



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA
ANÁLISE DE HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS**

Anaiam Ricardo Jardim

Lajeado, 11 de Novembro de 2018

Anaiam Ricardo Jardim

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA
ANÁLISE DE HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Anderson A. Giacomolli

Lajeado, 11 de Novembro de 2018

RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema para verificação da qualidade de energia elétrica, referindo-se aos distúrbios causados por harmônicas que tanto afetam as cargas residenciais, comerciais e industriais. O trabalho cita quais são as principais cargas causadoras de distorção harmônica no sistema elétrico e seus meios de mitigação para se enquadrar entre os limites adequados dos índices de qualidade de energia elétrica. Também abrange de forma teórica e prática a implementação de um dispositivo capaz de analisar a qualidade de energia elétrica da rede, mensurando o valor de tensão e corrente. A modelagem dos dados digitalizados é processada no software LabView, apresentando características dos sinais extraídos como o valor de pico, tensão, corrente, e os índices de distorção harmônica total do sistema, justamente causados pelas componentes harmônicas existentes na rede elétrica. Para obtenção dos índices é tomado como base a regulamentação definida pela agência nacional de energia elétrica (ANEEL), apontada no procedimento de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) módulo 8.

Palavras-chave: Distorção Harmônica, Sistema Elétrico, Qualidade de energia, Sinais de Aquisição.

ABSTRACT

This work deals with the development of a system to verify the quality of electric power, referring to the disturbances caused by harmonics that affect so much the residential, commercial and industrial loads. The work reports the main causes of harmonic distortion in the electric system and its mitigation means to fit within the appropriate limits of the electric power quality indexes. It also covers in a theoretical and practical way the implementation of a device capable of analyzing the quality of electric power of the network, measuring the value of voltage and current. The modeling of the scanned data is processed in the LabView software, showing characteristics of the extracted signals as the peak value, voltage, current, and total harmonic distortion indexes of the system, precisely caused by the harmonic components in the electrical network. In order to obtain the indices, the regulation defined by the National Electricity Agency (ANEEL), mentioned in the procedure for the distribution of electric energy in the national electricity system (PRODIST), module 8, is taken as a basis.

Keywords: Harmonic Distortion, Electrical System, Energy Quality, acquisition signs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distorção harmônica causada pela 5ª harmônica	14
Figura 2 - Cargas lineares e formas de onda lineares.....	16
Figura 3 - Forma de onda defasada de motor de indução	16
Figura 4 - Forma de onda e espectro de corrente de uma fonte chaveada.....	18
Figura 5 - Curva de excitação do transformador	19
Figura 6 - Forno a arco desequilibrado gerando a correntes de 3ª harmônicas.....	20
Figura 7 - Forma de onda e espectro de lâmpadas fluorescente	21
Figura 8 - Expectativa da vida útil do transformador X conteúdo Harmônico	23
Figura 9 - Corrente das três fases e 3ª harmônica somadas no neutro	26
Figura 10 - Comparação da forma de onda de tensão com e sem distorção	27
Figura 11 - Forma de onda senoidal 60 Hz, 220 Vrms.....	31
Figura 12 - Forma de onda distorcida pela terceira harmônica	31
Figura 13- Sinal senoidal discretizado.....	33
Figura 14 - Conversor AC-DC-AC com bobina Choke	35
Figura 15 - Associação de transformadores D-D e D-Y	36
Figura 16 - Trafo D-Y para isolamento dos harmônicos de 3ª ordem e múltiplas	37
Figura 17 - Transformador ZIG-ZAG	38
Figura 18 - Arranjos de filtros passivos	39
Figura 19 - Operação do filtro ativo	40
Figura 20 - Sistema LabView	42
Figura 21- Diagrama de blocos do projeto	45
Figura 22 - Transformador de Corrente (TC) utilizado no projeto.....	47

Figura 23 - Transformador de corrente com resistor em série	48
Figura 24 - Filtro Passa Baixa para o sinal de tensão	49
Figura 25 - Filtro Passa Baixa do sinal de corrente com ganho de 100 vezes	50
Figura 26 - Projeto da aquisição dos sinais.....	51
Figura 27 - Equipamento Banho-Maria	53
Figura 28 - Esquema do acionamento eletrônico e hardware da placa.....	54
Figura 29 - Iluminação fluorescente com reator eletrônico.....	55
Figura 30 - Montagem para o teste com motor e inversor de frequência	56
Figura 31 - Tela de interface LabView.....	57
Figura 32 - Diagrama de blocos da programação do LabView	58
Figura 33 - Gráfico com tensão e corrente da carga 1	60
Figura 34 - Espectro de frequência de tensão e corrente da carga 1	60
Figura 35 - Forma de onda de tensão e corrente com o acionamento eletrônico	62
Figura 36 - Espectro de frequência da tensão do teste da carga 2	63
Figura 37 - Espectro de frequência da corrente do teste da carga 2.....	63
Figura 38 - Gráfico com tensão e corrente da carga 3.....	66
Figura 39 - Espectro de frequência de tensão da carga 3.....	67
Figura 40 - Espectro de frequência da corrente da carga 3	67
Figura 41 - Gráfico com tensão e corrente da velocidade de 20 Hz.....	69
Figura 42 - Gráficos com tensão e corrente das velocidades; 30, 40, 50 e 60 Hz	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem das Harmônicas <i>versus</i> a Sequência	24
Tabela 2 - Indicadores de Distorção Harmônica de Tensão	27
Tabela 3 - Verificação do circuito de aquisição dos sinais	52
Tabela 4 - Espectro de frequência da tensão e corrente para o teste da carga 1	61
Tabela 5 - Índices de THD gerada pelo LabView e calculados manualmente	61
Tabela 6 - Espectro de frequência da tensão e corrente para o teste da carga 2	64
Tabela 7- Índices de THD gerada pelo LabView e calculados manualmente	65
Tabela 8 - Espectro de frequência da tensão e corrente para o teste da carga 3	68
Tabela 9 - Índices de THD gerada pelo LabView e calculados manualmente	68
Tabela 10 - Espectro de frequência da tensão e corrente na frequência de 20 Hz...	71
Tabela 11 - Espectro de tensão e corrente na frequência de 30 Hz	71
Tabela 12 - Espectro de tensão e corrente na frequência de 40 Hz	72
Tabela 13 - Espectro de tensão e corrente na frequência de 50 Hz	72
Tabela 14 - Espectro de tensão e corrente na frequência de 60 Hz	72
Tabela 15 - Índices de THD gerada pelo LabView e calculados manualmente	73

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ampere
AC	Corrente Alternada
A/D	Analógico / Digital
AVV	Acionamento de Velocidade Variável
CC	Corrente Contínua
CD	Centro de Distribuição
D/A	Digital / Analógico
FFT	Fast Fourier Transform
FP	Fator de Potência
Hz	Hertz
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
Mosfet	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PCC	Ponto Comum de Conexão
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico
PWM	Pulse Width Modulation
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QGBT	Quadro de distribuição de Baixa Tensão
<i>rms</i>	Root Mean Square
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SCR	Silicon Controlled Rectifier
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
THD	Total Harmonic Distortion

TRF	Transformada Rápida de Fourier
TP	Transformador de Potencial
UHE	Usina Hidrelétrica
UPS	Unidade de Alimentação Ininterrupta
V	Volts
Vac	Tensão de Corrente Alternada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo Principal	12
1.2	Objetivos Específicos	12
1.3	Organização e estrutura do trabalho	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Qualidade de Energia Elétrica	13
2.2	Distorção Harmônica	14
2.3	Causas da Distorção Harmônica	15
2.3.1	Cargas Lineares	15
2.3.2	Cargas Não Lineares	17
2.3.3	Conversores Estáticos	17
2.3.4	Transformadores	18
2.3.5	Máquinas Rotativas	19
2.3.6	Fornos a Arco	19
2.3.7	Iluminação Fluorescente	21
2.4	Consequências das Distorções Harmônicas	22
2.4.1	Transformadores	23
2.4.2	Máquinas Rotativas	23
2.4.3	Banco de Capacitores	25
2.4.4	Condutores	25
2.4.5	Acionamentos Eletrônicos	26
2.5	Indicadores	27
2.6	Valor da Tensão <i>rms</i> ou Eficaz	29
2.7	Valor <i>rms</i> Sinal Discretizados	32
2.8	Mitigação	33
2.8.1	Reatores de Linha	34
2.8.2	Associação de Transformadores	35
2.8.3	Conexão de Transformadores	36
2.8.4	Transformador ZIG-ZAG	37
2.8.5	Filtros Passivos	38
2.8.6	Filtros Ativos	39

2.9 Métodos do Condicionamento do Sinal	40
2.10 LabView.....	42
2.10.1 PCIe-6341	43
2.10.2 Bloco de Entrada e Saída	44
2.10.3 Linguagem de Programação	44
3 METODOLOGIA	45
3.1 Aquisição do Sinal de Tensão.....	46
3.2 Aquisição do Sinal de Corrente	46
3.3 Filtro Passa Baixa	48
3.4 Bloco de Entrada e PCIe LabView	50
3.5 Funções Internas do LabView	50
3.6 Montagem	51
3.7 Verificação	52
3.8 Apresentação das Cargas	53
3.8.1 Carga 1	53
3.8.2 Carga 2	54
3.8.3 Carga 3	54
3.8.4 Carga 4	55
3.9 Interface LabView	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 Teste Carga 1.....	59
4.2 Teste Carga 2.....	62
4.3 Teste Carga 3.....	65
4.4 Teste Carga 4.....	69
5 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica deixou de ser uma opção para ser uma necessidade no cotidiano da população, onde o ser humano ficou dependente até mesmo para realização de suas atividades básicas do dia-a-dia. Sua falta pode alcançar diversas proporções, até mesmo interferindo diretamente na qualidade de vida das pessoas, outro âmbito que pode ser tomado, são as atividades comerciais e industriais, fator que interfere diretamente no trabalho da sociedade (DUGAN, 2004).

A constatação de energia elétrica no ponto de conexão comum (PCC) ou na carga, não significa que está sendo suprido pela energia elétrica determinada em contrato, onde uma residência alimentada por uma rede que contenha perturbação, até poderá fazer que seus equipamentos e aparelhos eletrodomésticos, funcione. Mas não tem-se conhecimento da qualidade da energia que está sendo suprida pelos equipamentos, de tal forma, não sabe-se o funcionamento dos equipamentos estão corretos ou até mesmo implicando em seu funcionamento (ROCHA, 2016).

Os estudos sobre a qualidade de energia elétrica têm importância muito grande para a caracterização do comportamento do sistema elétrico que contenham perturbações por harmônicos. Apenas com análises de energia e diagnósticos, podem ser tomadas decisões e adotar medidas que realmente possam aumentar a eficácia de um sistema elétrico de suprimento, desse modo não há necessidade de efetivar testes até solucionar um problema desconhecido, isso significa que tomando medidas para mitigação sem conhecer as fontes geradoras de harmônicos e conforme as componentes harmônicas que contenha no sistema elétrico, pode-se acarretar em

comportamento inverso do desejado, fazendo com que o problema seja ainda mais predominante (DUGAN, 2004).

1.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desse trabalho é a elaboração de um protótipo de um dispositivo capaz de realizar leituras de tensão e corrente, com a finalidade de distinguir as componentes harmônicas presentes no sistema elétrico, e apresentar os índices de qualidade de energia.

1.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um circuito para o condicionamento de sinais de tensão e corrente da rede elétrica;
- Projetar e montar um filtro passa baixas que elimine as frequências maiores do que a 25^a harmônica;
- Identificar causas e consequências da distorção harmônica;
- Descrever métodos de mitigações;
- Analisar qualidade de energia elétrica a partir da distorção harmônica.

1.3 Organização e estrutura do trabalho

No capítulo 2 são apresentados os embasamentos teóricos que permeiam o desenvolvimento do trabalho; no capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto; no capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões obtidos no método implantado para elaborar e testar o protótipo; no capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Qualidade de Energia Elétrica

O conceito de qualidade de energia elétrica tem por definição determinar os índices e limites aceitáveis da operação do sistema elétrico, que podem ser afetados por distúrbios. Tais fenômenos podem ser representados como variação de tensão de longa e curta duração, variação de frequência, desequilíbrio de tensão e corrente, flutuação de tensão, distorção harmônica de tensão e corrente (ROCHA, 2016).

A preocupação com a qualidade de energia elétrica (QEE) vem desde 1970, quando o uso de conversores eletrônicos se tornaram comuns em equipamentos, sendo para diminuir ou aumentar a tensão, controlar velocidade, controlar temperatura, etc, onde marcou início das principais harmônicas que perturbam o sistema elétrico até os dias de hoje (DUGAN, 2004).

O sistema elétrico é caracterizado com alta QEE, quando atende suas regulamentações (PRODIST, 2017), e componha do mais próximo de forma de onda de tensão e corrente puramente senoidal sem alterações na sua frequência e amplitude padrão, não havendo alterações no funcionamento dos equipamentos e processos que estão conectados ao sistema elétrico (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Não existe um sistema elétrico com formas de onda puramente senoidal, sem distúrbios, mas, com bons estudos de mitigações é possível fazer que a operação do sistema elétrico atenda com mais qualidade (DUGAN, 2004).

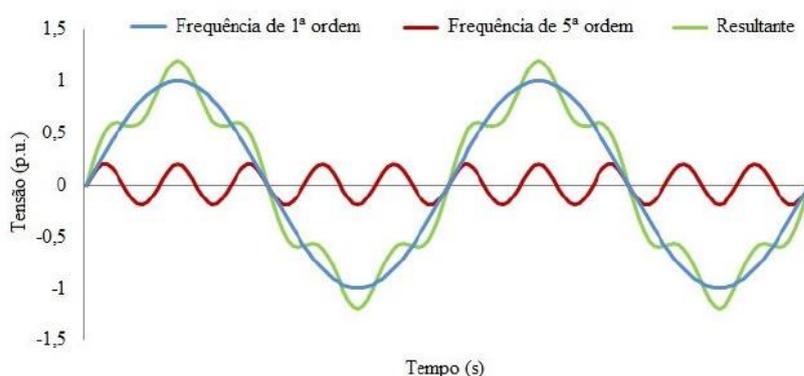
2.2 Distorção Harmônica

A distorção harmônica é causada por cargas não lineares, onde tais cargas podem alterar a forma de onda de tensão ou corrente do sistema elétrico, no qual a distorção é justamente a forma de onda resultante gerada por distúrbios harmônicos adicionados a forma de onda fundamental como pode ser visto na Figura 1, a resultante da distorção harmônica causada pela 5ª harmônica (JUNIOR, 2013).

A forma de onda fundamental de um sistema elétrico é sempre a de 1ª ordem, pegando como exemplo o Sistema Interligado Nacional (SIN), opera com frequência de 60 Hz, e as harmônicas são múltiplas inteiras da fundamental (JUNIOR, 2013).

As principais fontes geradoras de distorções harmônicas no sistema elétrico são cargas industriais, entretanto com o avanço da tecnologia as cargas residenciais também são fontes significativas de distorções harmônicas, devido em grande parte dos aparelhos domésticos conterem conversores de energia, tanto para diminuir a tensão de suprimento de rádios, TVs, PCs, etc, e também para controle de temperatura manual ou automático de chuveiro eletrônico, microondas, fornos com controle digital, etc (EURELECTRIC, 2002).

Figura 1 - Distorção harmônica causada pela 5ª harmônica



Fonte: JUNIOR, 2013.

2.3 Causas da Distorção Harmônica

As distorções harmônicas são provenientes de diversos dispositivos, ou por alguma perturbação ressonante, como dito anteriormente os responsáveis por distorções harmônicas são cargas não lineares, entretanto cargas consideradas lineares também podem causar distorções devido às condições que lhes são impostas no sistema elétrico. Uma carga linear suprida por uma fonte energia com forma de onda distorcida, sua resultante também conterá distorção (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Segundo SANKARAN, (2002), a própria geração de energia elétrica, como a usina hidrelétrica (UHE), produz uma pequena parcela de conteúdo harmônico, geralmente menor que 1%, portanto, é impossível obter-se um sistema elétrico de potência (SEP) livres de distúrbios, por menor que sejam.

Em rede de distribuição que supre diversos usuários na mesma linha, a distorção de tensão e corrente causada por apenas um usuário, pode afetar os demais (EURELECTRIC, 2002).

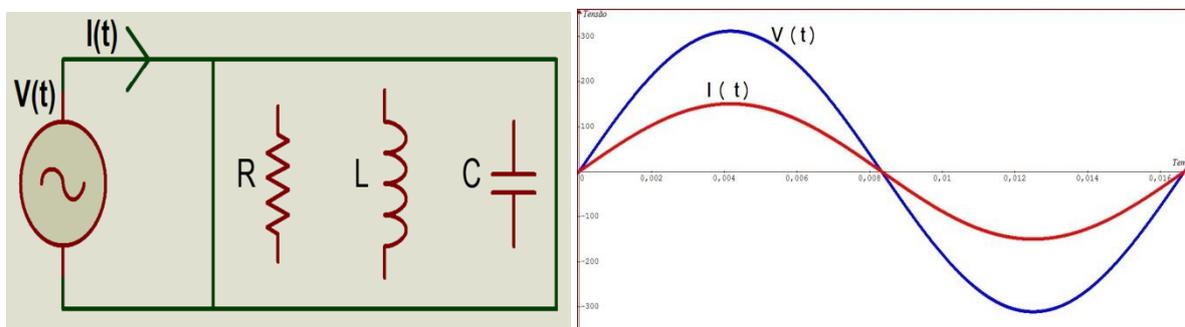
Tanto LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, (2014) quanto SANKARAN, (2002), caracterizam as fontes geradoras de harmônicas separando-as em categorias: conversores estáticos, transformadores, máquinas rotativas, fornos a arco, reatores eletrônicos para iluminação.

2.3.1 Cargas Lineares

A carga somente pode ser considerada linear se sua corrente exerce proporção com sua tensão aplicada, onde a forma de onda da corrente é a mesma que a da tensão, independentemente de sua amplitude ou ângulo de fase (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Como pode ser visto na Figura 2 a forma de onda de uma carga conectada à rede elétrica, que pode ser tanto um resistor como um indutor ou um capacitor de valor fixo. Nota-se que a forma de onda da corrente em vermelho, é idêntica a forma de onda da tensão que está em azul (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

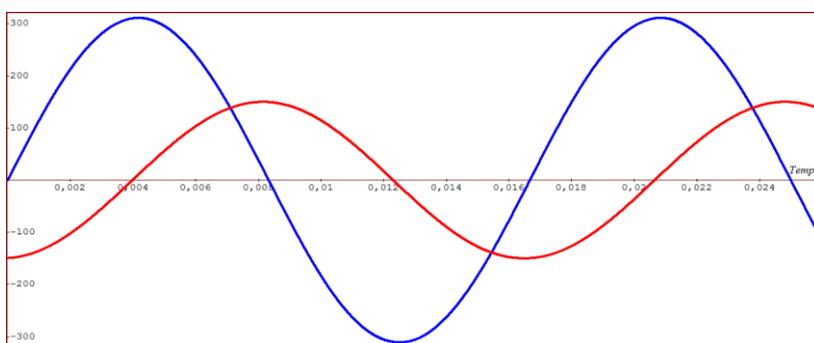
Figura 2 - Cargas lineares e formas de onda lineares



Fonte: Autor, 2018.

Cargas que apenas causam defasagem na corrente em relação a tensão, não deixam de ser lineares pelo deslocamento da fase, seja uma carga um motor de indução, a forma de onda não sofrerá deformação, mantendo sua característica linear, a Figura 3 ilustra a forma de onda de um motor de indução (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Figura 3 - Forma de onda defasada de motor de indução



Fonte: Autor, 2018.

2.3.2 Cargas Não Lineares

A principal característica das cargas não lineares é não possuir uniformidade entre a tensão e corrente, de modo à gerar formas de ondas distorcidas, especialmente na corrente, mesmo se a tensão de alimentação for puramente senoidal (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

No caso da tensão possuir distorções, e for aplicada a uma carga linear, a forma de onda da corrente será distorcida, similarmente acontece quando uma tensão não distorcida é aplicada em uma carga não linear, a forma de onda também será distorcida. Desta forma nunca haverá relação linear entre corrente e tensão (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Alguns dispositivos que se enquadram como cargas não lineares são formados por tiristores, transistores bipolar, IGBTs e Mosfet, nos quais são utilizadas para o controle de velocidade, rebaixadores de tensão como fontes chaveadas, reatores para lâmpadas fluorescente, etc, atuando de tal forma a recortar a onda de tensão e corrente (ROCHA, 2016).

2.3.3 Conversores Estáticos

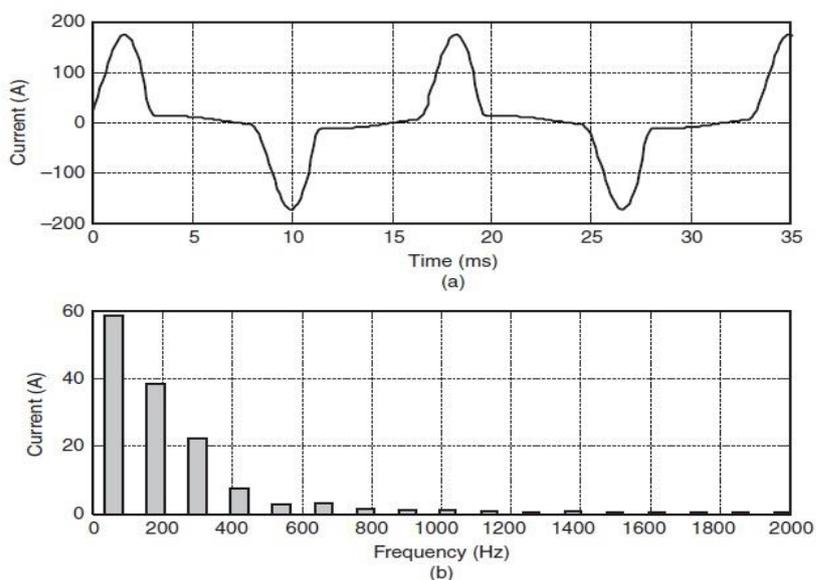
Conversores estáticos também conhecidos como conversores eletrônicos, atuam em diversas áreas no sistema elétrico como fontes de alimentação chaveadas, controladores de velocidade, inversores de frequência, entre outros, onde tais equipamentos são considerados os que mais possuem a capacidade de gerar distorções harmônicas no sistema elétrico, também são consideradas as principais cargas não linear vista pela fonte, e são apontados os que mais geram conteúdo harmônicos de 3^a, 5^a, 7^a ordem.

Conversores monofásico têm característica de gerar harmônicos de elevadas amplitudes de corrente, devido o único caminho de retorno da corrente ser o neutro, caminho onde ocorre a soma das correntes monofásicas, evento que não ocorre em

sistemas trifásicos lineares, onde a corrente de neutro é nula, portanto não geram conteúdos harmônicos de 3ª ordem (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Na Figura 4, apresenta a distorção causada por uma fonte chaveada, e seu espectro de corrente.

Figura 4 - Forma de onda e espectro de corrente de uma fonte chaveada



Fonte: Dugan, 2004.

2.3.4 Transformadores

Os transformadores foram um dos primeiros equipamentos a causarem distúrbios no sistema elétrico. (DUGAN, 2004) relata que entre 1930 até 1940, bem antes dos conversores tornarem-se comuns, os transformadores já vinham afetando a qualidade de energia, mas atualmente a quantidade de conteúdo harmônico gerados por transformadores é relativamente pequena quando comparado com conversores e reatores eletrônicos.

Devido ao material ferromagnético que compõem o transformador e também sua histerese, operam de modo que sua atuação seja não linear como pode ser visto na Figura 5, quando atuando em região não linear (PATRAO, DELEGADO, ALMEIDA, 2005).

Figura 5 - Curva de excitação do transformador



Fonte: Leão; Sampaio; Antunes, 2014.

2.3.5 Máquinas Rotativas

As máquinas rotativas podem ser caracterizadas tanto como motores AC e geradores síncronos. De fato os motores conectados a rede acabam por ser mais afetados pelos distúrbios do que ocasionando-os (DUGAN, 2004).

No entanto os geradores síncronos são capazes de gerar harmônicas de ranhuras, gerando harmônicas de 3ª ordem afetando diretamente no condutor neutro, pelo efeito de aquecimento devido a resistência do condutor (PATRAO, DELEGADO, ALMEIDA, 2005).

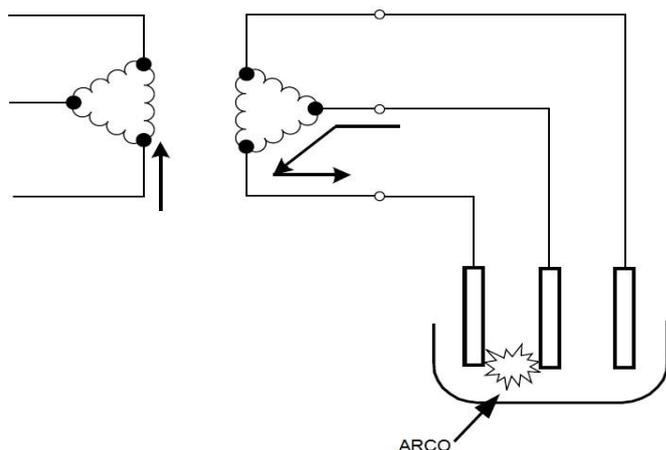
2.3.6 Fornos a Arco

No Brasil, começou-se a utilizar os fornos a arco a partir de 1940, mas seu uso realmente se tornou comum pela indústria de produção do aço em 1970, sendo muito utilizados até os dias atuais, alguns com alterações, mas o princípio de funcionamento permanece o mesmo (CANDITO, 2009).

Os fornos a arco contribui significativamente para o aumento do conteúdo harmônico no sistema elétrico, sua principal característica é que devido sua resistência ser não linear, os valores de total harmonic distortion (THD) são sempre diferentes (PATRAO, DELEGADO, ALMEIDA, 2005).

Geralmente são utilizados transformadores delta-delta para alimentar os fornos a arco, de modo a bloquear a correntes de sequência zero, mas essa regra só é válida quando as cargas conectadas são equilibradas, por consequência as correntes também serão balanceadas, mas para fornos a arco trifásico essa regra não é válida, justamente por não terem linearidades em suas resistências no momento do arco, onde o arco elétrico pode tanto ocorrer entre as três fases ou apenas em duas ou até mesmo ocorrer nas três fases mas em instantes diferentes. A Figura 6 mostra a ligação de um forno a arco delta-delta com arco ocorrendo em dois eletrodos, de fato tal desequilíbrio pode gerar correntes de sequência positiva, negativa e sequência zero (DUGAN, 2004).

Figura 6 - Forno a arco desequilibrado gerando a correntes de 3ª harmônicas



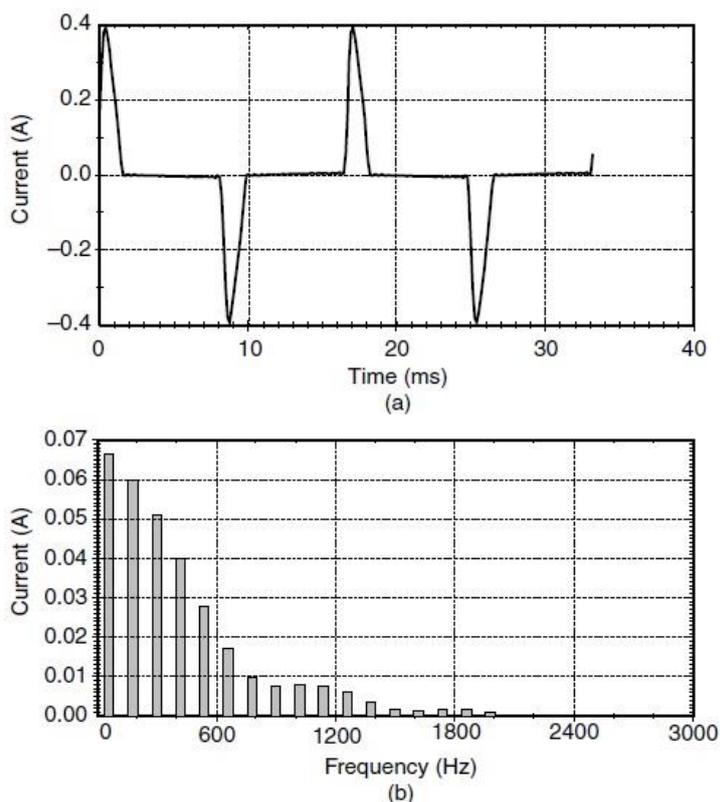
Fonte: Adaptado de Dugan, 2004.

2.3.7 Iluminação Fluorescente

Antes do uso das lâmpadas fluorescentes se tornarem comuns, a maior parte da iluminação artificial residencial e comercial era a partir de lâmpadas incandescente, carga linear que não causavam perturbação ao sistema elétrico (DUGAN, 2004).

Já com o avanço das lâmpadas fluorescente, obteve-se muitas vantagens como eficiência luminosa, vida útil, redução da potência nominal, entre outras. Mas em contra ponta, se tornou ou problema para o controle de QEE, tanto alterando o fator de potência da instalação como na injeção de conteúdo harmônico no sistema elétrico, fazendo com que o THD de uma instalação possa chegar de 15% a 20%, sendo uma grande fonte de harmônicos de 3^a, 5^a e 7^a ordem, como pode ser visto na Figura 7 (PATRAO, DELEGADO, ALMEIDA, 2005).

Figura 7 - Forma de onda e espectro das lâmpadas fluorescente



Fonte: Dugan, 2004.

2.4 Consequências das Distorções Harmônicas

Os problemas causados pela distorção harmônica de corrente e tensão na rede elétrica são de diversas proporções, mas segundo (EURELECTRIC, 2002), as cargas mais afetadas são equipamentos que possuem um alto fator capacitivo, devido a corrente ultrapassar os valores de corrente de operação do sistema, por ressonância. No entanto, esses efeitos são notados com mais frequência em instalações industriais que fazem o uso de conversores estáticos e também em instalações comerciais com grandes cargas de iluminação fluorescente que comportam um alto fator capacitivo.

Outros efeitos podem ser citados como:

- Alto aquecimento do condutor neutro e de transformadores, propiciado pela corrente harmônica, normalmente de terceira ordem.
- No sistema de distribuição, clientes têm a necessidade de reduzir a capacidade de operação de seus transformadores devido o aquecimento gerado pelas corrente harmônica.
- O sistema de comunicação telefônica próximo de redes elétricas pode ser afetada diretamente pelo fluxo de corrente harmônicas.
- O aumento de corrente nas instalações pode gerar o consumo indevido de energia, acarretando no aumento do custo das perdas (EURELECTRIC, 2002).

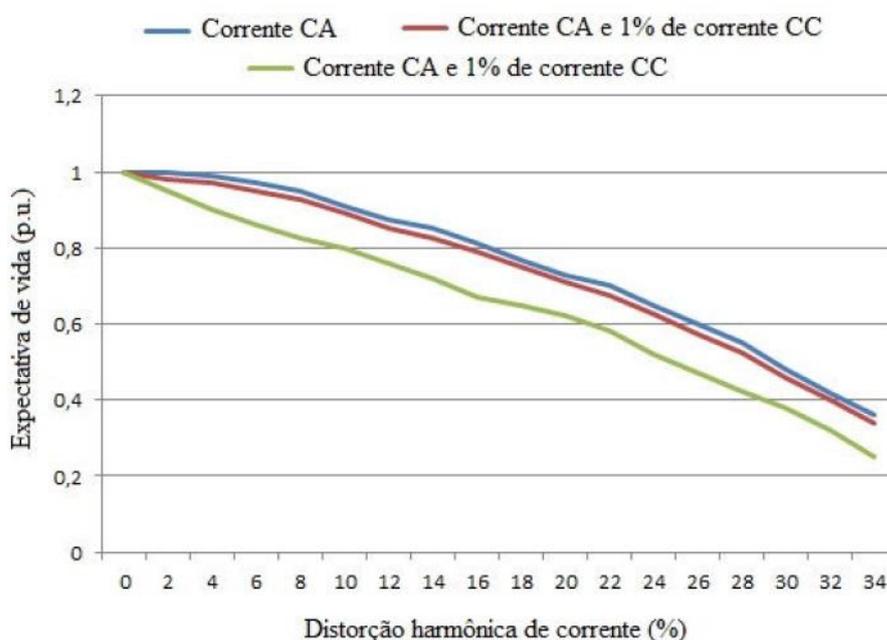
A consequência sofrida por distorção harmônica nos equipamentos conectados a rede elétrica, depende diretamente da sua sensibilidade, o quanto que a deformação das ondas de corrente e tensão possa afetar no seu desempenho. Um exemplo são aquecedores, fornos e muflas, onde são cargas puramente resistivas em que a forma de onda da rede de suprimento é irrelevante para seu funcionamento (EURELECTRIC, 2002).

Abaixo é citado outros dispositivos e equipamento que também sofrem grandes consequências com as distorção harmônica;

2.4.1 Transformadores

As distorções harmônicas em transformadores são de diversas proporções, os harmônicos de tensão fazem com que a tensão de transformação obtenha perdas nas magnitudes da relação de transformação. Já harmônicas de corrente, causam consequências mais graves, onde as correntes de todas componentes somam-se, podendo causar: aquecimento dos enrolamentos, perdas por correntes parasitas, diminuição da capacidade de isolação e também um dos fatores mais importantes é a diminuição da vida útil do transformador, a Figura 8 mostra graficamente a relação do tempo de vida útil *versus* o índice de distorção (SANKARAN, 2002).

Figura 8 - Expectativa da vida útil do transformador X conteúdo Harmônico



Fonte: JUNIOR, 2013.

2.4.2 Máquinas Rotativas

Como dito anteriormente um motor mais sofre com a perturbação do que causa harmônicos na rede, logo, obtém-se grandes perdas por correntes parasitas que se

alojam ao núcleo causando aumento na temperatura à medida que a tensão harmônica aumenta, também são prejudicados pelas perdas por histerese (DUGAN, 2004).

Mas segundo (SANKARAN, 2002) o maior efeito que contribui para as perdas, são causadas por oscilações torcionais, fenômeno que ocorre quando encontra-se em um mesmo sistema elétrico dois harmônicos de grandes amplitudes e com a sequências opostas.

Na Tabela 1, pode ser visto que o quinto harmônico é de sequência negativa e o sétimo harmônico é de sequência positiva, onde estes dois harmônicos são os mais comuns de serem encontrados no sistema elétrico. A soma desses dois harmônicos causa uma resultante de campo girante capaz de produzir oscilações de torção no eixo, isso significa que quando o campo magnético produzido pela corrente de frequência fundamental é somado com um campo girante gerado pela resultante das duas harmônicas, podendo alterar o modo de funcionamento do motor assim como ruídos, aquecimentos entre outras perdas (SANKARAN, 2002).

Para motores de pequeno porte pode ser elaborado mitigações para instalar em seu terminais, já com motores de grande porte, na sua grande maioria já vem com filtros para evitar problemas a partir de correntes harmônicas (SANKARAN, 2002).

Tabela 1 - Ordem das Harmônicas *versus* a Sequência

Harmonic Order vs. Phase Sequence	
Harmonic Order	Sequence
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19	Positive
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20	Negative
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	Zero

Fonte: SANKARAN, 2002.

2.4.3 Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores encontrados no sistema elétrico na sua grande maioria tem por finalidade a correção do FP, mas sua presença em um ambiente rico em distorção harmônica pode causar falhas em sua operação, onde, quanto maior a frequência harmônica menor sua impedância, servindo como caminho mais fácil para as correntes harmônicas, tais correntes, podem ser de grandes amplitudes causando o rompimento da isolação do dielétrico dos capacitores, levando-os a falha (SANKARAN, 2002).

Outro problema talvez o mais grave, é quando o banco de capacitores entra em ressonância, fato que ocorre quando a reatância capacitiva se iguala a reatância indutiva do circuito, justamente nas frequências harmônicas (MORENO, 2001).

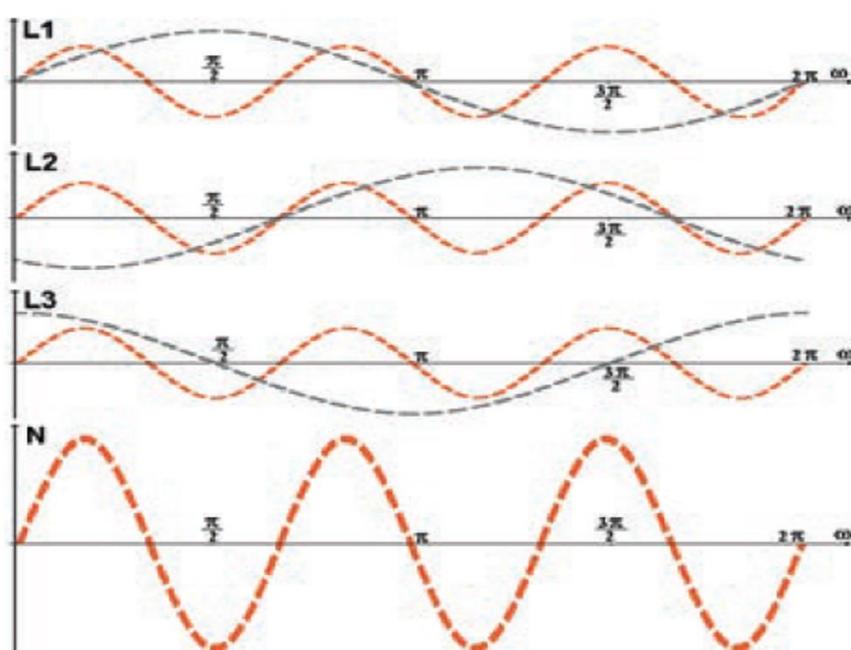
A ressonância pode ser de dois gêneros: em série ou em paralelo, onde em série propaga um aumento na amplitude de tensão, e em paralelo um aumento na amplitude de corrente, independente do tipo de ressonância, causam danos significativos tanto para o banco de capacitores quanto para os equipamentos da rede, como disjuntores, transformadores, condutores e até mesmo outras cargas instaladas na linha, entre outros fatores (SANKARAN, 2002).

2.4.4 Condutores

Por menor que seja as perdas, todos condutores a obtém quando por este uma corrente circula, mas essas perdas ainda são maiores quando correntes harmônicas de ordem superiores também percorrem o condutor, fenômeno chamado efeito pelicular, quanto maior a frequência harmônica da corrente, menor é o fluxo de corrente no centro do condutor, fazendo com que a corrente percorre apenas pela periferia do condutor, ocasionando o sobreaquecimento (PATRAO, DELEGADO, ALMEIDA, 2005).

Em instalações elétricas o condutor que deve-se deter mais atenção é o condutor neutro, sabe-se que em sistemas trifásicos equilibrados, não a corrente de neutro, mas em sistemas que não a tal equilíbrio, a corrente que percorre o condutor neutro é soma vetorial das três fases, podendo ser a soma das correntes monofásica, entretanto, ainda podem ser somadas com as correntes de sequência zero Figura 9, que em geral são as harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas como visto na Tabela 1 (PATRAO, DELEGADO, ALMEIDA, 2005).

Figura 9 - Corrente das três fases e 3ª harmônica somadas no neutro

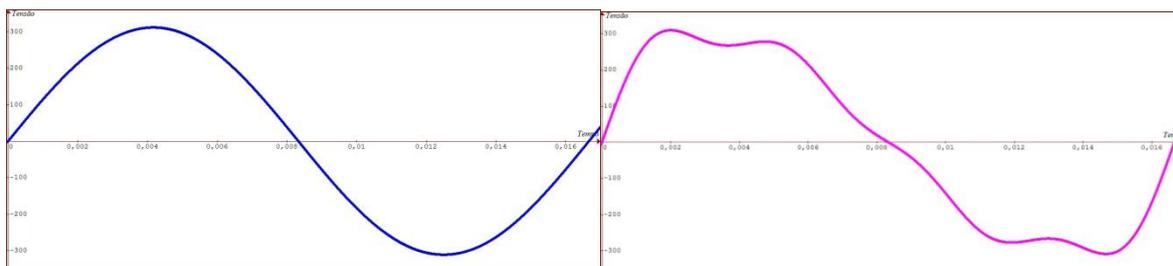


Fonte: Patrao, Delegado, Almeida, 2005.

2.4.5 Acionamentos Eletrônicos

Em sistemas elétricos que já contém distorção harmônica na tensão, dificultam os acionamento de velocidade variável (AVV) que usam como base para seu disparo o módulo e o ângulo da tensão, como pode ser visto na Figura 10. Na esquerda uma onda puramente senoidal onde seu valor de pico é exatamente o necessário para o perfeito funcionamento do dispositivo e, na direita é mostrado uma onda distorcida, desse modo o desempenho não será o mesmo que a forma de onda fundamental.

Figura 10 - Comparação da forma de onda de tensão com e sem distorção



Fonte: Do autor, 2018.

2.5 Indicadores

Indicadores de distorção harmônica são índices utilizados para quantificar a qualidade da energia de um sistema elétrico, visando a apenas o conteúdo harmônico.

O (PRODIST, 2017), cita diversos índices de distorções harmônicas, destinados a mensurar o desempenho da instalação, onde, na Tabela 2, é mostrado a terminologia dos índices, no qual, os indicadores são obtidos apenas para distorção harmônica de tensão, os mais usuais são os indicadores individuais e coletivos.

Tabela 2 - Indicadores de Distorção Harmônica de Tensão

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h _{máx}
Ordem harmônica mínima	h _{min}
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{p,95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{i,95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{3,95\%}$

Fonte: PRODIST, 2017.

Equação para obtenção do Indicador Individual de Tensão;

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

DIT_h = Indicador individual de tensão de ordem h .

h = ordem da harmônica individual.

$V_{h=1}$ = Tensão da harmônica fundamental.

Equação para obtenção do Indicador Total de Tensão;

$$DTT \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_{h=1}} \times 100 \quad (2)$$

$DTT \% = THD \% =$ Indicador de distorção harmônica total.

h = ordem da harmônica individual.

V_h^2 = Tensão da componente harmônica de ordem h .

$V_{h=1}$ = Tensão da harmônica fundamental.

Segundo (DUGAN, 2004), os indicadores mais utilizados para mensurar o conteúdo harmônico são THD e TDD , onde ambas as medidas podem ser adotadas tanto para tensão como para corrente, padrões elaborados pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

O índice de *THD* é obtido através da Equação 2, a única diferença é a nomenclatura devido a norma ser internacional.

$$TDD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad (3)$$

$TDD\%$ = Indicador de distorção total de demanda.

h = ordem da harmônica individual.

I_h^2 = Corrente da componente harmônica de ordem h .

I_L = Corrente de pico, ou máxima da carga fundamental.

Onde I_L pode ser mensurado fazendo a média das demandas máximas dos últimos 12 meses, indicador importante para novas cargas previstas na instalação.

Os cálculos para os índices são efetuados com os valores *rms* de tensão e corrente, onde dessa forma é obtido os valores em cada frequência harmônica, $h = 1, 2, 3$ até o valor da harmônica desejada.

2.6 Valor da Tensão *rms* ou Eficaz

O valor *rms* ou eficaz expressa a mesma relação de potência dissipada ao aplicar uma tensão de corrente contínua a uma carga resistiva, para melhor compreender pode se dizer que, para obter a mesma potência dissipada com uma tensão 220 CC, é necessário aplicar uma tensão AC de 311 V de pico com frequência de 60 Hz, também chamada de 220 V *rms* (CHARLES, 2013).

Normalmente no sistema elétrico, os cálculos de tensão e corrente são realizados para a frequência fundamental, no Brasil 60 Hz, desconsiderando qualquer perturbação ao sistema, pressupondo que a forma de onda é puramente senoidal, desse modo, os cálculos para determinar tensão e corrente são mais simplificados,

onde alguns instrumentos de medição como voltímetros e amperímetros são projetados para informar apenas o valor em *rms* (CHARLES, 2013).

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times V_1 \quad (4)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times I_1 \quad (5)$$

Onde V_1 e I_1 são os valores de pico da senóide.

Quando o sistema possui a perturbação pela distorção harmônica, é necessário somar cada parcela de tensão ou corrente das componentes harmônicas que contribui para a perturbação na forma de onda, como mostra as Equações 6 e 7.

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h \max} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{h \max}^2} \quad (6)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h \max} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h \max}^2} \quad (7)$$

Tomando como exemplo a Figura 11, onde possui característica da forma de onda senoidal pura com frequência de 60 Hz, a partir da Equação 4, obtém-se 220 V *rms*.

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 311$$

$$V_{rms} = 220 \text{ V}$$

Figura 11 - Forma de onda senoidal 60 Hz, 220 V *rms*



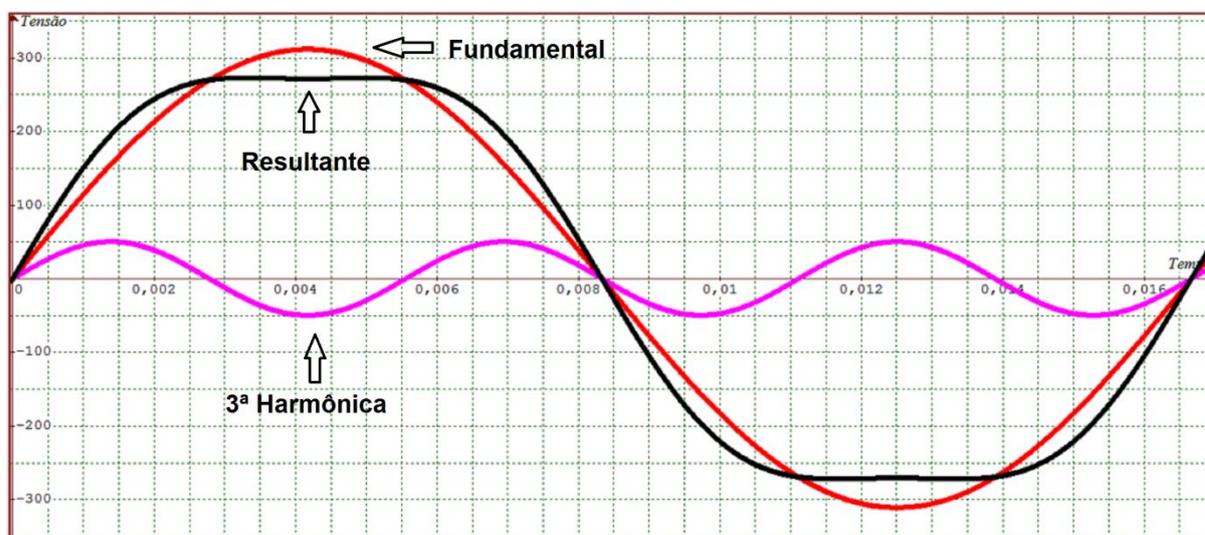
Fonte: Do autor, 2018.

Efetuada o mesmo cálculo para a forma de onda da Figura 12, onde a distorção causada pela terceira harmônica resulta em valores de tensão diferentes da fundamental.

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 261$$

$$V_{rms} = 184,55 \text{ V}$$

Figura 12 - Forma de onda distorcida pela terceira harmônica



Fonte: Do autor, 2018.

2.7 Valor *rms* Sinal Discretizados

Para se obter o valor eficaz verdadeiro de tensão ou corrente, utiliza-se o método da raiz quadrada da média aritmética das amostras do sinal obtido instantaneamente em uma janela de integração Equação 8 e 9, no qual o valor resultante é o valor real da forma de onda com ou sem distorções (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Onde esse método de condicionamento de sinal, é o mais utilizado para aquisição de sinais de tensão ou corrente nos instrumentos mais qualificados, que necessitam do valor real da amostra, sabendo que quanto menor o número de amostras discretizadas, maior será o erro do valor verdadeiro, a Figura 13, mostra um sinal senoidal discretizado, que é exatamente dessa forma que o instrumento de leitura irá enxergar o sinal (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_N^2}{N}} \quad (8)$$

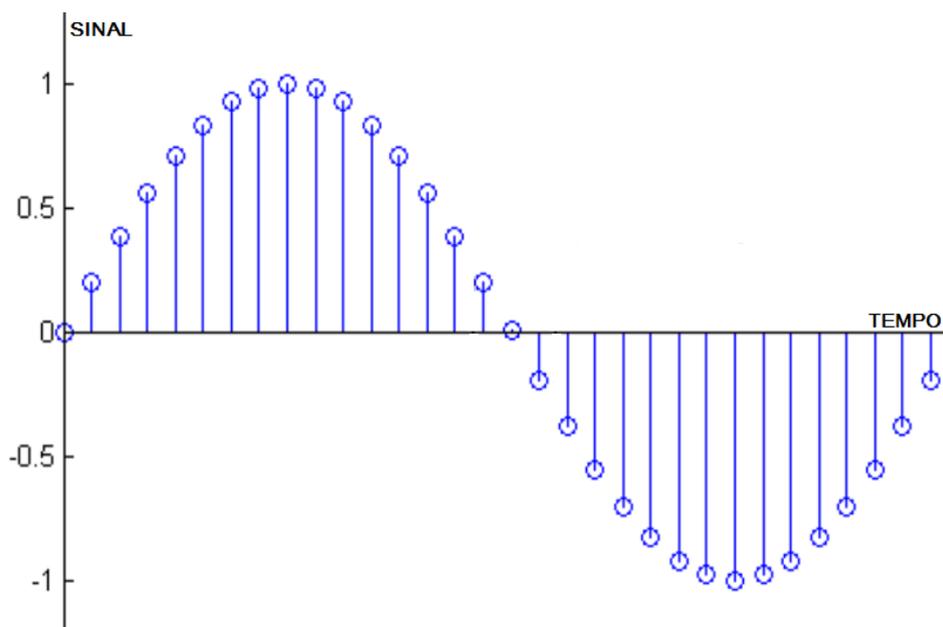
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i^2} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_N^2}{N}} \quad (9)$$

Onde;

V_i e I_i são os valores das amostras discretizadas.

N é o número de amostras.

Figura 13- Sinal senoidal discretizado



Fonte: Do autor, 2018.

2.8 Mitigação

Mitigação é considerada a ação de controle para minimizar ou até mesmo eliminar os efeitos da distorção harmônica no sistema elétrico, podendo ser de controle simplificado como adicionar bancos de capacitores ou reatores ao circuito, entretanto em situações mais extremas tem-se a necessidade de introduzir filtros ativos ou passivos no circuito (DUGAN, 2004).

Em sistemas que já compõe de distúrbios, a mitigação é realizada primeiramente explorando os métodos simplificados, como a adição de banco capacitores, redimensionamento ou até mesmo o reposicionamento de um banco de capacitores. Outra opção simplificada é adicionando reatores na linha, que podem modificar completamente a forma de onda de tensão e corrente, levando o índice de distorção harmônica a níveis aceitáveis que não prejudique o sistema elétrico e cargas conectadas (DUGAN, 2004).

Se as tentativas dos métodos mais simplificados não terem êxito, adota-se os procedimentos mais complexos como a adição de filtros. Mas, é muito importante

analisar se o sistema está realmente sendo perturbado pelas distorções. Isso porque todos os sistemas de energia possuem algum nível de distorção harmônica, e somente são mitigadas quando efetivamente causam problemas ao sistema elétrico (DUGAN, 2004).

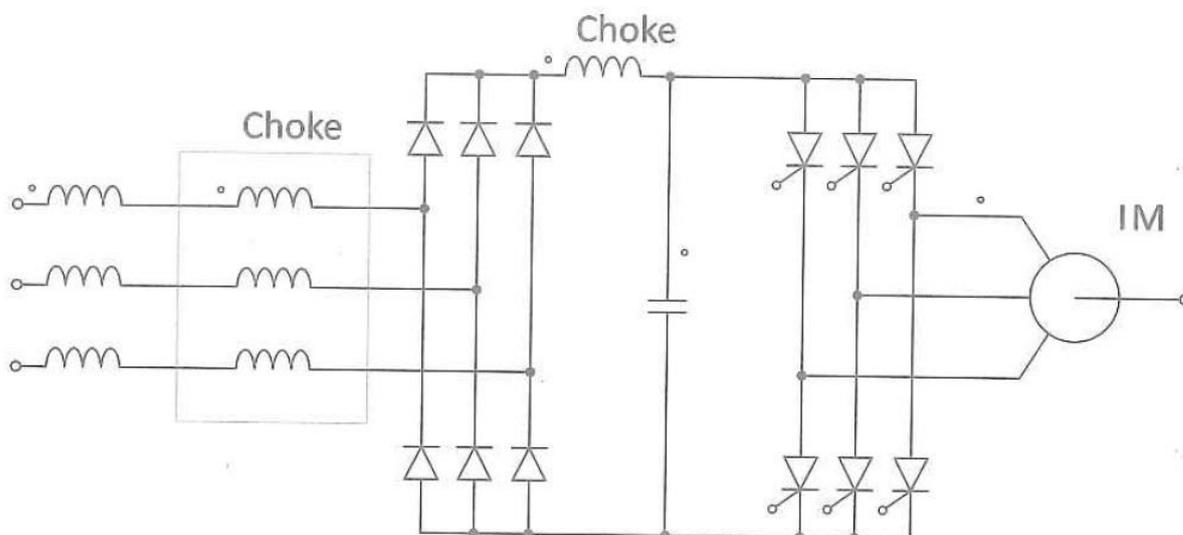
Existem diversos métodos de mitigação de harmônicas, onde as estratégias são traçadas para cada problema. Não a um método determinante que minimize todos os distúrbios do sistema elétrico. Os métodos mais utilizados são Capacitor Shunt, Reator de linha, transformador isolador, Transformador Zig-Zag, Filtros Passivos e Ativos.

2.8.1 Reatores de Linha

Reator de linha ou bobinas chokes, sua construção baseia-se em uma bobina com alta indutância, que atenua harmônicas de corrente de alta frequência, por estar conectada em série com a fonte de energia. Muito utilizados em acionamento de velocidade variável (AVV) que utilizam modulação PWM para controle de motor. Outra aplicação são em UPS, no qual seus circuitos elétricos modificam internamente a tensão de alimentação AC em energia DC carregando baterias, após reconvertendo para tensão AC, de modo sempre manter uma tensão fixa de suprimento nas suas cargas, onde são chamadas de fonte ininterrupta online (ZANGIROLAMI, 2016).

Os Reatores de linha podem ser instalados tanto na entrada dos conversores onde a tensão de alimentação AC ainda não foi retificada, quanto nos barramentos CC, após a retificação, como pode ser visto na Figura 14, em que mostra um esquema de um conversor AC-DC-AC.

Figura 14 - Conversor AC-DC-AC com bobina Choke



Fonte: Leão; Sampaio; Antunes, 2014.

O resultado que se obtém com a adição de bobinas chokes ao circuito é a redução das correntes de altas magnitudes, correntes de pico e também na redução no conteúdo harmônico.

Normalmente a impedância da bobina chokes é calculada para conter entre 3% a 5% da impedância total do circuito ou carga máxima do acionamento.

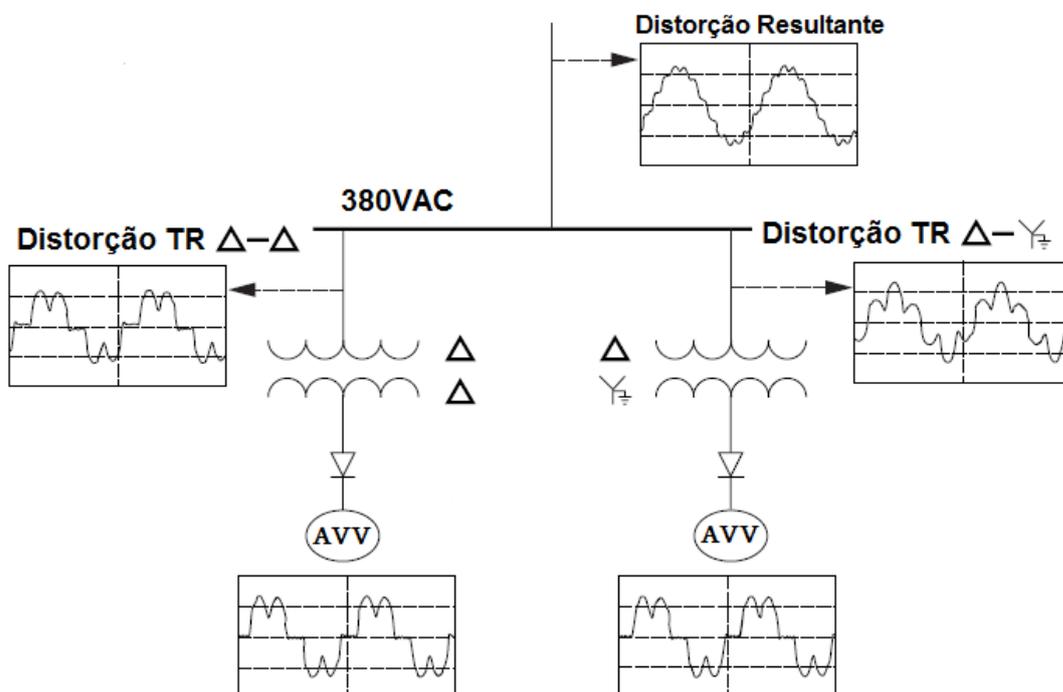
2.8.2 Associação de Transformadores

Os AVV com 6 pulsos por ciclo produzem harmônicos de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a ordem e assim sucessivamente. Os que mais causam distúrbios ao sistema são os de 5^a e 7^a ordem como dito anteriormente, devido suas elevadas magnitudes de tensão e corrente, mas podem ser mitigados com o agrupamento de dois AVV, colocados em paralelo, onde cada um possui um transformador em série, como mostra a Figura 15 (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

O método é composto por um transformador D-D e outro D-Y causando uma defasagem de 30° entre a tensão no secundário dos transformadores, onde os chaveamentos dos AVV são vistos pela fonte de energia em momentos de tempo

diferentes, por tanto a distorção resultante vista pela fonte é de proporção muito menor em relação a distorção causada por apenas um AVV, justamente por as harmônicas de 5ª e 7ª ordem serem canceladas, resultado devido ao somatório das componentes harmônicas de cada AVV (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Figura 15 - Associação de transformadores D-D e D-Y



Fonte: Adaptada de Dugan, 2004.

2.8.3 Conexão de Transformadores

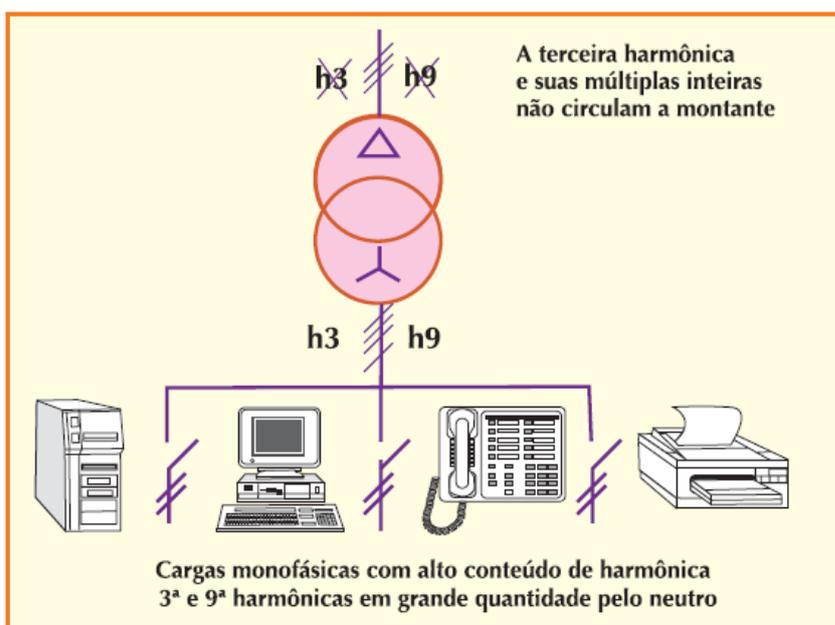
Algumas componentes harmônicas podem ser mitigadas apenas com o tipo de transformador que está conectado a carga não linear. Em que esse método é uma forma de isolar as cargas geradoras de distorção harmônica, a fim de confinar as harmônicas, não permitindo que ultrapasse para o restante do sistema elétrico.

A exposição de transformadores para o controle do conteúdo harmônico, pode alterar a sua eficiência, causar superaquecimento e obter um aumentando significativo de perdas, consequentemente reduzindo sua vida útil.

A conexão de transformador mais indicada é D-Y Figura 16, para o isolamento de harmônicas de terceira ordem e suas múltiplas, muito utilizado em sistemas de suprimento monofásico, onde as cargas são fontes de equipamentos eletrônicos (MORENO, 2001).

Transformadores conectados em Delta podem bloquear o fluxo de harmônicos de sequência-zero, normalmente de 3ª ordem (DUGAN, 2004).

Figura 16 - Trafo D-Y para isolamento dos harmônicos de 3ª ordem e múltiplas



Fonte: MORENO, 2001.

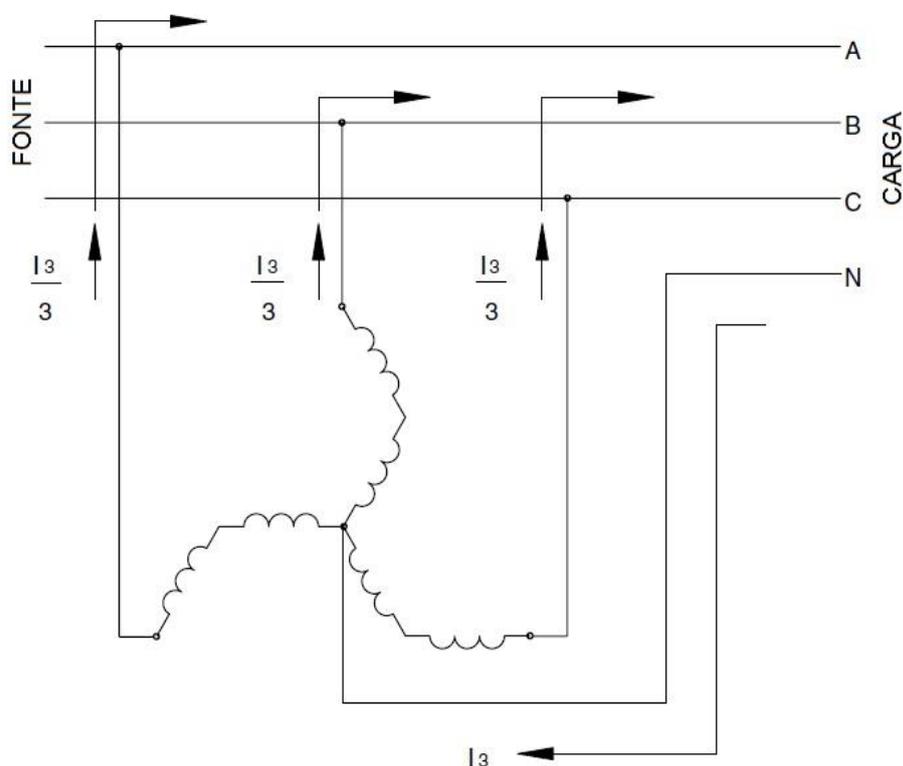
2.8.4 Transformador ZIG-ZAG

Outra configuração de transformador utilizado para mitigação de harmônicos, é o arranjo zig-zag, efetivo no desvio de correntes harmônicas de sequência zero múltiplas (3ª, 9ª, 15ª, etc), atuando de forma não a permitir os harmônicos gerados pela carga se propagarem para a fonte de alimentação ou para as demais cargas instaladas, como pode ser visto na Figura 17 (SANKARAN, 2002).

Dependendo das conexões dos enrolamentos do primário e secundário dos transformadores zig-zag, atuam de modo que, quando as três correntes somadas no

neutro, possuem uma diferença na amplitude e fase, desviará as correntes diretamente para o terra (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

Figura 17 - Transformador ZIG-ZAG



Fonte: SANKARAN, 2002.

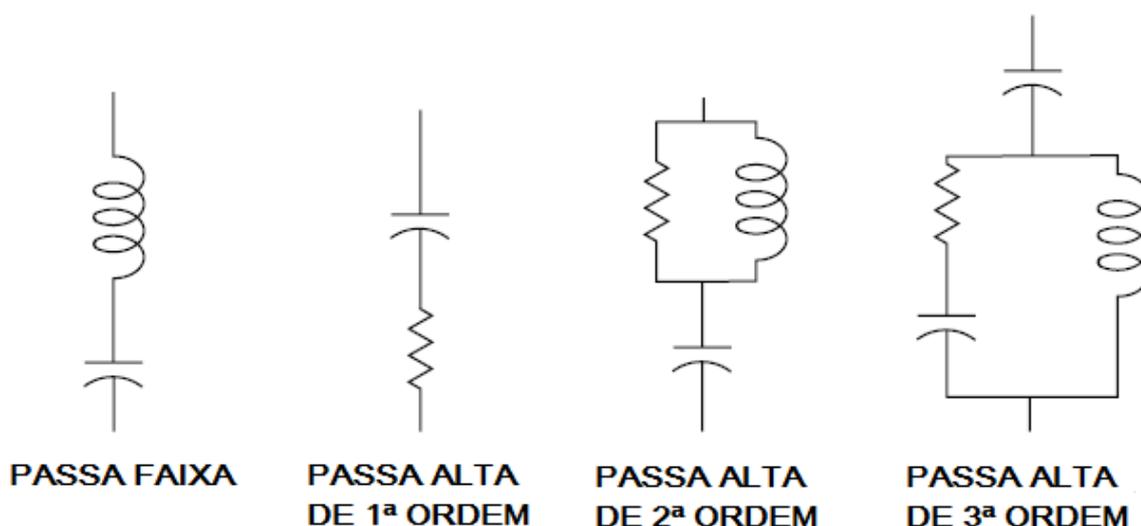
2.8.5 Filtros Passivos

Os filtros passivos são constituídos por elementos como resistência, capacitor e indutor, modelados e projetados para eliminar ou minimizar as amplitudes harmônicas indesejadas do sistema elétrico, a Figura 18 mostra alguns arranjos para cada configuração dos filtros passivos, podendo ser conectados em paralelo ou em série com o circuito (DUGAN, 2004).

Conforme a conexão dos filtros no sistema, atuam como um curto-circuito para as correntes harmônicas, redirecionando o fluxo de corrente, não permitindo que se integre a corrente fundamental, essa é uma característica dos filtros paralelo também conhecidos como filtro passivo shunt e são conectados o mais próximo possível da

carga. Já a característica do filtro série, é não permitir que as correntes harmônicas geradas pela carga ultrapassem o ponto em que estão instalados não são muitos utilizados, justamente por causarem grandes distorções na tensão de suprimento da carga (DUGAN, 2004).

Figura 18 - Arranjos de filtros passivos



Fonte: Adaptada de Dugan, 2004.

Os estudos para inserção de filtros em sistemas elétricos devem ser realizados com muita cautela, uma má projeção de filtro para o controle do conteúdo harmônico de uma região do circuito, podem trazer respostas controversas do que foi planejado, o filtro pode entrar em ressonância com o harmônico que se deseja mitigar, e elevando ainda mais a distorção harmônica do sistema elétrico.

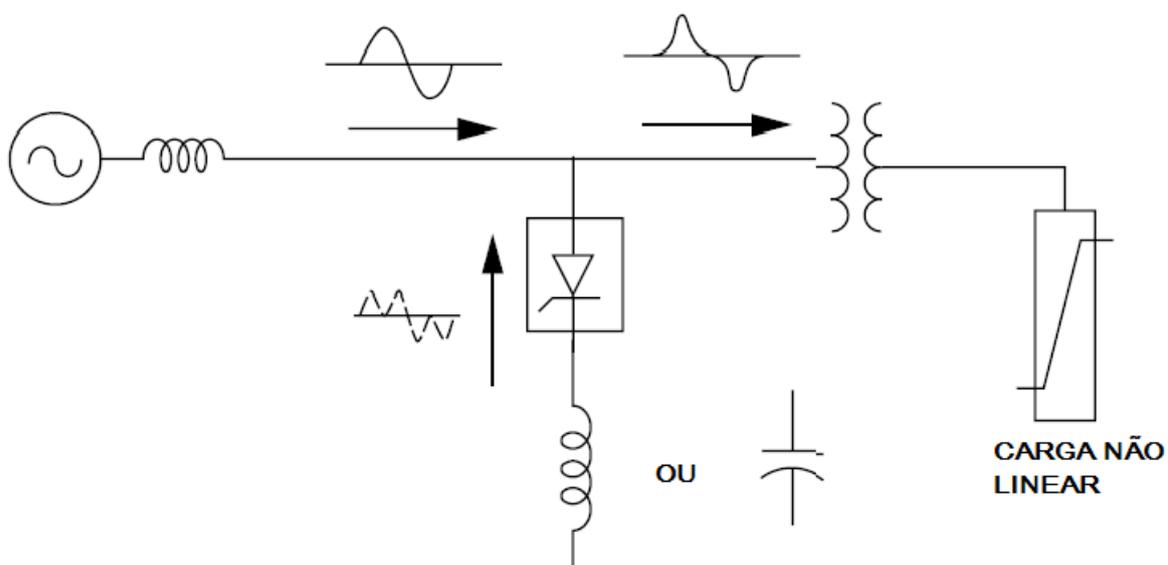
2.8.6 Filtros Ativos

São amplamente mais eficientes que os filtros passivos, conseguem atuar em sistemas elétricos complexos com altos índices de distorção, não necessitam de um estudo para analisar a impedância do circuito, porque não entram em ressonância com o sistema.

São conectados em paralelo com o circuito, geralmente ao lado da carga geradora de harmônica como é mostrado na Figura 19, um único filtro ativo pode

operar no controle de mais de uma harmônica, o método de filtragem ativo faz o uso da eletrônica de potência para tamanha performance, fator preponderante para seu custo ser mais alto que os filtro passivos.

Figura 19 - Operação do filtro ativo



Fonte: Adaptado de Dugan, 2004.

2.9 Métodos do Condicionamento do Sinal

O processamento de sinal está presente no dia-a-dia dos seres humanos, fazendo parte da maioria dos dispositivos modernos como celulares, televisão, computadores, etc, e também em atividades voltadas a indústria, medicina, e cada vez mais surgem aplicações no processamento de sinais (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

Na década de 60, a metodologia de processamento ainda era analógica em tempo contínuo, mas com a evolução da tecnologia e desenvolvimento de microprocessadores digitais como conversores A/D e D/A, pode-se implementar o condicionamento de sinal discretizado, e uma evolução em algoritmos, como a TRF (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

Um dos métodos mais utilizados para determinar e classificar as componentes harmônicas é a análise da série de Fourier, criada em 1822 pelo matemático Francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). A partir dessa poderosa ferramenta, é possível transformar qualquer função periódica em uma soma de senos e cossenos, onde se aplica o teorema da superposição (CHARLES; MATTHEW, 2013).

A série de Fourier pode ser modelada de forma trigonométrica ou exponencial, uma vez que o resultado final é o mesmo, e também pode ser tratada como uma função no domínio contínuo ou como uma função discreta no domínio da frequência (CHARLES; MATTHEW, 2013).

Para a caracterização das componentes harmônicas, a modelagem para a análise da série de Fourier é utilizado o condicionamento discretizado, de modo, ser mais descomplicado de se efetuar os cálculos, mas nada impede-se de tal determinação ser através de tempo contínuo.

Segundo (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014), o método mais usual para mensurar os valores *rms* de tensão e corrente para determinar os coeficientes das séries de Fourier, é obter dados da forma de onda da amostra digitalizada (Figura 13), e efetuar a TRF.

Independente do modo de processamento do sinal, o mais importante para análise da série de Fourier é a determinação dos coeficientes a_0 , a_n , b_n , a partir da Equação 10 análise em tempo contínuo, pode se determinar os valores de tais variáveis para obtenção do espectro do sinal a ser analisado, a Equação 14 é a análise em tempo discreto, onde o resultado a se obter é mesmo que em tempo contínuo.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t) + (b_n \cdot \sen(n \cdot \omega_0 \cdot t))) \quad (10)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (11)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega_0 t) dt \quad (12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sen(n\omega_0 t) dt \quad (13)$$

Sabendo que $f(t)$ é a função periódica do sinal e $\omega_0 = 2\pi/T$ é a frequência angular fundamental, onde T é a frequência do sinal.

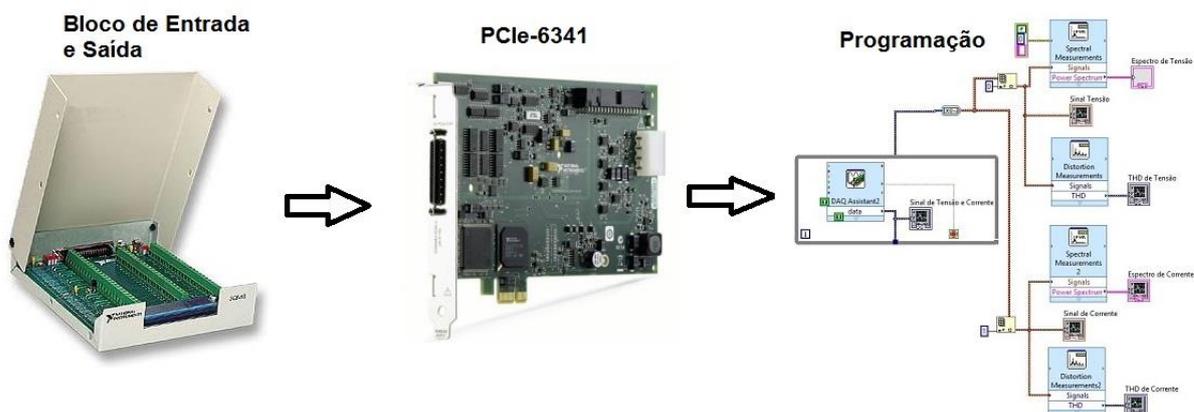
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (14)$$

2.10 LabView

A plataforma LabView é uma ferramenta muito poderosa, que pode ser utilizada em diversas aplicações (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015).

Basicamente, essa ferramenta se divide em três partes (Figura 20); PCIe-6341, bloco de entrada e saída e o software de programação.

Figura 20 - Sistema LabView



Fonte: Do Autor, 2018.

2.10.1 PCIe-6341

A PCIe é uma placa de aquisição dos dados, que fica dentro do gabinete da CPU do computador, ela faz a comunicação entre o sinal externo como um sinal de tensão, corrente, frequência, etc, com a placa mãe.

Abaixo segue algumas características de entrada e saída da PCIe (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015):

- Entradas e saídas digitais (bidirecionais): 24
 - Taxa máxima de *clock*: 1 MHz
 - Faixa máxima de tensão: 0 V a 5 V

- Entradas analógicas: 16
 - Resolução: 16 bits
 - Taxa de amostragem: 500 kS/s
 - Faixa máxima de tensão: -10 V a 10 V
 - Escalas de medição: 4
 - Escala máxima: -10 V a 10 V
 - Precisão: 2,19 mV

 - Escala mínima: -0,2 V a 0,2 V
 - Precisão: 60 μ V

 - Impedância de entrada: >10 G Ω em paralelo com 100 pF

- Saídas analógicas: 2
 - Resolução: 16 bits
 - Faixa máxima de tensão: -10V a 10V
 - Precisão: 3,271 mV

 - Taxa de atualização: 900 kS/s
 - Drive de corrente: 5 mA

- Contadores: 4

2.10.2 Bloco de Entrada e Saída

O bloco de entrada tem função de conectar o sinal do meio externo com a PCIe, possuindo conexões de fácil acesso para fixar fios e também contém terminais de medição para se conectar diretamente em terminais de componentes (pernas) (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

O modelo do bloco de entradas utilizado é SCB-68 e algumas características são apresentadas abaixo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009):

- Número de terminais: 68 (tipo parafuso)
- Tensão máxima de trabalho: 30 V_{rms}/42 V_{pp}/60 VDC
- Consumo de máximo de energia (+5 VDC, ±5 %): 800 mA

2.10.3 Linguagem de Programação

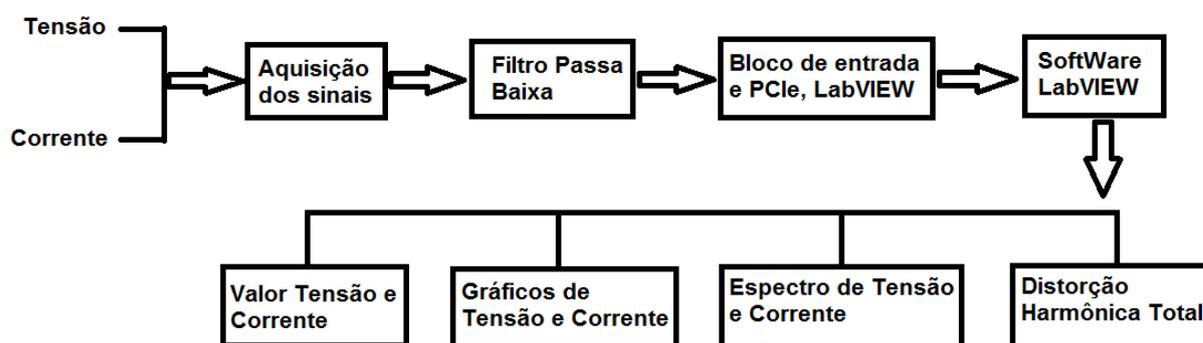
A linguagem de programação do software é bastante intuitiva, onde possui diversos blocos com funcionalidades específicas fazendo com que o tempo de dedicação a programação seja otimizado, da mesma forma podendo criar programas cada vez mais complexos.

3 METODOLOGIA

O objetivo principal do projeto é o desenvolvimento de um sistema capaz de distinguir as componentes harmônicas de até 25ª ordem, de um sistema elétrico monofásico (fase-neutro) efetuando leituras de tensão e corrente, utilizando a plataforma LabView.

E também, utilizando a placa de aquisição de sinais elaborada construída no projeto. A Figura 21 mostra o diagrama de blocos do processo das etapas de construção do projeto, onde cada etapa é apresentada em seguida.

Figura 21- Diagrama de blocos do projeto



Fonte: Do Autor, 2018.

3.1 Aquisição do Sinal de Tensão

Os sinais medidos da rede são sinais senoidais variantes no tempo, no qual um semiciclo da tensão é positiva e outro semiciclo da tensão é negativa. Para aquisição desses sinais, em alguns casos é necessário condicioná-los para que sejam apenas positivos. Um método muito utilizado é a retificação de precisão para o semiciclo negativo. Esse condicionamento é necessário para os conversores A/D dos microcontroladores que apenas efetuam leituras de tensão positiva.

O bloco de entrada do LabView utilizado no projeto (modelo SCB-68), possui os condicionamentos de sinais internamente, assim sendo, realiza medidas tanto de tensões positivas como tensões negativas, desse modo, não necessitou projetar um retificador de precisão para o semiciclo negativo.

Porém, os limites de tensão do bloco de entrada são +10 V e -10 V, com referência ao terra, então, necessitou-se rebaixar o sinal de tensão da rede elétrica. Pegando como exemplo uma rede monofásica 220 Vrms, onde a tensão de pico é no máximo 311 V, desse modo, é necessário reduzir a tensão para o nível de tensão aceitável do bloco de entrada.

Para isso, utilizou-se um transformador de potencial para reduzir a tensão, sendo 220/5,5 Vrms, no qual o primário do transformador é a entrada da rede elétrica e o secundário é o sinal de entrada do filtro passa baixa, que será a bordado adiante.

3.2 Aquisição do Sinal de Corrente

Para esta aquisição, utilizou-se um transformador de corrente (TC) Figura 22, onde seu funcionamento é induzir correntes de menor proporção no secundário do transformador.

O TC utilizado no projeto possui capacidade de corrente de 15 A no primário, logo, induzindo corrente de 6 mA no secundário. Algo tão importante quanto sua

capacidade é sua classe de exatidão, que é o limite do erro máximo garantido pelo fabricante (FINOCCHIO, 2008), a classe de exatidão do TC utilizado no projeto é de 0,1%.

Outra informação importante é o valor da resistência ou resistor conectado em serie com o secundário do TC, para que sua relação de transformação e exatidão, sejam as especificadas pelo fabricante.

Figura 22 - Transformador de Corrente (TC) utilizado no projeto

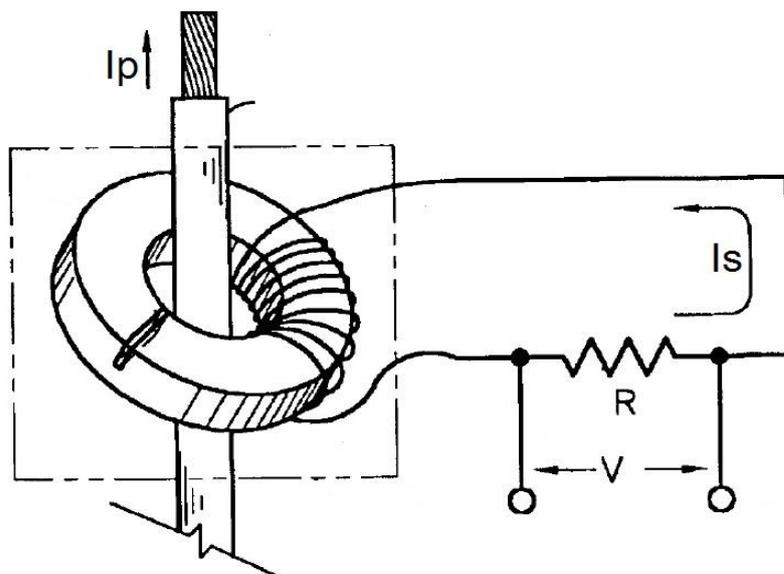


Fonte: Do Autor, 2018.

Para obter os valores de corrente no projeto, utilizou-se o resistor de especificado pelo fabricante ($10\ \Omega$), para fechar o circuito secundário do TC Figura 23, e medir a diferença de potencial do resistor.

Dessa forma, a corrente foi modelada no código do LabView, como tensão.

Figura 23 - Transformador de corrente com resistor em série



Fonte: Adaptado de Barbosa, 2012.

3.3 Filtro Passa Baixa

Como dito anteriormente, o projetado foi elaborado para identificar perturbações harmônicas até a 25ª harmônica de tensão e corrente, diante disso, para que as medições não obtivessem erros por conta de outros tipos de perturbações momentâneas, como transientes, oscilações, etc, foi necessário projetar um filtro passa baixa de terceira ordem, onde, a frequência de corte fosse atenuada a partir da 26ª harmônica.

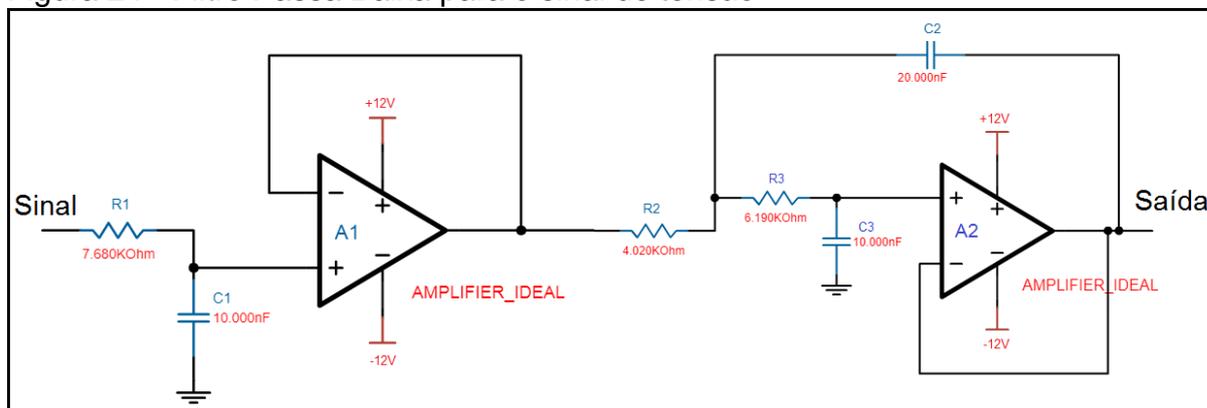
$$\text{Frequência de corte} = 60\text{Hz} * 26 = 1560\text{Hz} \quad (15)$$

Para projetar o filtro passa baixa, utilizou-se a ferramenta (Filter Design Tool) da TEXAS INSTRUMENTS, onde, é possível elaborar e simular filtros ativos de vários estágios.

Para utilizar a ferramenta, basta informar os parâmetros desejados do filtro, como frequência de corte, ganho V/V, ganho dB entre outros. Após informar os dados, a ferramenta gera os gráficos da frequência de corte, e propõe circuitos a ser

construído, que atenda os parâmetros solicitados pelo usuário. Na Figura 24, é apresentado o circuito projetado para o sinal de tensão.

Figura 24 - Filtro Passa Baixa para o sinal de tensão



Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 2018.

Para o filtro do sinal de tensão utilizou um ganho unitário, devido o sinal de entrada do filtro já se adequar nos limites do bloco de entrada do LabView. Então a relação de transformação de tensão entre a rede elétrica e a saída do filtro é a própria relação do transformador:

$$Relação = \frac{220}{5,5} = 40 \quad (16)$$

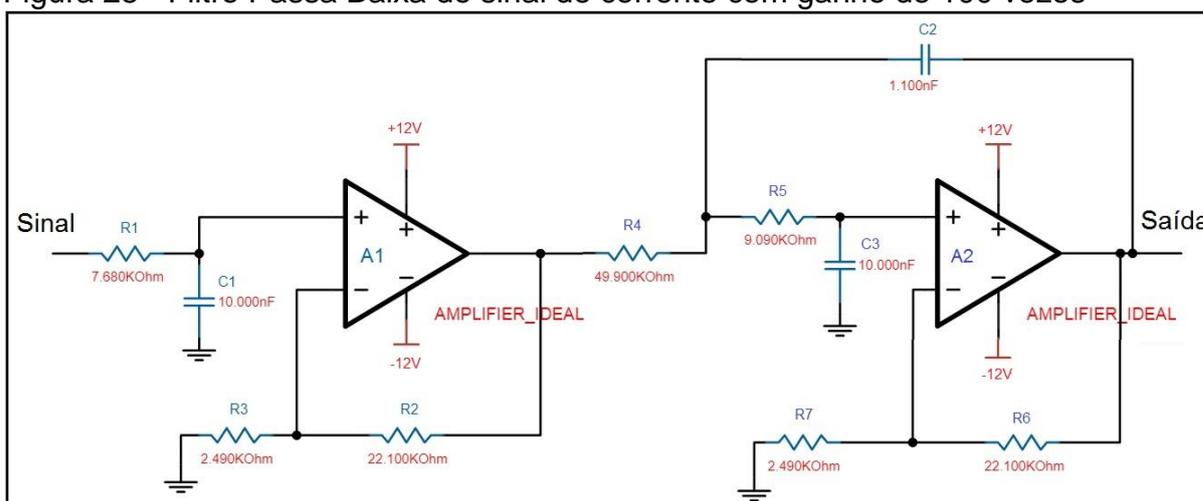
Entretanto, o filtro passa baixa do sinal de corrente, optou-se por dar um ganho de 100 vezes, sabendo que, quando circular uma corrente de 15 A no primário sua corrente no secundário é de 6 mA, então, a diferença de potencial no resistor de 10 Ω é 60 mV, logo, com o ganho de 100 vezes para a corrente de 15 A, a tensão de saída é de 6 V, dessa forma, a relação de corrente entre o primário do TC e a saída do filtro é:

$$Relação = \frac{15}{6} = 2,5 \quad (17)$$

Esses valores de relação de entrada e saída é muito importante, pois, esses valores que serão colocados no código do LabView para se obter os valores verdadeiros dos sinais que estão sendo mensurados.

O circuito projetado para o sinal de corrente pode ser visto na Figura 25 abaixo;

Figura 25 - Filtro Passa Baixa do sinal de corrente com ganho de 100 vezes



Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 2018.

3.4 Bloco de Entrada e PCIe LabView

Como dito anteriormente, o bloco do LabView já possui arquitetura física para o condicionamento de sinal, desse modo, não é necessário nenhum tipo de adaptação para a leitura dos sinais pela PCI, a não ser os já projetados no trabalho, como o ganho de tensão realizado no sinal de corrente.

3.5 Funções Internas do LabView

O código elaborado no software do LabView possui um bloco específico para recepção de sinais, chamado DAQ, que após os registros de leitura, envia os sinais para os blocos de multiplicação, que contém os valores das relações de tensão e corrente obtidos a partir das equações (16 e 17).

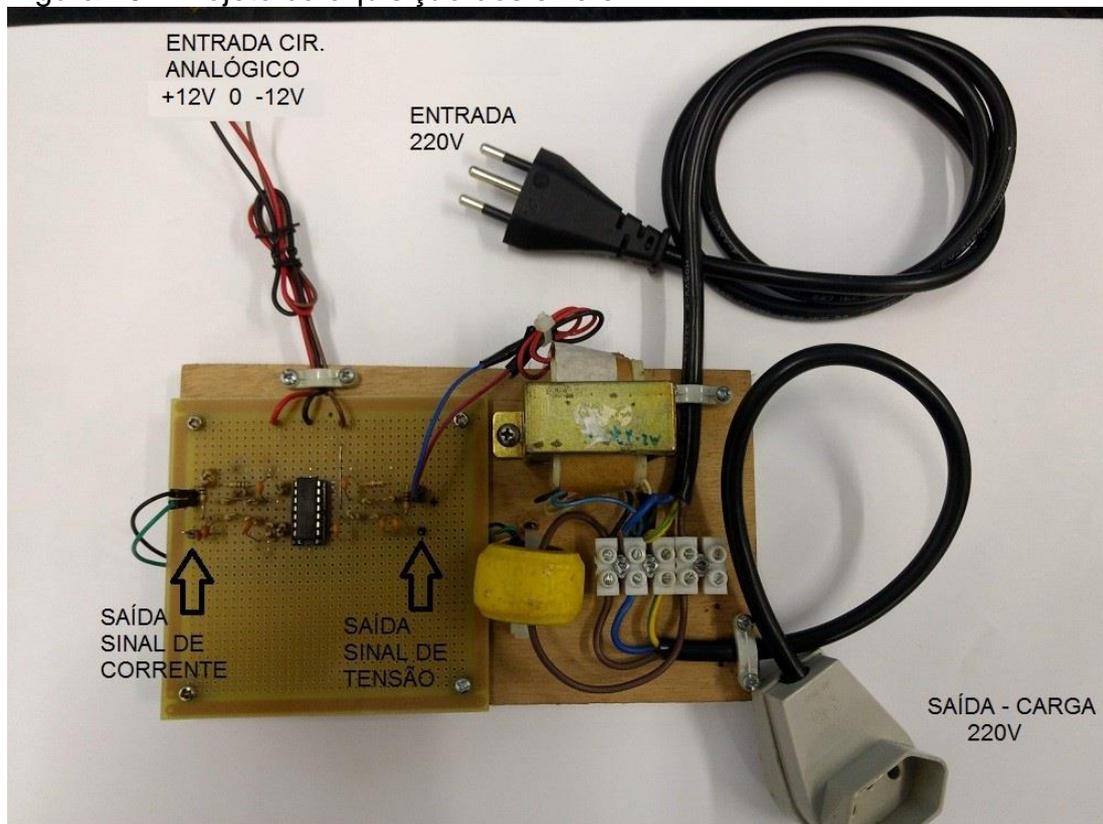
Em seguida, são enviados para os blocos que efetuam os cálculos do espectro de frequência, THD, a seguir é enviado para os blocos dos display gráficos, para a visualização dos sinais na tela do computador.

3.6 Montagem

Na montagem do circuito do filtro passa baixa, utilizou-se associação de resistores e de capacitores para chegar nos valores dos componentes do projeto. Assim sendo, alguns dos componentes não foi possível obter o valor exato, mas valores próximos.

O circuito de aquisição do sinal foi montado em cima de uma estrutura de madeira, para facilitar o transporte e também fixar o transformador de potencial e o TC, dessa maneira, foi possível conectar o cabo de entrada de energia com plug macho (2P+T) e o cabo de saída com plug fêmea (2P+T), assim, as cargas foram ligas direto no plug de saída, a Figura 26 mostra a construção do projeto.

Figura 26 - Projeto da aquisição dos sinais



Fonte: Do Autor, 2018.

Para alimentação do circuito analógico (+12, 0, -12 V), utilizou-se uma fonte de bancada, e onde está identificado com setas "saídas dos sinais de corrente e tensão" na Figura 26, são as entrada do bloco LabView.

3.7 Verificação

A Verificação é um ensaio realizado para certificar que o circuito projetado, está condicionando os sinais corretamente. Para isso utilizou-se um osciloscópio para ler os sinais na entrada e na saída do condicionador

Primeiramente verificou-se o condicionamento para o sinal de tensão, onde, conectou o plug macho em uma tomada de 220 Vrms, efetuou-se 10 leituras uma a cada 1 minuto, após calculou-se a média, como mostra a Tabela 3.

Já para condicionamento de corrente, não utilizou-se o TC, devido a verificação ser apenas para verificar a relação de tensão entre a entrada e a saída dos condicionador, logo, utilizou-se um gerador de sinal aplicando uma tensão de 60 mV na entrada do filtro passa baixa de corrente, onde está identificado como sinal Figura 25, e assim, registrando os valores de entrada e saída do condicionamento.

Tabela 3 - Verificação do circuito de aquisição dos sinais

Condicionamento de Tensão			Condicionamento de Corrente		
Entrada (V)	Saída (V)	Relação (E/S)	Entrada mV	Saída (V)	Relação (S/E)
221,2	5,56	39,78	62	6,13	98,87
220,4	5,50	40,07	61,5	6,03	98,05
220,6	5,50	40,10	60,2	5,99	99,50
220,8	5,51	40,07	61,2	6,01	98,20
220,8	5,51	40,07	61	6,00	98,36
220,8	5,51	40,07	61	6,00	98,36
219,8	5,49	40,03	60,1	6,06	100,83
221,4	5,58	39,67	60,1	6,05	100,67
222,6	5,61	39,67	60,3	6,07	100,66
220,9	5,52	40,01	60	5,94	99,00
Média		40,05	Média		98,94

Fonte: Do Autor, 2018.

Percebe-se que no condicionamento de tensão da rede, a tensão de entrada é maior que a saída. Já para o condicionamento de corrente, a tensão de entrada é menor que a saída. Por esse motivo, a relação de tensão da rede é a Entrada/Saída, e a relação de corrente é a Saída/Entrada.

3.8 Apresentação das Cargas

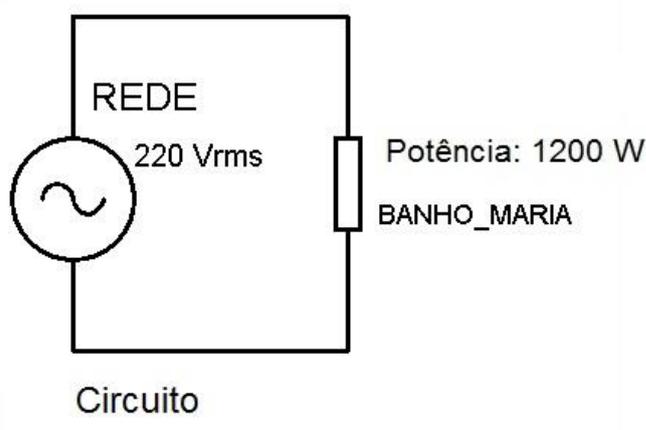
Nessa seção é apresentado as cargas utilizadas que serão testadas com o projeto elaborado. As cargas foram escolhidas de acordo com o que foi visto na fundamentação teórica, sabendo quais cargas são lineares e não lineares, afim de verificar seus índices de THD.

3.8.1 Carga 1

Para o primeiro teste foi definido utilizar um equipamento puramente resistivo, que quando conectado à rede elétrica, obtivesse a característica de uma carga linear. Então, a carga escolhida para o primeiro teste, é o equipamento chamado banho-maria, utilizado para aquecimento de água, muito importante para o processo das análises laboratoriais.

Esse equipamento é apenas uma resistência conectada a rede elétrica, como mostra a Figura 27, o equipamento e o circuito conectado a rede.

Figura 27 - Equipamento Banho-Maria



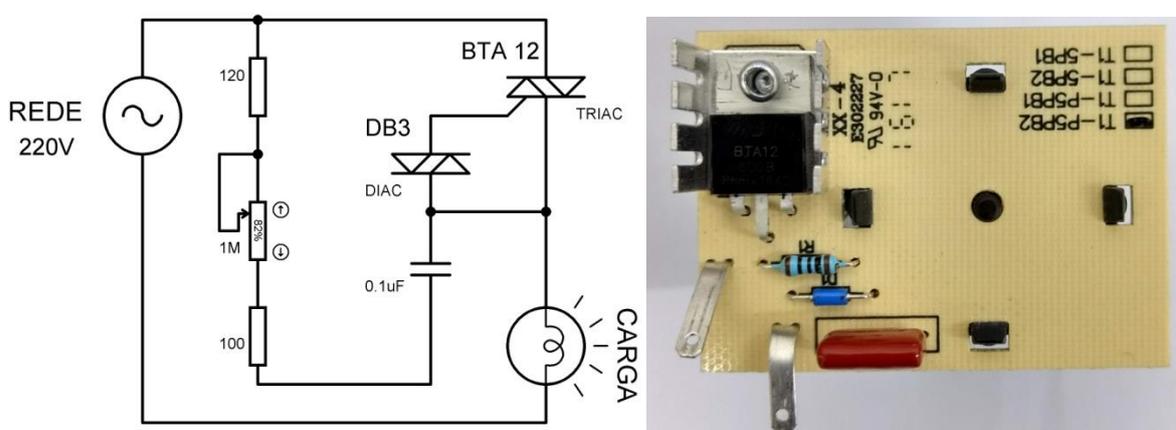
Fonte: Do Autor, 2018.

3.8.2 Carga 2

No segundo teste foi definido utilizar a mesma carga do teste anterior, porém, com acionamento eletrônico para controlar a potência do equipamento, no qual esse dispositivo foi retirado de um liquidificador doméstico. A Figura 27 mostra o circuito do acionamento eletrônico e seu hardware.

Este acionamento eletrônico faz o uso de um tiristor BTA 12 para seu disparo, onde é muito utilizado para controle de velocidade de motores e controle de temperatura, através de resistências elétricas. No qual, é o princípio de funcionamento da carga 1, com o acionamento eletrônico é possível controlar a potência dissipadas nas resistências do banho-maria.

Figura 28 - Esquema do acionamento eletrônico e hardware da placa



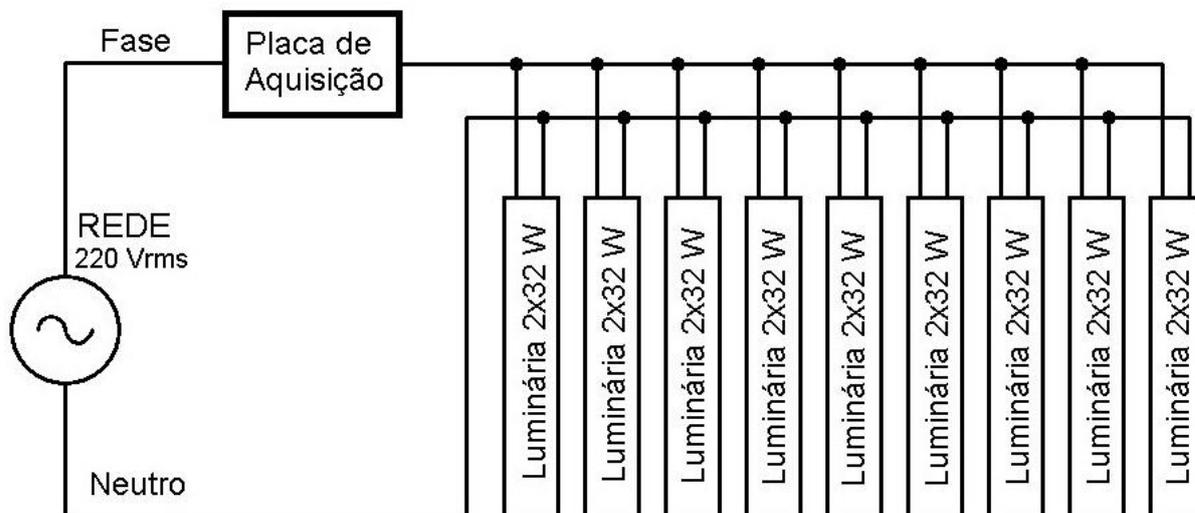
Fonte: Do autor, 2018.

3.8.3 Carga 3

A terceira carga escolhida, é um circuito de iluminação fluorescente com 9 luminárias, no qual, cada luminária contém 2 lâmpadas fluorescente de 32 W e um reator eletrônico de 2x32 W.

Um esboço do circuito de como a placa de aquisição, as luminárias e a rede elétrica serão conectados, é mostrado na Figura 29. A fase da rede elétrica, passa pela placa de aquisição, onde são mensurados os sinais de tensão e corrente.

Figura 29 – Circuito de Iluminação fluorescente com a placa de aquisição



Fonte: Do autor, 2018.

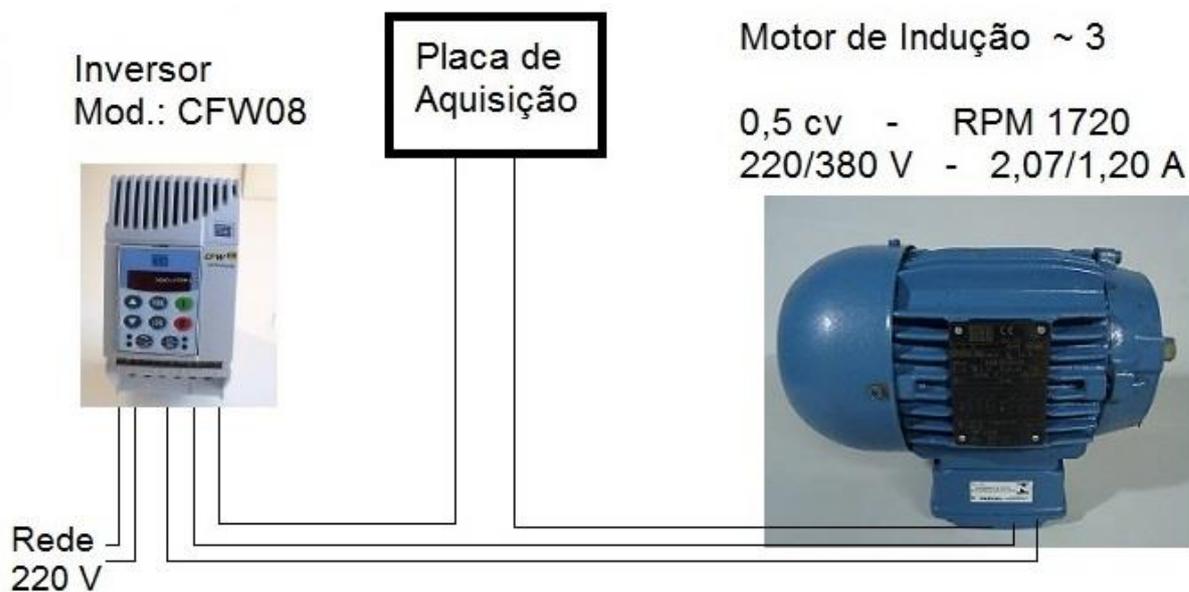
3.8.4 Carga 4

Por fim, a última carga escolhida foi um motor de indução trifásico e um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW08, para fazer o controle de velocidade.

O motor escolhido para o teste pode ser alimentado com tensão 220 V e 380 V trifásico, mas, a saída de tensão do inversor de frequência escolhido para o teste é 220 V trifásico. Então foi utilizado ligação delta nas bobinas do motor.

O projeto foi elaborado, apenas para efetuar leituras de circuitos monofásicos, logo, optou-se por realizar o teste em apenas uma fase de saída do inversor, como pode ser visto na Figura 30, onde, é mostrada a entrada 220 Vrms da rede elétrica, e a saída trifásica do inversor de frequência para o motor. Mas, antes de conectar-se ao motor, uma fase passa pela placa de aquisição, para efetuar as leituras de tensão e corrente.

Figura 30 - Montagem para o teste com motor e inversor de frequência



Fonte: Do autor, 2018.

3.9 Interface LabView

A interface do projeto é utilizada a tela do monitor, onde é apresentado graficamente os sinais de tensão e corrente, seus espectros de frequência e também os índices de THD.

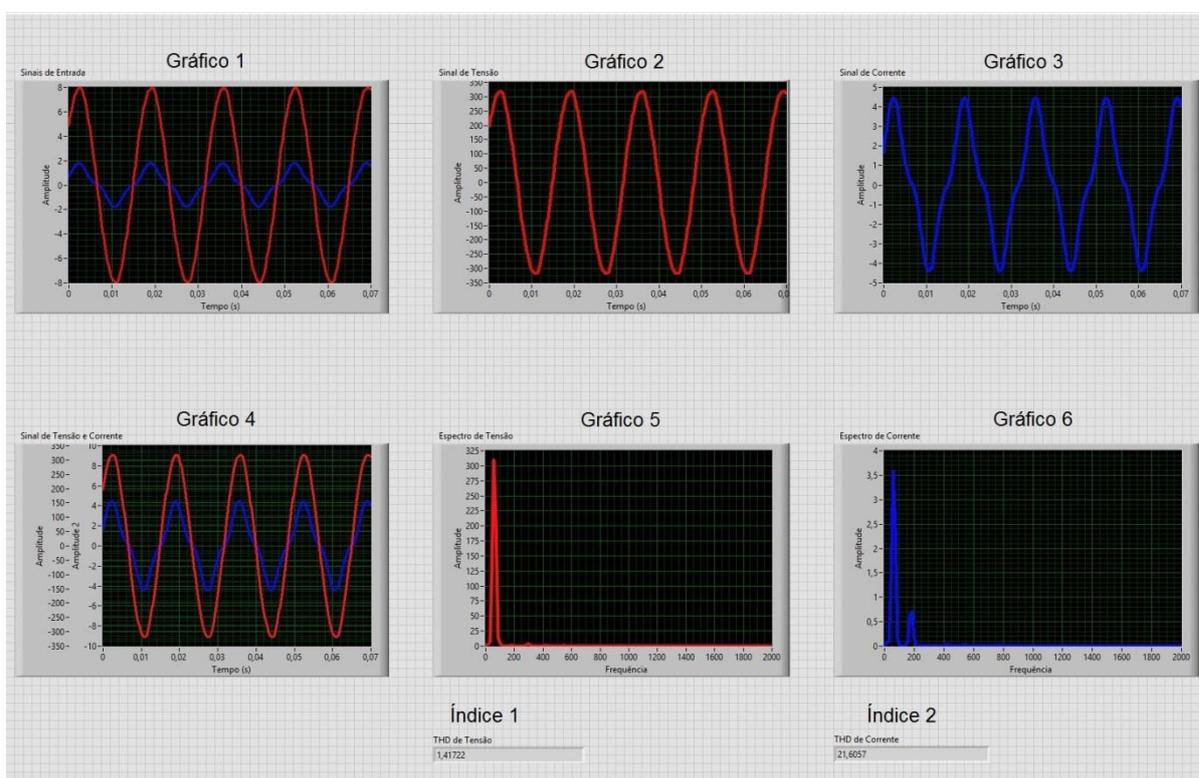
Na Figura 31, é mostrado a interface do LabView, no qual, contém 6 gráficos e 2 janelas de índices de THD, onde, cada gráfico possui sua identificação na parte superior.

A seguir é apresentada a função de cada gráfico e janela da interface;

- Gráfico 1 é mostrado o sinal que está sendo mensurado diretamente na placa de aquisição, sem a multiplicação pela relação, calculados na equação (16 e 17).
- Gráfico 2 apresenta somente o sinal de tensão verdadeiro, com a multiplicação pela relação.

- Gráfico 3 apresenta somente o sinal da corrente verdadeira, com a multiplicação pela relação.
- Gráfico 4 apresenta o sinal de corrente e tensão, já multiplicados pela relação.
- Gráfico 5 apresenta o espectro de frequência da tensão.
- Gráfico 6 apresenta o espectro de frequência da corrente.
- Índice 1 apresenta o THD de tensão.
- Índice 2 apresenta o THD de corrente.

Figura 31 - Tela de interface LabView

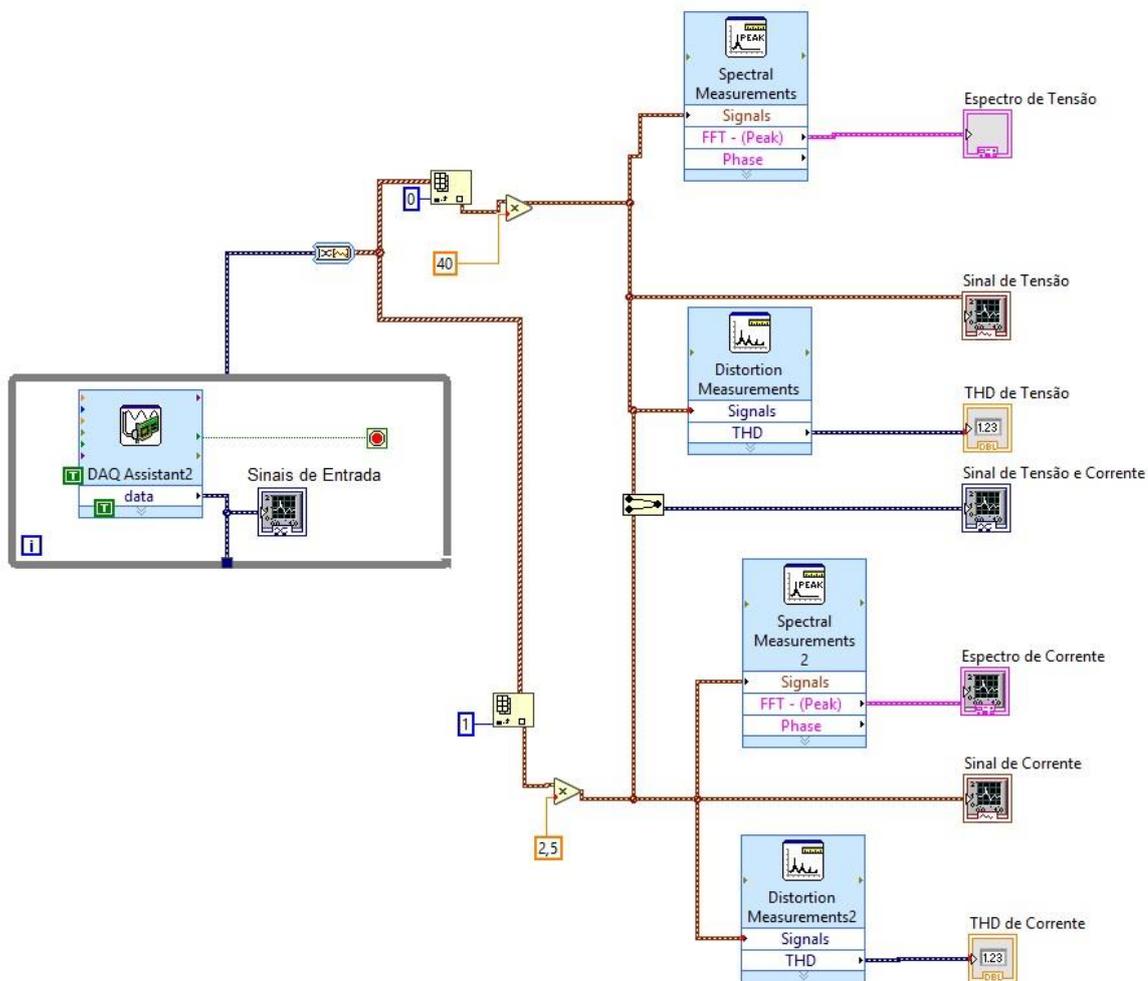


Fonte: Do autor, 2018.

Para realizar a interface no LabView, apresentada no tópico anterior, foi necessário desenvolver o código em seu software. Como mencionado anteriormente, sua linguagem de programação é bastante intuitiva, onde utiliza blocos com tarefas já definidas internamente. Dessa forma, basta selecionar o bloco com a funcionalidade desejada, e conectar aos demais, formando um diagrama de blocos.

O diagrama de blocos da programação realizada é mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Diagrama de blocos da programação do LabView



Fonte: Do autor, 2018.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo será abordado os resultados dos testes efetuados, com as cargas apresentadas no subtítulo 3.8. Primeiramente será mostrada a forma de onda gerada em cada carga, após, são apresentados os gráficos dos espectros de frequência.

Para cada gráfico de espectro frequência, foi exportado os arquivos .CSV, para obter os registros dos harmônicos e suas amplitudes, com essas informações, calculou-se os índices de THD para comparar com os índices gerados pelo LabView.

Em alguns gráficos mostrados a seguir, contém duas escalas “Amplitude” que se referem aos valores de tensão, e “Amplitude 2” indicando os valores de corrente.

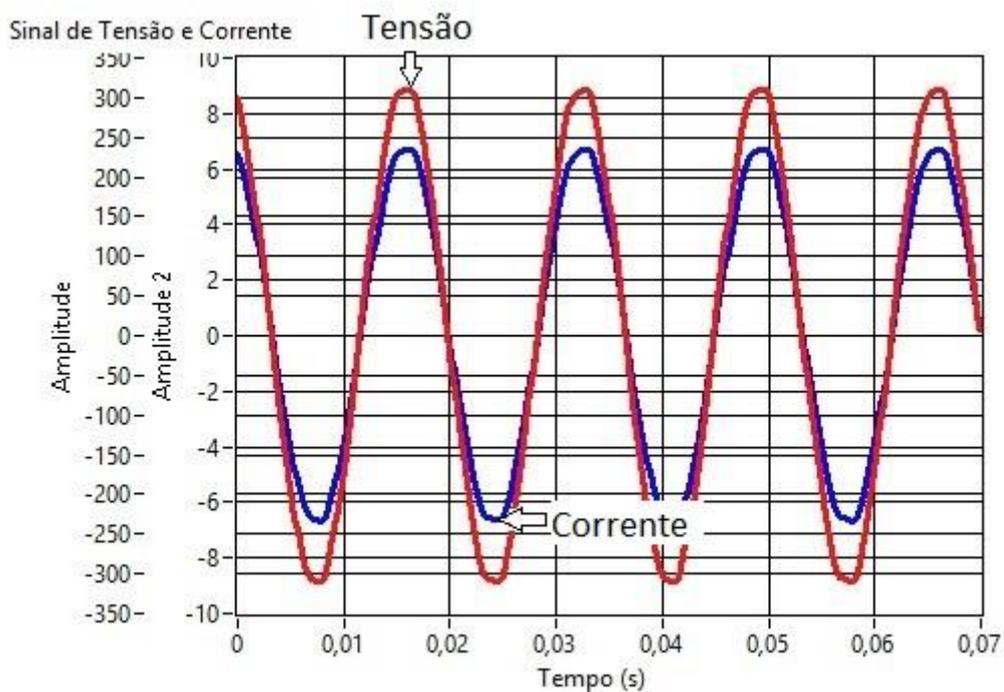
4.1 Teste Carga 1

Com base nos dados obtidos com esse teste, pode se avaliar que se trata de uma carga linear, sem nenhuma deformação na forma de onda tensão e corrente, como é mostrado na Figura 32. O mais importante é não haver nenhuma componente harmônica com amplitudes consideráveis prejudiciais ao sistema elétrico.

Analisando o espectro de tensão e corrente (Figura 33), pode se verificar que contém pequenas amplitudes harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordem. Mas, devido a carga

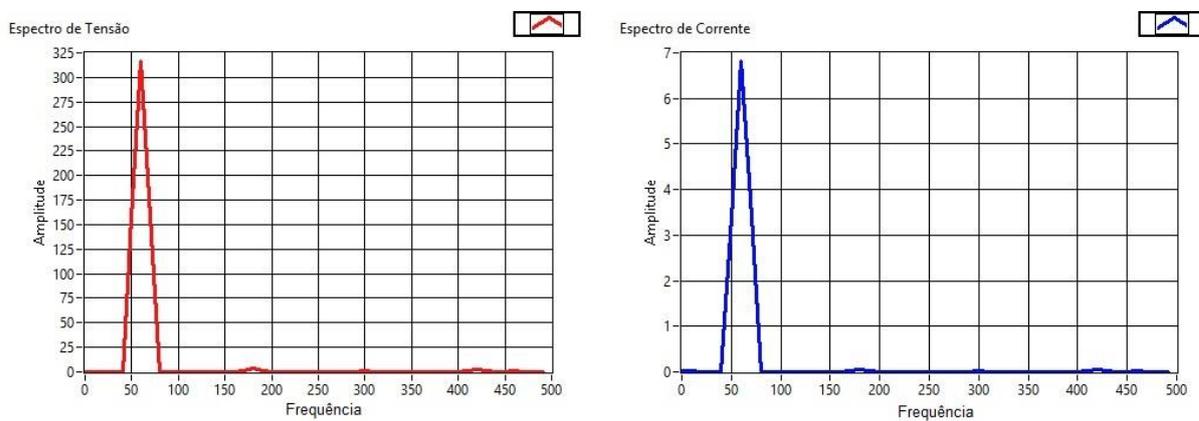
ser puramente resistiva, esses pequenos distúrbios podem ser proveniente da própria rede elétrica.

Figura 33 - Gráfico com tensão e corrente da carga 1



Fonte: Do Autor, 2018.

Figura 34 - Espectro de frequência de tensão e corrente da carga 1



Fonte: Do Autor, 2018.

Na Tabela 4 são apresentadas as amplitudes de cada harmônica deste teste, e também a frequência que ocorre os harmônicos.

Tabela 4 - Espectro de frequência da tensão e corrente para o teste da carga 1

Espectro de Tensão			Espectro de Corrente		
Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Volts	Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Ampere
1 ^a	60	316,15	1 ^a	60	6,8084
3 ^a	180	3,4153	3 ^a	180	0,0521
5 ^a	300	1,1101	5 ^a	300	0,0236
7 ^a	420	2,99	7 ^a	420	0,0575

Fonte: Do Autor, 2018.

A tabela 5 mostra a THD calculada e gerada pelo programa elaborado no LabView, também mostra a THD calculada manualmente, a partir das amplitudes dos harmônicos da tabela 4 utilizando a equação (2).

Tabela 5 - Índices de THD gerada pelo LabView e calculados manualmente

THD (%)			
LabView		Calculado	
Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
1,67	1,53	1,47	1,19

Fonte: Do Autor, 2018.

De acordo com (PRODIST, 2017), o limite da THD para sistema de distribuição com tensão menor ou igual a 1 kV, é 10% da tensão nominal. Sendo assim, o limite para se enquadrar nos níveis aceitáveis da operação, em um sistema com tensão nominal de 220 Vrms, é de 22 %. Portanto, carga 1 está dentro dos níveis aceitáveis de operação.

Para avaliar a distorção harmônica de corrente foi utilizado a norma IEC 61000-3-2, devido o (PRODIST, 2017) apenas se referir a THD de tensão, não apontando os limites de distorção de corrente. A norma IEC 61000-3-2, defini os limites harmônico de corrente para equipamentos com corrente nominal menor ou igual a 16 A.

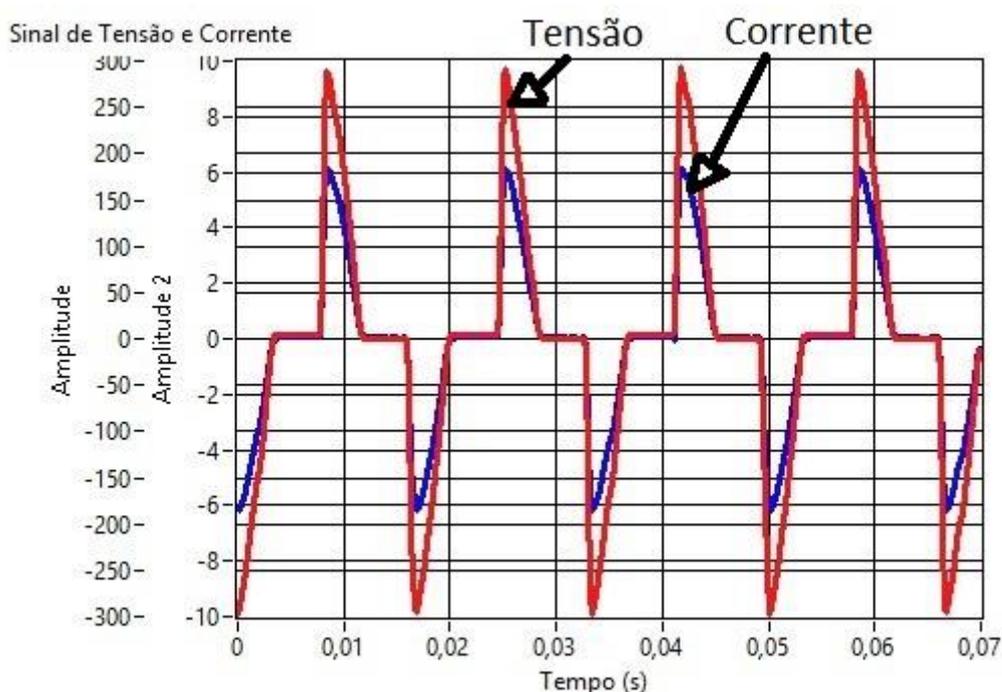
Então, de acordo com a norma, que define o limite para a harmônica de 3º ordem em 2,30 A, 5º harmônica em 1,14 A e a 7º harmônica em 0,77 A. Comparando esses limites com as amplitudes harmônicas de corrente na Tabela 4, pode-se perceber que a carga 1 está dentro dos limites de operação.

4.2 Teste Carga 2

O teste realizado com o acionamento eletrônico foi extremamente importante, pelo qual, pode-se perceber que qualquer que seja a carga, linear ou não linear, quando se faz o uso de acionamento eletrônico para seu disparo, acaba por se tornar uma carga não linear para o sistema elétrico.

Devido à carga controlada pelo acionamento eletrônico ser puramente resistiva, não a defasagem entre as forma de onda de tensão e corrente como mostra a Figura 34, porém, se o acionamento eletrônico fosse utilizado para controlar a velocidade de um motor, a corrente teria um deslocamento no tempo em relação a tensão.

Figura 35 - Forma de onda de tensão e corrente com o acionamento eletrônico

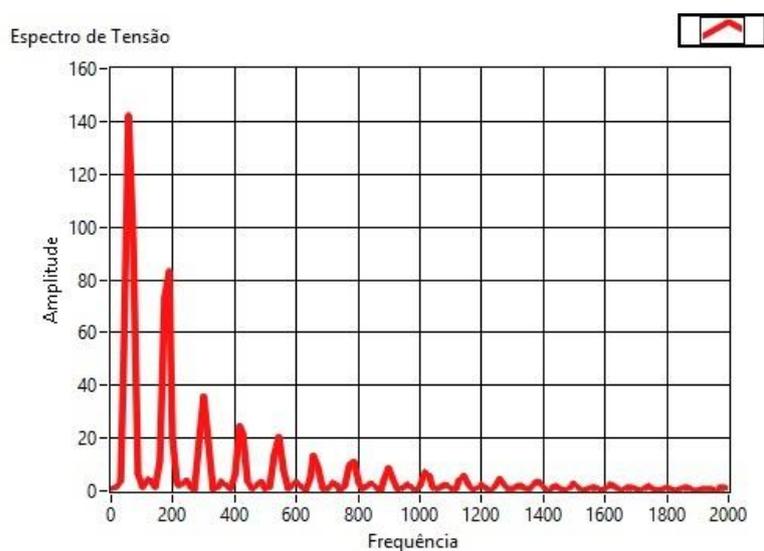


Fonte: Do Autor, 2018.

Comparando os espectros gerados no teste da carga 1, com os espectros gerados no teste da carga 2 (Figura 36 e 37), comprova o que foi mencionado anteriormente, que uma carga linear pode-se tornar não linear ao sistema, quando utilizado dispositivo de chaveamento em seu disparo e sem algum tipo filtro para minimizar as perturbações causadas.

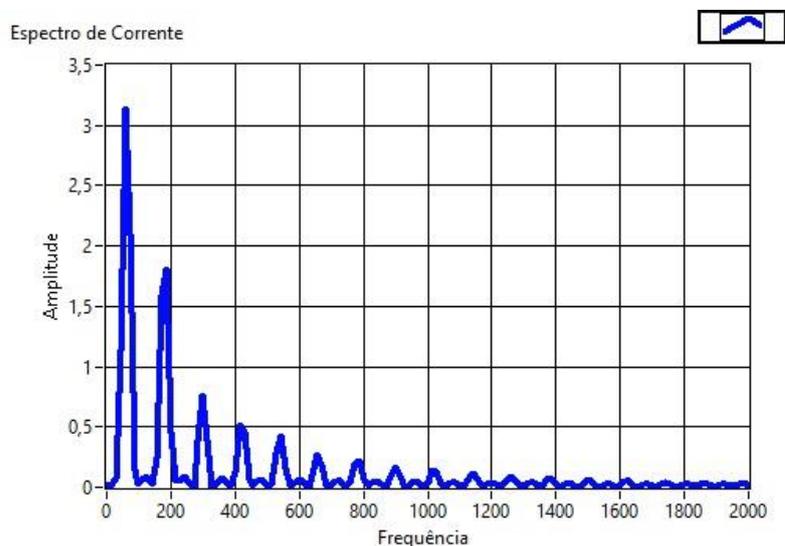
Os harmônicos gerados nesse teste também podem ser conferidos na tabela 6.

Figura 36 - Espectro de frequência da tensão do teste da carga 2



Fonte: Do Autor, 2018.

Figura 37 - Espectro de frequência da corrente do teste da carga 2



Fonte: Do Autor, 2018.

Tabela 6 - Espectro de frequência da tensão e corrente para o teste da carga 2

Espectro de Tensão			Espectro de Corrente		
Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Volts	Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Ampere
1 ^a	60	142,023	1 ^a	60	3,1353
3 ^a	180	83,2501	3 ^a	180	1,8092
5 ^a	300	35,9847	5 ^a	300	0,7669
7 ^a	420	24,7479	7 ^a	420	0,5137
9 ^a	540	20,6374	9 ^a	540	0,4201
11 ^a	660	13,5785	11 ^a	660	0,2674
13 ^a	780	11,2326	13 ^a	780	0,2241
15 ^a	900	8,6734	15 ^a	900	0,1699
17 ^a	1020	7,1109	17 ^a	1020	0,1405
19 ^a	1140	6,0295	19 ^a	1140	0,1191
21 ^a	1260	4,7254	21 ^a	1260	0,0937

Fonte: Do Autor, 2018.

Como pode ser visto, as harmônicas predominante para estas condições são ímpares, em algumas formas de mitigação para essas distorções é o uso de filtros passivos, ativos ou até mesmo bobina choke, onde, alguns acionamentos eletrônicos, já vem com bobina choke acoplada em seu circuito, justamente para diminuir a deformação da forma de onda de corrente.

O THD de tensão e corrente é mostrado na Tabela 7, nota-se que o valor do THD não depende da amplitude do sinal fundamental, mas sim, do quanto o sinal está distorcido, exemplo, a THD de tensão e corrente são bem próximas, mas a amplitude da tensão é bem maior que a amplitude de corrente.

Tabela 7- Índices de THD gerada pelo LabView e calculados manualmente

THD (%)			
LabView		Calculado	
Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
72,34	70,68	69,56	67,62

Fonte: Do Autor, 2018.

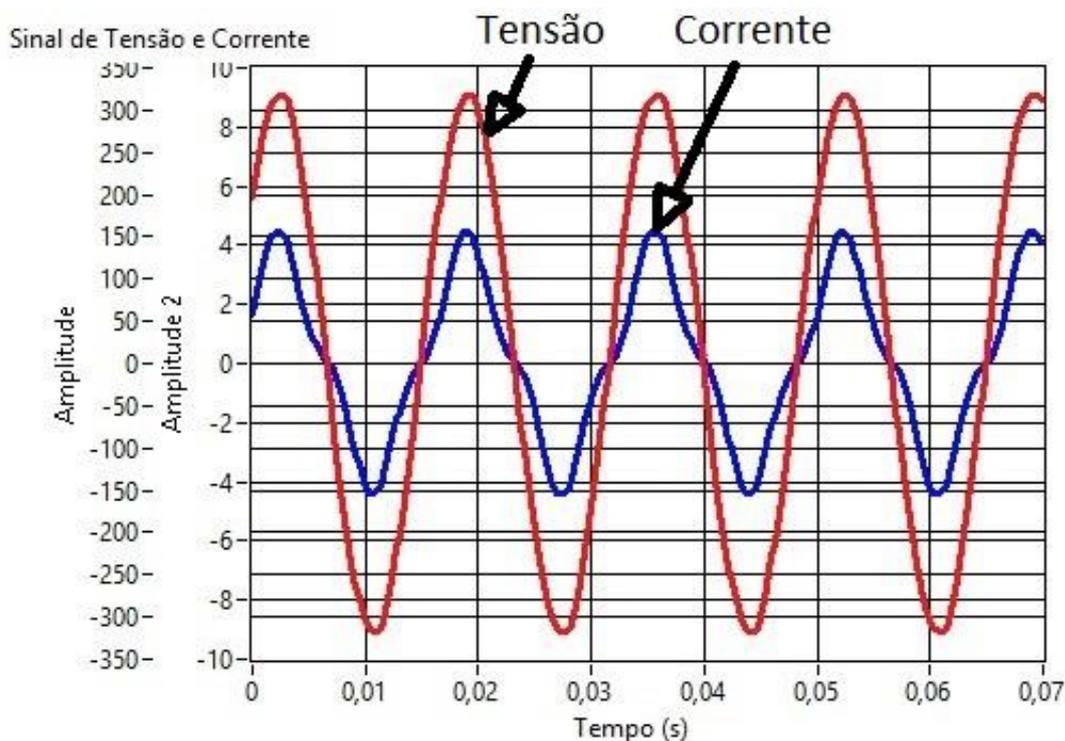
Neste teste, tanto o THD de tensão quanto as distorções harmônicas de corrente estão acima dos limites aceitáveis para operação.

4.3 Teste Carga 3

Um circuito que contenha grande quantidade de lâmpadas fluorescente instaladas, é bem provável que a corrente desse circuito, além de sofrer deformação, também tenha uma defasagem em relação à tensão. Isso é devido seus reatores eletrônicos possuir um alto FP capacitivo, elevando a tensão de partida, para ignição das lâmpadas.

Neste teste pode-se perceber que a corrente sofre uma deformação na sua forma de onda (Figura 38), onde, talvez até possa existir uma defasagem em relação a tensão, mas esse fato não foi demonstrado e nem comprovado no projeto, devido o trabalho apenas abordar a THD se baseando nas forma de ondas geradas nos testes.

Figura 38 - Gráfico com tensão e corrente da carga 3



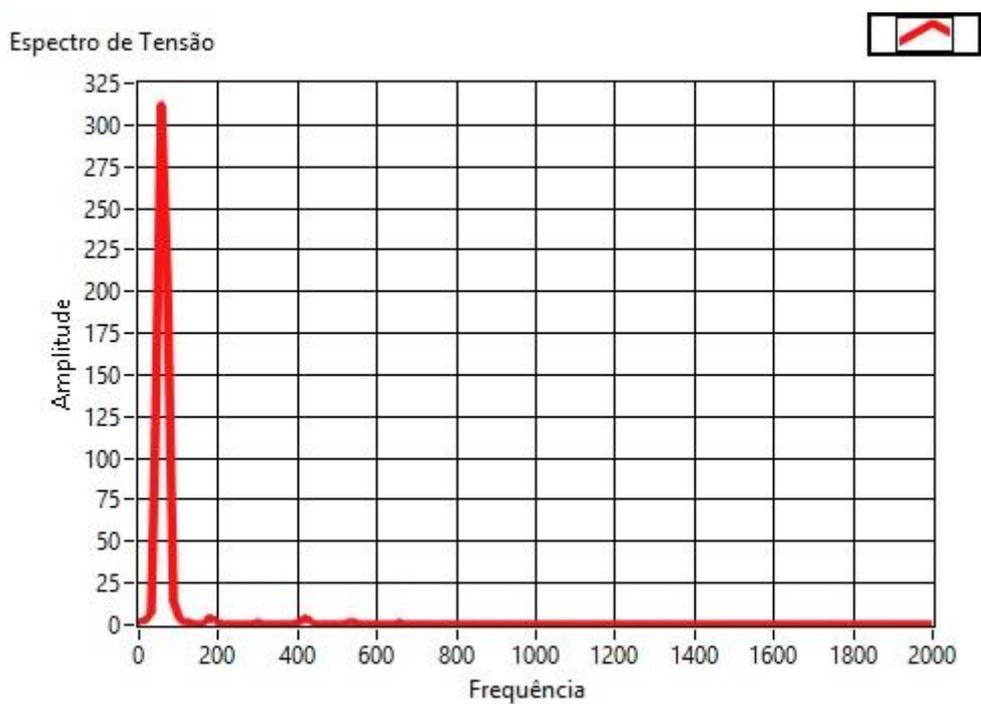
Fonte: Do Autor, 2018.

Os espectros de frequência de tensão e corrente gerados, são mostrados na Figura 39 e 40, onde pode-se perceber, a harmônica com maior amplitude de 3ª ordem, no sinal de corrente, aparecendo com bastante predominância.

Quanto mais cargas de iluminação fluorescente tiver no sistema, maior a deformação e amplitude harmônica de corrente. Neste teste utilizou-se apenas 18 lâmpadas, então, não foi possível perceber com eminência outras amplitudes harmônicas, além, da 3ª ordem.

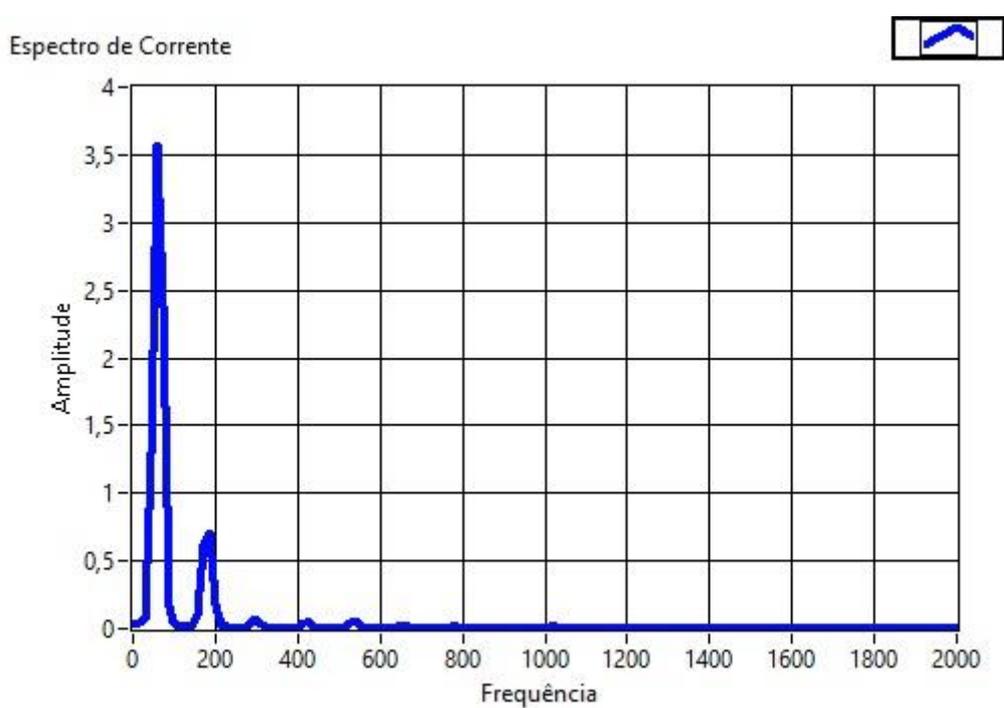
Na Tabela 8, podem ser conferidas as amplitudes harmônicas geradas com a carga 3. Em algumas células da tabela contém tracejados, significa que não contém harmônica em tal frequência, pegando como exemplo a de 5ª ordem do espectro de tensão.

Figura 39 - Espectro de frequência de tensão da carga 3



Fonte: Do Autor, 2018.

Figura 40 - Espectro de frequência da corrente da carga 3



Fonte: Do Autor, 2018.

Tabela 8 - Espectro de frequência da tensão e corrente para o teste da carga 3

Espectro de Tensão			Espectro de Corrente		
Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Volts	Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Ampere
1 ^a	60	311,732	1 ^a	60	3,5712
3 ^a	180	3,2151	3 ^a	180	0,7138
5 ^a	300	-----	5 ^a	300	0,0740
7 ^a	420	3,6319	7 ^a	420	0,0501

Fonte: Do Autor, 2018.

Neste teste, a THD de tensão e corrente se encontram dentro dos limites aceitáveis (Tabela 9), por mais que a THD de corrente indicou um valor alto de distorção. Isso é devido, a norma IEC 61000-3-2, avaliar e definir a distorção individual das correntes harmônicas. Um exemplo, para que esta carga fique fora dos limites aceitáveis da distorção de corrente, a 3^a harmônica deveria apresentar uma amplitude de 30% da corrente fundamental, sendo então 1,07 A, ou até mesmo a 5^a harmônica apresentar uma amplitude de 10% da fundamental, esses valores são definidos na norma IEC 61000-3-2, que foi tomada como base.

Tabela 9 - Índices de THD gerada pelo LabView e calculados manualmente

THD (%)			
LabView		Calculado	
Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
1,41	21,60	1,56	20,14

Fonte: Do Autor, 2018.

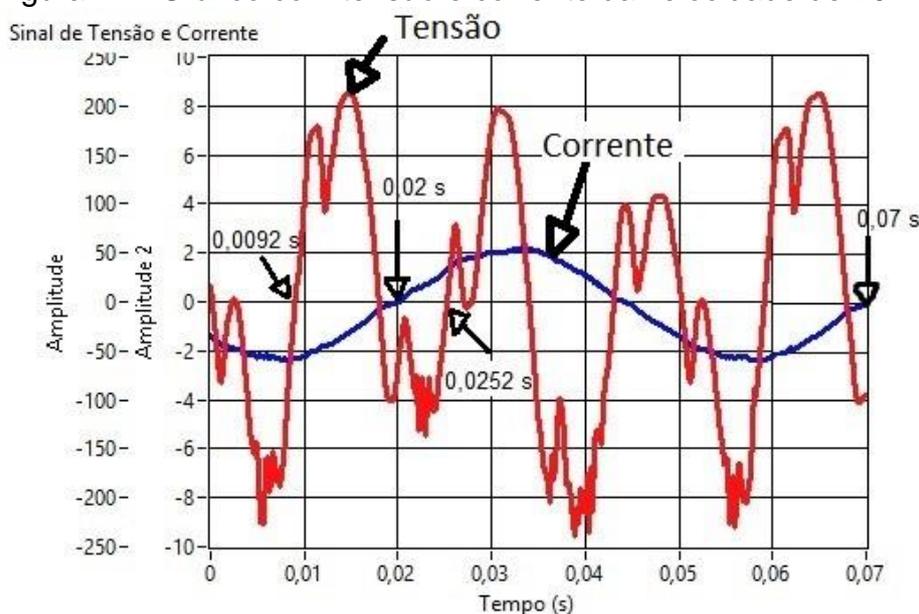
4.4 Teste Carga 4

Como já mencionado, o último teste utilizou-se um inversor de frequência para controlar a velocidade de um motor a vazio, afim de registrar as formas de onda de tensão e corrente.

A partir deste teste, pode se observar que este inversor, mantém a frequência da tensão de saída fixa, na frequência da rede (60 Hz), para as 5 velocidades programadas no inversor. Porque seu princípio de funcionamento é modular a amplitude de tensão na saída. E através de seu circuito interno com indutores, consegue variar a frequência de saída da corrente, obtendo a forma de onda senoidal.

Esse fato pode ser analisado na Figura 41, no qual se refere a forma de onda de tensão e corrente na frequência de 20 Hz programada no inversor. Olhando para o sinal de tensão, onde faz o cruzamento por zero no início do ciclo e no final do ciclo, onde está indicado pelas setas em 0,0092 e 0,0252 segundos, pode se observar que o período entre as duas setas é de 16 milissegundos, sendo então uma frequência de 60 Hz. Fazendo o mesmo procedimento para o sinal de corrente, indicado pelas setas em 0,02 e 0,07 segundos, o período entre as duas setas é de 0,05 segundos, sendo então uma frequência de 20 Hz, dessa forma, comprovando que a variação de frequência ocorre apenas na corrente.

Figura 41 - Gráfico com tensão e corrente da velocidade de 20 Hz



Fonte: Do Autor, 2018.

Utilizando o mesmo método para os testes das demais velocidades programadas; 30, 40, 50, 60 Hz, pode-se verificar que o conceito continua na variação de frequência da corrente. Os registros gráficos dos testes nestas frequências são mostrados na Figura 42.

Algo que também pode-se notar, é que quanto mais próximo a frequência ajustada no inversor é da fundamental (60 Hz), a forma de onda de tensão da saída do inversor é cada vez mais senoidal, e a corrente assume os valores da frequência fundamental. Essa característica pode ser observada na (Figura 42, D), onde, a forma de onda de tensão mantém uniformidades entre seus ciclos, algo que não ocorre nas outras frequências programadas, como pode ser visto nas Figuras 42 - A, B e C. Onde a forma de onda de tensão não mantém uniformidade entre seus ciclos.

Figura 42 - Gráficos com tensão e corrente das velocidades; 30, 40, 50 e 60 Hz

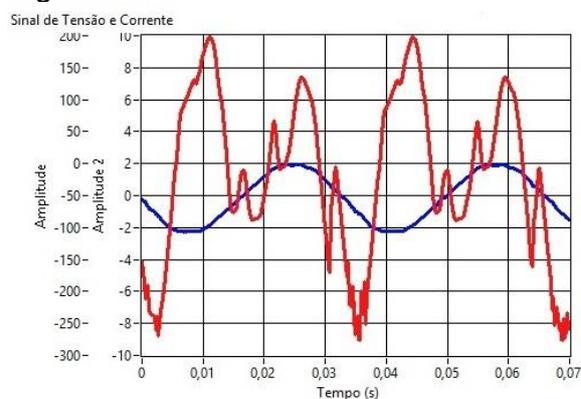


Fig. A: Forma de onda de tensão e corrente a 30 Hz.

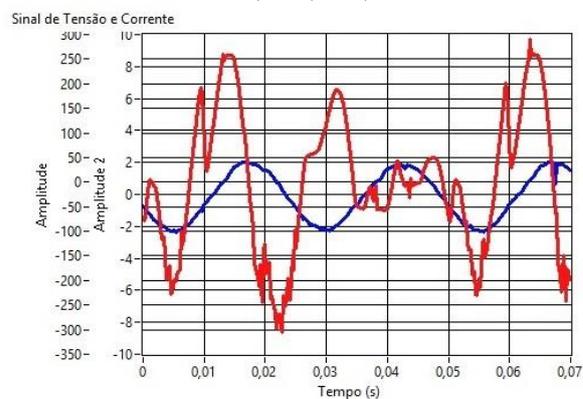


Fig. B: Forma de onda de tensão e corrente a 40 Hz.

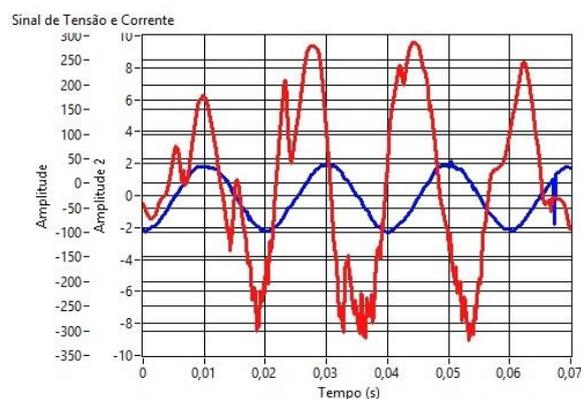


Fig. C: Forma de onda de tensão e corrente a 50 Hz.

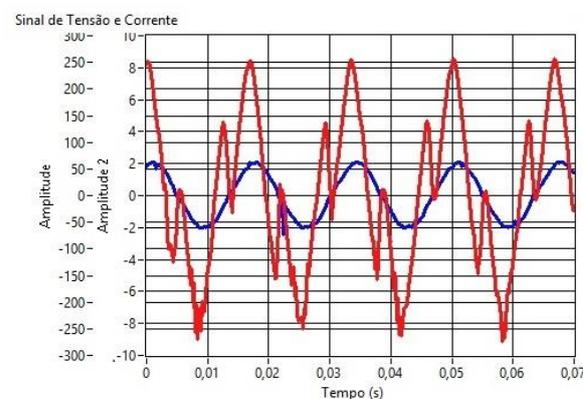


Fig. D: Forma de onda de tensão e corrente a 60 Hz.

Fonte: Do Autor, 2018.

Nas tabelas apresentadas a seguir, é apresentado os espectros de frequência da tensão e corrente para cada velocidades testada com o inversor de frequência, e apenas o THD gerado com a velocidade de 60 Hz, será abordado, devido a distorção harmônica gerada nas outras velocidades não serem possível calcular a partir da equação (2).

Essa situação é devida a frequência fundamental ser 60 Hz, sendo então a 1ª harmônica do sistema, já as demais velocidades programadas são com frequência menor, conhecidas como sub-harmônicas. Dessa forma, não é possível inseri-las no cálculo.

Tabela 10 - Espectro de frequência da tensão e corrente na frequência de 20 Hz

Espectro de Tensão			Espectro de Corrente		
Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Volts	Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Ampere
1ª	60	152,885	-----	20	1,8589
3ª	180	37,1121	3ª	180	-----
5ª	300	10,4715	5ª	300	-----

Fonte: Do Autor, 2018.

Tabela 11 - Espectro de tensão e corrente na frequência de 30 Hz

Espectro de Tensão			Espectro de Corrente		
Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Volts	Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Ampere
1ª	60	138,434	-----	30	2,1098
3ª	180	28,5754	3ª	180	-----

Fonte: Do Autor, 2018.

Tabela 12 - Espectro de tensão e corrente na frequência de 40 Hz

Espectro de Tensão			Espectro de Corrente		
Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Volts	Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Ampere
1ª	60	126,319	-----	40	1,9888
3ª	180	31,3253	3ª	180	-----

Fonte: Do Autor, 2018.

Tabela 13 - Espectro de tensão e corrente na frequência de 50 Hz

Espectro de Tensão			Espectro de Corrente		
Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Volts	Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Ampere
1ª	60	258,944	-----	50	1,7552

Fonte: Do Autor, 2018.

Tabela 14 - Espectro de tensão e corrente na frequência de 60 Hz

Espectro de Tensão			Espectro de Corrente		
Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Volts	Harmônica	Frequência Hz	Amplitude Ampere
1ª	60	169,13	1ª	60	1,9586
3ª	180	80,7335	3ª	180	0,0661
5ª	300	28,6031	5ª	300	0,0536
7ª	420	17,2761	7ª	420	-----
9ª	540	12,0416	9ª	540	-----

Fonte: Do Autor, 2018.

Tabela 15 - Índices de THD gerada pelo LabView e calculados manualmente

THD (%)			
LabView		Calculado	
Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
44,34	5,01	52,15	4,34

Fonte: Do Autor, 2018

De acordo com a Tabela 15, a THD de tensão está mais de 40% a distorcida, estando mais que o dobro do limite aceitável para continuar em operação que é 20%.

Já a distorção de corrente, está perfeitamente dentro dos limites, isso porque o inversor utilizado no teste mantém a forma de onda da corrente senoidal, independente da frequência.

5 CONCLUSÃO

Nesse projeto foi elaborado um analisador de distorção harmônica para o sistema elétrico. Fizeram parte do projeto a aquisição dos sinais, filtragem, montagem dos circuitos, programação das rotinas de verificação das distorções harmônicas e da qualidade de energia e os testes com o protótipo desenvolvido.

Quanto à aquisição dos sinais de tensão e corrente, atendeu os requisitos para os testes do trabalho, onde a verificação realizada foi justamente para certificar que as relações dos filtros passa baixa e com o ganho projetado, estavam coerente com os sinais medidos da rede elétrica. Caso fosse necessário algum ajuste final para o condicionamento, seria feito em software, mas, não teve necessidade de tais ajustes, devido o condicionamento realizado não obter inexatidão consideráveis nas leituras dos sinais de tensão e corrente.

Com os dados obtidos, é possível que o erro mais eminente na aquisição dos sinais decorre da utilização do transformador para rebaixar o sinal de tensão. Como não foi possível calibrar o projeto com um analisador usual de mercado não é possível determinar a perturbação causada pelo transformador.

Por isso, na execução do trabalho se negligenciou a condição que o transformador pudesse perturbar ainda mais o sinal. Para que a aquisição não ficasse ainda mais complexa, então modelou-se o sinal de saída do transformador como se fosse o mesmo da entrada.

Talvez o método mais eficiente para rebaixar a tensão da rede elétrica é utilizando o divisor resistivo. Porém, o problema é que o terra da placa de aquisição teria que estar conectada com o neutro da rede, então, para não colocar em curto o terra placa com o neutro, optou-se por utilizar o transformador de potencial.

Em relação ao software do LabView, não apresentou erros que pudesse alterar os resultados, alguns dos blocos utilizados já possuem atividades específicas, tais como, espectro de frequência e THD. Logo, não foi necessário elaborar tarefas e equacionamentos na programação, justamente devido aos blocos possuírem internamente tais operações.

Em relação aos resultados obtidos com os testes, pode-se afirmar que independentemente se a carga é ou não linear, quando suprida por uma fonte que contenha perturbações seu estado para rede elétrica será caracterizado como uma carga não linear.

Algo que também pode-se afirmar que a terceira harmônica é a que mais causa danos ao sistema elétrico, como visto nas tabelas dos espectro de frequência tanto de tensão como de corrente, a harmônica que está sempre presente e com maior amplitude, é a de 3ª ordem.

Entretanto, este trabalho apresentou formas de mitigar harmônicas, e também apresentou os equacionamentos para obter os índices distorção harmônica definido pelo (PRODIST, 2017). Porém, no andamento do projeto, observou-se que o (PRODIST, 2017), apenas avalia e limita os índices de distorção de tensão, não faz nenhum tipo de referência a distorção de corrente.

Dessa forma, para obter uma definição da corrente mensurada nos testes para cada carga, utilizou-se a norma internacional IEC 61000-3-2, senão, os resultados apresentados na seção anterior, iria abordar apenas THD de tensão.

Para concluir, o estudo elaborado neste projeto, foi de grande importância devido abordar diversos tópicos, dentro de apenas um assunto. Com isso pode-se compreender o que realmente é harmônica, entender o que é a distorção harmônica no sistema elétrico, o que causa a distorção harmônica, quais seus efeitos e o mais importante, os meios de mitigação.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. PRODIST - Módulo 8. 2017.

BARBOSA, José M. S.. **Analisador de energia elétrica**. Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática. Universidade de Aveiro, 2012

CANDITO, Marcos. **Análise do Forno Elétrico a Arco como Carga Especial**. Capitulo_2. 2009. Disponível em:<
http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-09022009-181024/publico/TeseMarcosCandidoCapitulo2_CaracterizacaodaCarga.pdf>
Acessado em: 10 jun. 2018

CHARLES K. Alexander, MATTHEW N. O. Sadiku. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5.ed. McGraw-Hill. 2013.

DUGAN, Roger C. **Electrical Power Systems Quality**. 2. Ed. 2004.

EURELECTRIC. **Power Quality in European Electricity Supply Networks**. Union of the Electricity Industry. 1. ed. 2002. Disponível em:
<http://patricioconcha.ubb.cl/eureka/pq_in_europe.pdf> Acesso em 27 fev.2018.

Finocchio, Marco A. F.. **MATERIAIS E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2008. Disponível em:
http://www.vieiraevarela.com.br/arquivos/Apostila%20TC%20_TIPOS%20DE%20TC_.pdf Acessado: 09 nov. 2018.

IEC/TS 61000-3-2, **Electromagnetic Compatibility (EMC)**, ed.3.2 part 3-2: Limits for harmonic current emission (equipment input current ≤ 16 A per phase), 2009. Disponível em:www.iec.ch. Acesso:15 nov. 2018.

JUNIOR, Oswaldo H. A. **Projeto de um Filtro de Potência Passivo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

LEÃO, Ruth; SAMPAIO, Raimundo; ANTUNES, Fernando. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012.

MORENO, H. **Harmônicas nas instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções**. 1.ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Cobre (PROCOBRE), 2001.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI 6341 Device Specifications**. 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/374566d.pdf>>. Acesso: 08 out. 2018

NATIONAL INSTRUMENTS. **SCB-68 User Manual for Advanced Functions**. 2009. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/372551a.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

NOGUEIRA, Daniel da S.; Alves, Diego P.. **Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação Tópicos Essenciais**. Escola Politécnica da Universidade do Rio de Janeiro. 2009. Acessado 23 mai. 2018 Disponível em:<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001033.pdf>

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. **Processamento em Tempo Discreto de Sinais**. 3. ed. 2012.

PATRAO, Carlos; DELGADO, Joaquim; ALMEIDA, Aníbal T. **Manual da Qualidade da Energia Elétrica**. Dezembro. Departamento de Engenharia Electrotécnica Universidade de Coimbra 2005. Acessado em 15 mai. 2018. Disponível em<https://www.researchgate.net/publication/270577082_Manual_de_Qualidade_de_Energia_Eletrica_Power_Quality_Manual>

ROCHA, Joaquim E. **Qualidade da energia elétrica**. 2016. Universidade Tecnológica do Paraná Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia-eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20_%20Apostila.pdf/at_download/file> Acesso em: 27 fev. 2018.

SANKARAN, C. **Power quality**. Ed. 2002.

TEXAS INSTRUMENTS. **Filter Design Tool**, Disponível em: <<http://www.ti.com/design-tools/signal-chain-design/webench-filters.html>> Acesso em 10 out. 2018

ZANGIROLAMI, Thales R. **SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ININTERRUPTA DE ENERGIA CC DE BAIXA POTÊNCIA – DIMENSIONAMENTO E CONTROLE**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Trabalho de conclusão de curso, Engenheiro Eletricista, 2016. Acessado 09 jun. 2018, Disponível em; <http://www.ufjf.br/engenhariaeletrica/files/2017/08/TCC-UPS-Thales-Ribeiro-Zangirolami-Secretaria-Eletrica.pdf>