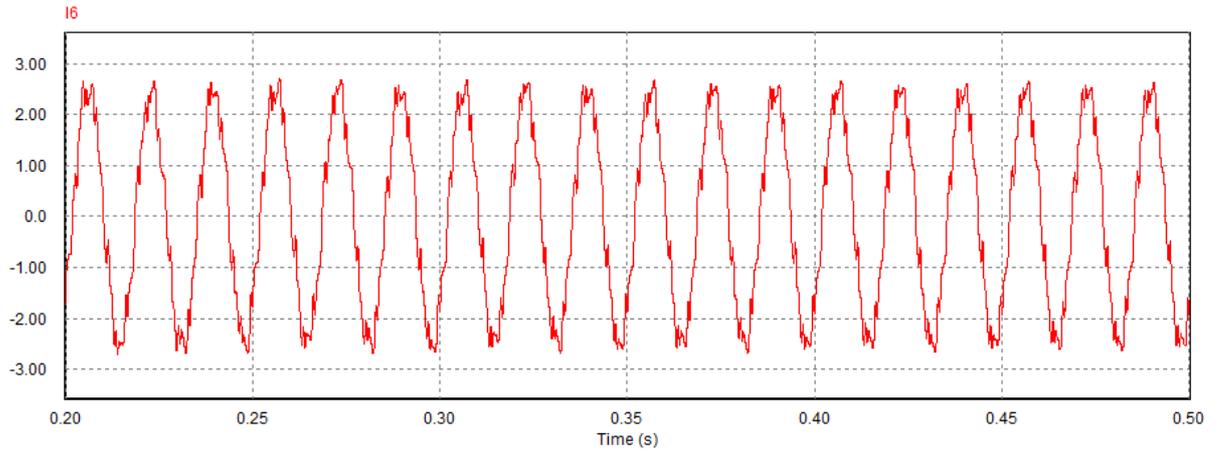


**Figura 90 - Forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> ordem.**

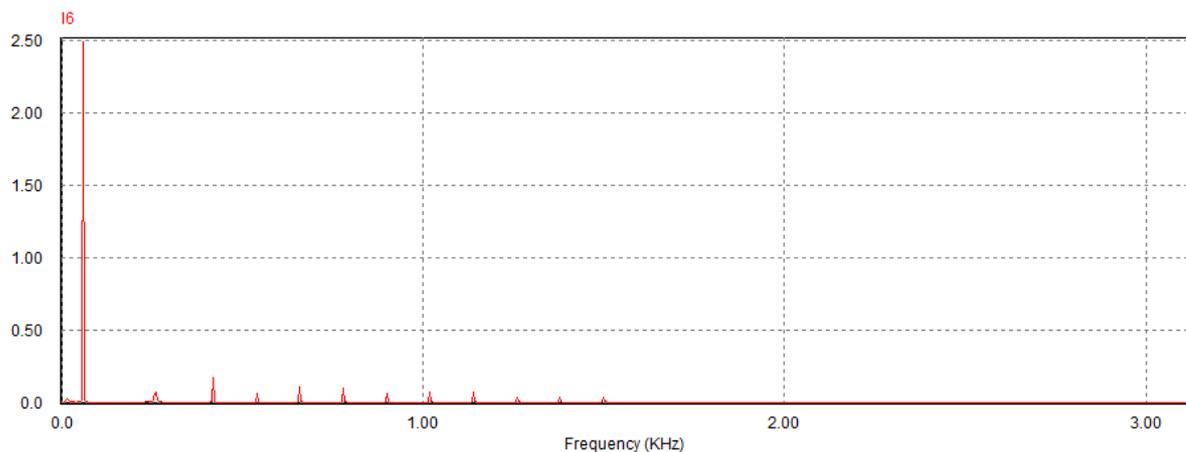


**Figura 91 - FFT da forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> ordem.**

As Figuras 92 e 93 mostram, respectivamente, a forma de onda de corrente e a FFT desta forma de onda quando o circuito atua a 60Hz.



**Figura 91 - Forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> ordem.**

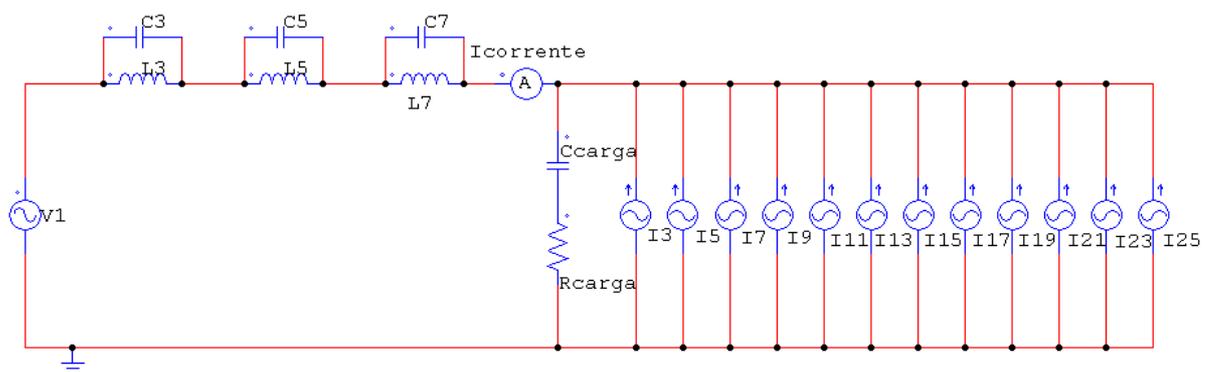


**Figura 92 - FFT da forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> ordem.**

As Figuras acima mostram que a forma de onda possui alguma distorção e as FFT's mostram que as frequências harmônicas de 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> foram eliminadas e as demais foram atenuadas. O THDi a 60 Hz passou a ser de 17,06% e a 60 Hz passou a ser de 11,01% após a implantação do filtro no circuito simulado. Já este filtro atende as normas IEC e IEEE atuando nas duas frequências analisadas.

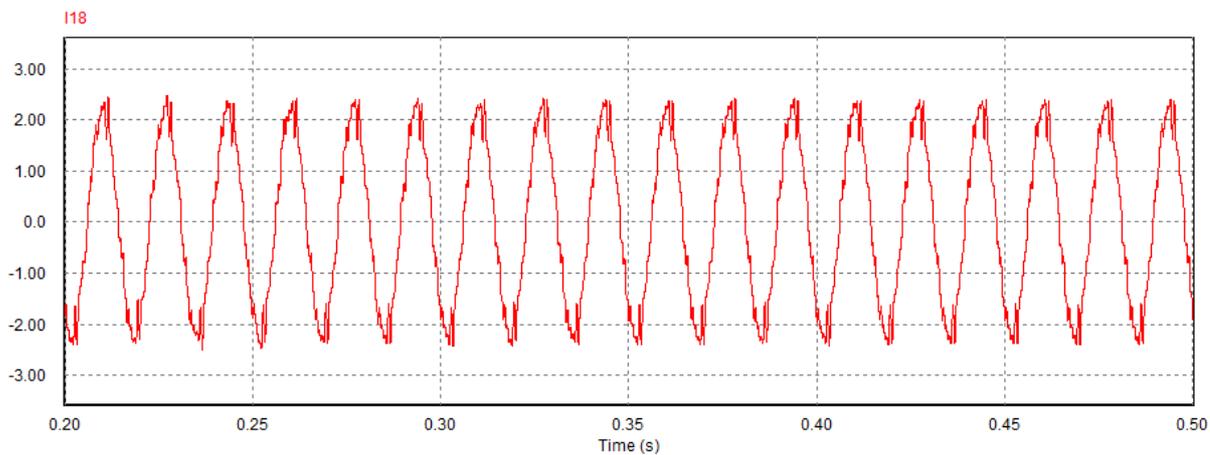
### 5.3.5 Filtro série sintonizado para harmônica de 3º, 5º e 7º ordem

Este filtro segue a mesma configuração do anterior, porém a frequência de corte de 420Hz foi acrescida a nova topologia. Utilizando-se da mesma metodologia dos demais filtros foram determinados valores para os capacitores e indutores do filtro. Estes valores foram mantidos para as harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem, portanto  $C_3$  ( $3\mu\text{F}$ ),  $L_3$  ( $260,60\text{mH}$ ),  $C_5$  ( $5\mu\text{F}$ ),  $L_5$  ( $56,30\text{mH}$ ),  $C_7$  ( $7\mu\text{F}$ ) e  $L_7$  ( $20,51\text{mH}$ ). Na Figura 93 é mostrada a topologia do filtro.

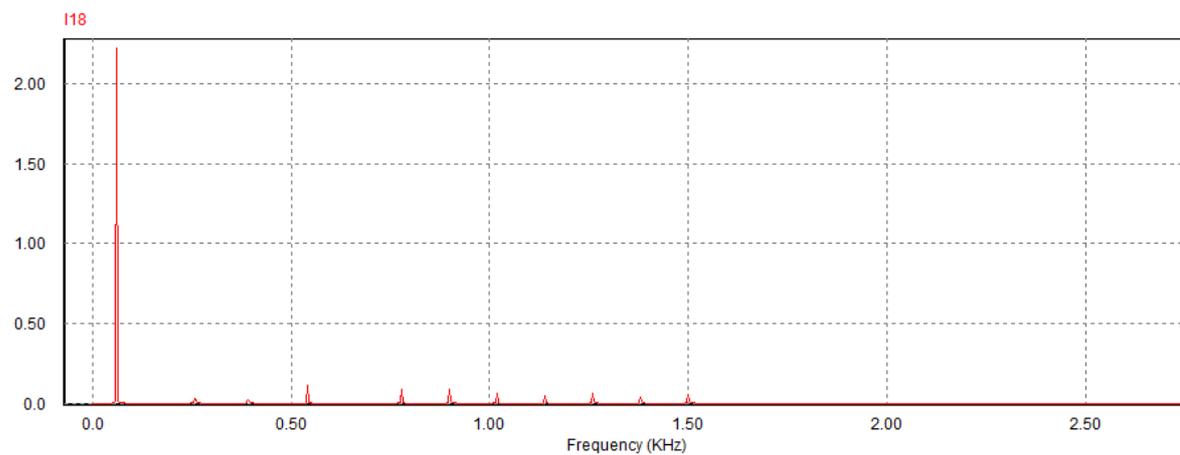


**Figura 93 - Filtro série sintonizado para harmônica de 3ª, 5ª e 7ª ordem.**

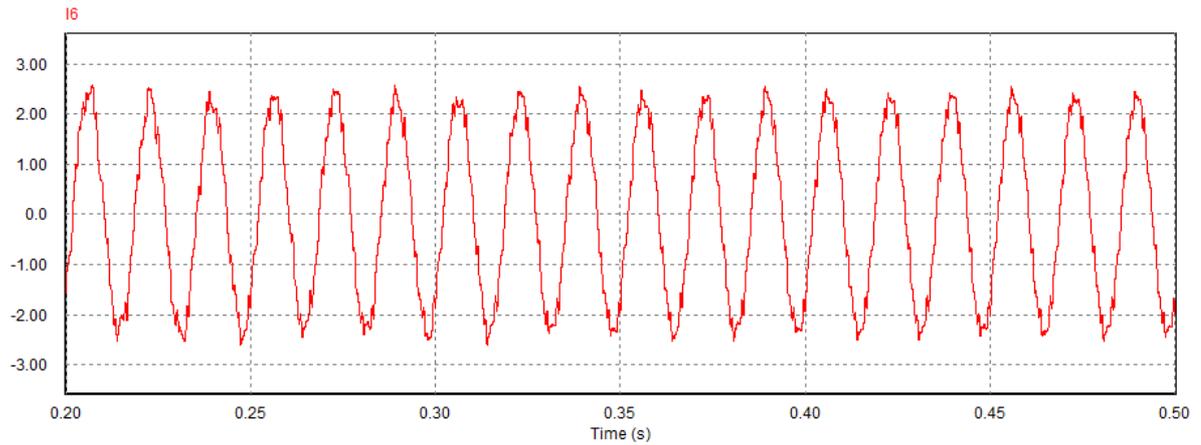
As formas de onda de corrente geradas pelas simulações do circuito atuando a 6Hz e 60Hz são mostradas, respectivamente, nas Figuras 94 e 96. Enquanto que as FFT's destas formas de onda são mostradas nas Figuras 95 e 97 para 6Hz e 60Hz, nesta ordem. Estas formas de onda de corrente para o motor atuando a 6 Hz e 60 Hz são obtidos através do medidor de corrente “Icorrente” mostrado na Figura 93.



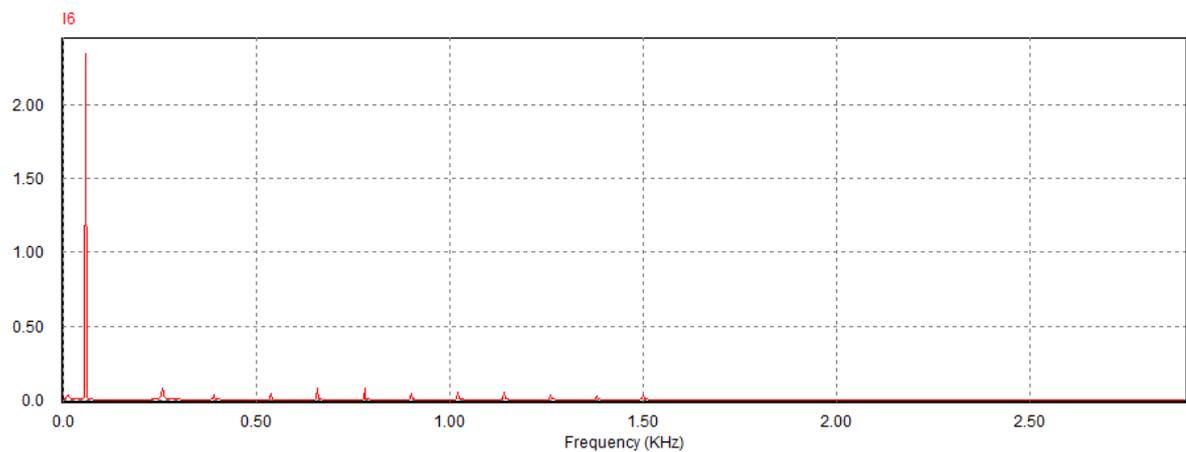
**Figura 94 - Forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem.**



**Figura 95 - FFT da forma de onda de corrente de 6 Hz utilizando o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem.**



**Figura 96 - Forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem.**



**Figura 97 - FFT da forma de onda de corrente de 60 Hz utilizando o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem.**

Com a utilização deste filtro observa-se que as frequências harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem foram eliminadas e as demais frequências foram atenuadas. O THDi do circuito atuando a 60Hz ficou de 10,08% e a 60Hz ficou de 6,66%. Da mesma forma que o filtro anterior, as THDi's atendem as normas.

### 5.3.6 Análise da utilização dos filtros

Realizando uma comparação dos filtros utilizados é possível chegar-se a melhor configuração para este tipo de circuito. A Tabela 32 mostra um comparativo da corrente fundamental e o THD<sub>i</sub> de cada topologia quando atuava com 6Hz e 60Hz.

<b>Topologia</b>	<b>Corrente Fundamental (A) (6Hz)</b>	<b>Corrente Fundamental (A) (60Hz)</b>	<b>THD<sub>i</sub> (%) (6Hz)</b>	<b>THD<sub>i</sub> (%) (60Hz)</b>
Filtro passa-baixa para harmônica de 3 <sup>a</sup> ordem	1,05	1,08	28,05	20,43
Filtro passa-baixa para harmônica de 5 <sup>a</sup> ordem com filtro em derivação para harmônica de 3 <sup>a</sup> ordem	12,37	19,47	16,21	10,77
Filtro passa-baixa para harmônica de 7 <sup>a</sup> ordem com filtro em derivação para harmônica de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> ordem	18,07	34,50	32,76	20,93
Filtro série sintonizado para harmônica de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> ordem	2,36	2,49	17,06	11,01
Filtro série sintonizado para harmônica de 3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup> ordem	2,23	2,34	10,08	6,66

Analisando a Tabela 32 pode-se concluir que o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem foi o que apresentou o melhor resultado. As correntes harmônicas nestas três ordens (3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup>) foram eliminadas e as demais foram atenuadas, atendendo assim as normas européias IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4 e a norma americana IEEE-519. Como visto anteriormente, não há uma norma brasileira que limite as distorções harmônicas de corrente, portanto devem-se adotar como base as normas internacionais citadas anteriormente.

Quando o circuito estava atuando a 60Hz, a corrente fundamental que era de 12,81 A, passou a ser de 2,23 A e o THD<sub>i</sub> que era de 116,88% passou a ser de 10,08%. Enquanto o circuito atuou a 60Hz, resultou em uma corrente de 2,34 A e um THD<sub>i</sub> de 6,66% e antes da aplicação do filtro estes valores eram de 25,17 A e 116,88%, respectivamente. Analisando estes resultados, entre os filtros passivos testados, o filtro série sintonizado para harmônica de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem apresentou o melhor resultado.

A Tabela 33 mostra os valores dos capacitores e dos indutores para cada filtro aplicado ao circuito simulado.

Topologia	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>7</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>7</sub>
Filtro passa-baixa para harmônica de 3 <sup>a</sup> ordem	782 mH	x	x	1 μF	x	x
Filtro passa-baixa para harmônica de 5 <sup>a</sup> ordem com filtro em derivação para harmônica de 3 <sup>a</sup> ordem	260,60 mH	56,30 mH	x	3 μF	5 μF	x
Filtro passa-baixa para harmônica de 7 <sup>a</sup> ordem com filtro em derivação para harmônica de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> ordem	260,60 mH	56,30 mH	20,51 mH	3 μF	5 μF	7 μF
Filtro série sintonizado para harmônica de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> ordem	260,60 mH	56,30 mH	x	3 μF	5 μF	x
Filtro série sintonizado para harmônica de 3 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> e 7 <sup>a</sup> ordem	260,60 mH	56,30 mH	20,51 mH	3 μF	5 μF	7 μF

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi abordada a qualidade da energia elétrica e os seus distúrbios, no caso, o foco foi às distorções harmônicas. Este é um tema que está cada vez mais em evidência devido ao aumento de cargas não-lineares no sistema elétrico de potência. Por este motivo, busca-se uma energia de qualidade.

Foram realizados testes utilizando um motor elétrico sendo acionado por um inversor de frequência. A partir deste acionamento, foram coletados os dados harmônicos com o motor atuando a vazio e com uma força mecânica atuando no eixo do motor para que fosse possível saber como seria o comportamento quando fosse exigida uma carga. Os motores elétricos de baixa potência como o utilizado nos testes são muito comuns e esse é um caso que ocorre com frequência poluindo a rede elétrica.

Com os dados obtidos foi possível buscar soluções para as distorções harmônicas encontradas. Após alguns testes com filtros passivos, definiu-se que o filtro passivo em série sintonizado para harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem foi o mais eficaz e atenuou de forma satisfatória as correntes harmônicas presentes no sistema, atendendo as exigências das normas reguladoras. Tendo em vista trabalhos futuros, pode ser realizada a implementação do filtro proposto.

## REFERÊNCIAS

- [1] Inversor de Frequência. Disponível em: [http://www.faatesp.edu.br/publicacoes/Inversores\\_de\\_Frequencia.pdf](http://www.faatesp.edu.br/publicacoes/Inversores_de_Frequencia.pdf) Acesso em: 22 abr. 2011.
- [2] Beltrame, Y. A. Inversor de frequência: menos custo e maior confiabilidade. **Mecatrônica Atual**, Tatuapé, mar. 2008. Disponível em: <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/28> Acesso em: 28 abr. 2011.
- [3] WORKSHOP INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO, **Qualidade de energia: harmônicas**, São Paulo, Schneider Eletric.
- [4] Apostila, **Qualidade de Energia**, UNISINOS.
- [5] ANEEL, PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da energia Elétrica, ago. 2007. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8\\_19022008\\_SRD.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_19022008_SRD.pdf) Acesso em: 28 abr. 2011.
- [6] COGO, João Roberto. **Análise da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos**. Apostila, Escola Federal de Itajubá, Itajubá-MG: Editora EFEI, Setembro de 1996.
- [7] DIAS, Guilherme Alfredo Dentzien. **Harmônicas em Sistemas Industriais**. Coleção Engenharia 4, Porto Alegre: Editora Edipucrs, 1998.
- [8] DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark; SANTOSO, Surya and BEATY, H. Wayne. **Electrical Power Systems Quality**. Second edition, McGraw-Hill, 2003.
- [9] ELETROBRÁS, **Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais**, Relatório CECE/ SCEL/GCOI e GTCP/CTST/GCPS, fevereiro de 1993.
- [10] IEC 1000-2-2, Limits for Harmonic Current Emissions, **International Electrotechnical Commission Standard**, March 1995.

- [11] IEEE Standard 1159, **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, 1995.
- [12] IEEE Standard 519, **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, 1992.
- [13] ISONI, Marcos. A efficientização energética e seus possíveis efeitos sobre equipamentos e instalações. **Revista Eletricidade Moderna**, nº 363, Editora Aranda, São Paulo-SP, Junho de 2004.
- [14] **Inversor de frequência**, manual. HAPN, HPI 6000.
- [15] FERREIRA, André Augusto. **Caracterização e análise de variações de tensão de curta duração**. Campinas: UNICAMP, 2002.
- [16] GONZALEZ, Manuel Losada, PIRES, Igor Amariz, SILVA, Selênio Rocha. **Correntes harmônicas em aparelhos eletrodomésticos**. Belém: VI SBQEE, 2005.
- [17] MEHL, Evaldo L. M. **Qualidade da energia elétrica**. Curitiba: UFPR.
- [18] RHEINHEIMER, Caroline, CALLEGARO, Alan D., KOTLINSKI, Eliseu. **Influência de inversores de frequência na qualidade da energia elétrica**. Ijuí: CRICTE, 2006.
- [19] RIBEIRO, Cristiano Felipe. **Influência dos harmônicos na qualidade da energia elétrica**. Ouro Preto: UFOP, 2007.
- [20] TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das distorções harmônicas – Estudo de caso de um sistema industrial**. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
- [21] MAIA, Juliana Avena, PINHEIRO, José Renes. **Harmônicos de corrente e tensão**. Ijuí: CRICTE, 2006.
- [22] WEG. **Manual motores elétricos**. Jaraguá do Sul: Santa Catarina.
- [23] YOKOGAWA. **Manual Wattímetro WT3000**.

[24]Jappe, T. K., Kotilinski, E., Rheinheimer, C., Callegaro, A. D. **Influência de inversores de frequência na qualidade da energia elétrica.**

[25] JME Engenharia. **Conversores de frequência e soft-startes.**

[26] Oliveira, R. A., Quito, T. M. **Projeto e análise de um filtro de correntes harmônicas para um computador de uso pessoal.** Brasília: UNB, 2006.