

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ALLAN GUSTAVO DE SOUZA

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NA ESTAÇÃO DE
RECALQUE DE ÁGUA TRATADA DO BAIRRO CENTRO DE ITAJAÍ**

ITAJAÍ, 2021.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ALLAN GUSTAVO DE SOUZA

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NA ESTAÇÃO DE
RECALQUE DE ÁGUA TRATADA DO BAIRRO CENTRO DE ITAJAÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Saimon Miranda Fagundes

ITAJAÍ, 2021.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Souza, Allan Gustavo de Souza
Análise de Distorções Harmônicas na Estação de Recalque de
Água Tratada do Bairro Centro de Itajaí / Allan Gustavo de Souza ;
orientação de Saimon Miranda Fagundes. - Itajaí, SC, 2021.
91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de
Santa Catarina, Câmpus Itajaí. Bacharelado em Engenharia Elétrica.
Departamento Acadêmico de Eletroeletrônica.

1. Analisador de Energia Elétrica. 2. Distorções Harmônicas. 3.
Medição. 4. PRODIST. 5. Qualidade de Energia Elétrica. I.
Fagundes, Saimon Miranda Fagundes. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. Departamento Acadêmico de Eletroeletrônica. III. Título.

ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NA ESTAÇÃO DE RECALQUE DE ÁGUA TRATADA DO BAIRRO CENTRO DE ITAJAÍ

ALLAN GUSTAVO DE SOUZA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Campus Itajaí.

Itajaí, 29 de abril, 2021.

Banca Examinadora:

Saimon Miranda Fagundes, Dr

Douglas Alexandre Rodrigues de Souza, MSc

Lucas Moreira de Lacerda, MSc

"I am not in competition with anyone but myself.

My goal is to improve myself continuously."

(Bill Gates)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Saimon Miranda Fagundes, pela sua orientação, amizade e disponibilidade durante toda minha graduação, sendo um dos principais mentores da minha formação. Agradeço-o pela oportunidade de trabalhar e aprender com ele.

Aos demais servidores do IFSC de Itajaí, que contribuíram para minha formação como profissional e ser humano, independente das dificuldades encontradas nestes últimos cinco anos, sempre se dedicaram o máximo para ofertadas a mim e aos demais alunos da instituição um ensino de qualidade.

À toda minha família, em especial ao meu pai Odimar Jayme de Souza, que compartilhou comigo a paixão pela área das ciências exatas, conduziu-me a dar os primeiros passos da minha formação e por ser meu melhor amigo para todos os momentos, e à minha mãe Rosimary Augusta de Souza, que sempre soube ser o coração de nosso lar.

À minha noiva e companheira Jéssica Borba Costa, por todo amor, carinho, dedicação e compreensão no momento de maior entrega em meu curso de graduação e em minha carreira profissional. Obrigado por compartilhar comigo este e diversos outros sonhos que serão conquistados em conjunto.

Por fim, agradeço a receptividade e a confiança dos profissionais do SEMASA de Itajaí, por disponibilizar as suas instalações para a realização do estudo de caso deste projeto de diplomação, em especial ao Engenheiro Gilnei Almeida de Souza, pelo compartilhamento do conhecimento e genuíno interesse em ensinar e contribuir durante todo meu período de estágio no SEMASA e as minhas visitas à autarquia para finalidade deste estudo.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo de caso realizado na Estação de Recalque de Água Tratada Central (ERAT Centro) da autarquia responsável pela captação, tratamento e distribuição de água na cidade de Itajaí, em Santa Catarina, com a intenção de medir e quantificar a distorção harmônica presente nas instalações elétricas desta unidade. Este trabalho apresenta inicialmente os conceitos sobre harmônicas, suas origens e os problemas associados às distorções harmônicas nas ondas de tensão e de corrente, bem como formas de mitigar estes sinais indesejados. O método de medição e de análise utilizado é baseado no manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), documento regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). No local de estudo, realizou-se a instalação de um analisador de energia, modelo RE7000, produzido pela Embrasul Indústria Eletrônica. Desta forma, foi possível realizar as medições, conforme estabelecido no PRODIST, em um intervalo válido, sendo feito o estudo das distorções harmônicas nas amostras coletadas pelo instrumento de medição. O índice máximo de distorção harmônica total nas tensões das fases A, B e C apresentaram valores de 7,36%, de 7,14% e de 7,42%, respectivamente, demonstrando conformidade com o limite regulamentado. A legislação da ANEEL não regulamenta os índices de distorção harmônica de corrente; desta forma, utilizou-se como parâmetro dados fornecidos pelo fabricante do inversor de frequência presente na instalação elétrica em questão, apresentando resultados dentro do valor esperado, com exceção da harmônica de quinta ordem. Sendo assim, aconselhou-se ser instalado um filtro passivo na entrada de cada inversor de frequência, como indicado pelo próprio fabricante.

Palavras-chave: Analisador de Energia Elétrica. Distorções harmônicas. Medição. PRODIST. Qualidade de Energia Elétrica.

ABSTRACT

This work presents a case study carried out at the Central Treated Water Repression Station of the municipality responsible for the collection, treatment and distribution of water in the city of Itajaí, in Santa Catarina, with the intention of measuring and quantifying the harmonic distortion present in the electrical installations of this unit. This work initially presents the concepts of harmonics, their origins and the problems associated with harmonic distortions in voltage and current waves, as well as ways to mitigate these unwanted signals. The measurement and analysis method used is based on the Electricity Distribution Procedures in the National Electric System (*PRODIST*) manual, a document regulated by the National Electric Energy Agency (*ANEEL*). At the study location, an energy analyzer, model RE7000, produced by Embrasul Indústria Eletrônica was installed. In this way, it was possible to carry out the measurements, as established in *PRODIST*, in a valid interval, being made the study of the harmonic distortions in the samples collected by the measuring instrument. The maximum index of total harmonic distortion in the voltages of phases A, B and C showed values of 7.36%, 7.14% and 7.42%, respectively, demonstrating compliance with the regulated limit. *ANEEL* legislation doesn't regulate current harmonic distortion rates; therefore, the data provided by the manufacturer of the frequency inverter present in the electrical installation in question was used as a parameter, presenting results within the expected value, with the exception of the fifth order harmonic. Therefore, it was advisable to install a passive filter at the entrance of each frequency inverter, as indicated by the manufacturer.

Keywords: Power Analyzer. Harmonic distortions. Measurement. *PRODIST*. Power Quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de distorção harmônica	20
Figura 2 – Sinal resultante da superposição das harmônicas de ordem ímpares (h)...	22
Figura 3 – Comparativo entre a fundamental e uma tensão DHT igual a 57,28%	23
Figura 4 – Assinatura harmônica individual de corrente das cargas sob análise	25
Figura 5 – Forma de onda da corrente de alimentação (a) do computador e (b) do monitor de vídeo	26
Figura 6 – Exemplo de topologia de <i>nobreak</i>	28
Figura 7 – PWM ASD	28
Figura 8 – Representação do sinal PWM em três momentos distintos: (a) DC = 20%, (b) DC = 50% e (c) DC = 90%	29
Figura 9 – ASD de grande porte em CA: (a) VSI e (b) CSI	30
Figura 10 – Efeito da DHT devido à variação de velocidade de um motor acionado por PWM	31
Figura 11 – Perfil Harmônico da Corrente na fase T de um Forno a Arco Elétrico	32
Figura 12 – Forma de onda da corrente de alimentação da lâmpada fluorescente com reator eletrônico	33
Figura 13 – Correntes de neutro devido à presença de conteúdo harmônico	36
Figura 14 – Relação entre as perdas do motor assíncrono e a DHT de tensão	38
Figura 15 – Topologia dos filtros de harmônicas passivo paralelo (a) e série (b)	41
Figura 16 – Topologia dos filtros de harmônicas ativo paralelo (a) e série (b)	42
Figura 17 – Tensão de entrada $v_s(t)$ e suas componentes	43
Figura 18 – Visualização do painel frontal e inferior do analisador de energia RE7000	44
Figura 19 – Carregamento do arquivo .emb para o software ANL7000	46
Figura 20 – Consideração do software ANL7000 sobre registros inválidos	47
Figura 21 – Visualização da tela principal do software ANL7000	47
Figura 22 – Índice de atendimento total de água	55
Figura 23 – Estação de Tratamento de Água do São Roque	56
Figura 24 – Estação de Tratamento de Água de Araçongas	56
Figura 25 – Localização das estações de tratamento de água	57
Figura 26 – Localização dos poços artesianos	57
Figura 27 – Reservatório desativado na ERAT Centro	58

Figura 28 – CMB 1	59
Figura 29 – Placa de informações do motor do CMB 1	59
Figura 30 – Placa de informações da bomba do CMB 1	59
Figura 31 – CMB 2	60
Figura 32 – Placa de informações do motor do CMB 2	60
Figura 33 – Placa de informações da bomba do CMB 2	60
Figura 34 – CMB 3	61
Figura 35 – Placa de informações do motor do CMB 3	61
Figura 36 – Placa de informações da bomba do CMB 3	61
Figura 37 – Inversor de frequência ATV630D90N4 Schneider	62
Figura 38 – Segunda via da fatura de energia elétrica 03/2021 da UC 27597025	64
Figura 39 – Ligação trifásica 5 fios	65
Figura 40 – Instalação do RE7000 no QGBT	66
Figura 41 – Analisador de energia RE7000 em funcionamento	67
Figura 42 – Seleção do intervalo de registro para análise	67
Figura 43 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Fase A em 1008 registros válidos	69
Figura 44 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Fase B em 1008 registros válidos	69
Figura 45 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Fase C em 1008 registros válidos	70
Figura 46 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Fase A em 1008 registros válidos	70
Figura 47 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Fase B em 1008 registros válidos	71
Figura 48 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Fase C em 1008 registros válidos	71
Figura 49 – Histograma das DHI de tensão na Fase A no registro de máxima DHTv	74
Figura 50 – Histograma das DHI de tensão na Fase B no registro de máxima DHTv	75
Figura 51 – Histograma das DHI de tensão na Fase C no registro de máxima DHTv	76

Figura 52 – Histograma das DHI de corrente na Fase A no registro de máxima DHTi	77
Figura 53 – Histograma das DHI de corrente na Fase B no registro de máxima DHTi	78
Figura 54 – Histograma das DHI de corrente na Fase C no registro de máxima DHTi	79
Figura 55 – Perfil da corrente elétrica eficaz das três fases	80
Figura 56 – Análise da DHli e da DHTi entre o inversor ATV630D90N4 em 80% de carga e a Fase A	81
Figura 57 – Análise da DHli e da DHTi entre o inversor ATV630D90N4 em 80% de carga e a Fase B	82
Figura 58 – Análise da DHli e da DHTi entre o inversor ATV630D90N4 em 80% de carga e a Fase C	82
Figura 59 – Esquema recomendado	85
Figura 60 –Filtro passivo VW3A46***	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos efeitos associados à distorção harmônica	34
Tabela 2 – Resumo de sintoma, causa e mitigação para as distorções harmônicas ..	39
Tabela 3 – Especificações técnicas do analisador RE7000/PT	45
Tabela 4 – Especificações técnicas do sensor de corrente TI3000	46
Tabela 5 – Terminologia do autor	48
Tabela 6 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	50
Tabela 7 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão ...	51
Tabela 8 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de corrente	52
Tabela 9 – Produção de água tratada das unidades do SEMASA	55
Tabela 10 – Resumo das especificações dos CMB's de pressurização	62
Tabela 11 – Distorções harmônicas de corrente do ATV630D90N4	63
Tabela 12 – Registros inválidos da medição	68
Tabela 13 – Máximos valores de DHT de tensão e de corrente nas Fases A, B e C ...	72
Tabela 14 – Comparação da máxima DHTv em cada fase com o limite regulamentado pela ANEEL	72
Tabela 15 – Comparação da máxima DHTv em cada fase	73
Tabela 16 – Valores mensurados na Fase A no registro de máxima DHTv	74
Tabela 17 – Valores mensurados na Fase B no registro de máxima DHTv	75
Tabela 18 – Valores mensurados na Fase C no registro de máxima DHTv	76
Tabela 19 – Valores mensurados na Fase A no registro de máxima DHTi	77
Tabela 20 – Valores mensurados na Fase B no registro de máxima DHTi	78
Tabela 21 – Valores mensurados na Fase C no registro de máxima DHTi	79
Tabela 22 – Análise harmônica entre o inversor ATV630D90N4 com as Fases A, B e C	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASD – *Adjustble Speed Drive*

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CELESC – Centrais Elétrica de Santa Catarina

CMB – Conjunto Motobomba

CSI – *Current Source Inverter*

DHI – Distorção Harmônica Individual

DHT – Distorção Harmônica Total

EE – Energia Elétrica

ERAT – Estação de Recalque de Água Tratada

IEC - *International Electrotechinal Commission*

IEEE – *Institue of Electrical and Eletronics Engineers*

IFSC – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

PDE – Ponto de Entrega

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PWM – *Pulse Width Modulation*

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

RMS – *Root Mean Square*

RPM – Rotação Por Minuto

SEMASA – Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SNIS – Sistema Nacional de Informações de Saneamento

UC – Unidade Consumidora

UPS – *Uninterruptible Power Systems*

Vh – Tensão da Harmônica

VSI – *Voltage Source Inverter*

VTCD – Variações de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivo	17
1.3	Contextualização	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Conceito e definições de distorções harmônicas	20
2.1.1	Linearidade e superposição	21
2.1.2	Indicadores de distorção harmônica	22
2.2	Origem das harmônicas	23
2.2.1	Fontes chaveadas em dispositivos eletrônicos e de iluminação	24
2.2.2	Controladores de tensão com tiristores em lâmpadas e chuveiros	26
2.2.3	Conversores trifásicos e <i>nobreaks</i>	27
2.2.4	Dispositivos a arco voltaico e lâmpadas de descarga	32
2.3	Problemas associados à distorção harmônica	34
2.3.1	Cabos de alimentação	35
2.3.2	Dispositivos de proteção	36
2.3.3	Capacitores	36
2.3.4	Motores	37
2.3.5	Transformadores de potência	38
2.4	Técnicas de mitigação	38
2.4.1	Filtros de harmônicos	40
3	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	44
3.1	Instrumento	44
3.2	Software	46
3.3	Método	48
3.3.1	Terminologia	48
3.3.2	Fundamentação	49
3.3.3	Instrumentação	49
3.3.4	Valores de referência	50
4	ESTUDO DE CASO	54
4.1	Apresentação	54
4.1.1	SEMASA de Itajaí	54
4.1.2	ERAT Centro e cargas instaladas	58
4.2	Instalação do analisador de energia	64
4.3	Leitura e análise das amostras	67

5	RESULTADOS	69
6	CONCLUSÃO	84
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXO I – DIAGRAMA UNIFILAR ERAT CENTRO	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A Autarquia Municipal responsável pela distribuição de água tratada na cidade de Itajaí (SC), conhecido como SEMASA – Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura –, demonstrou-se interessada em realizar o estudo da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) entregue pela CELESC no barramento de baixa tensão da subestação que alimenta o local conhecido como ERAT – Estação de Recalque de Água Tratada – Centro, visto a importância desta unidade para a distribuição de água na região central itajaiense. Neste local, existem algumas cargas instaladas que demandam uma potência de energia elétrica considerável, tais como três conjuntos motobombas (CMB) de 100 cv e três inversores de frequência para acionamento dos equipamentos citados anteriormente, as quais são consideradas possíveis causadores de distorções harmônicas nas ondas de tensão e corrente. Estes equipamentos são responsáveis pelo funcionamento do sistema de recalque de água para a região, justificando a necessidade de realizar uma análise prévia da qualidade de energia elétrica do local a fim de evitar futuras falhas de operação.

1.2 Objetivo

O foco principal deste estudo será medir e analisar as harmônicas de tensão e de corrente no sistema elétrico da ERAT Centro, da SEMASA. Caso os índices de distorções harmônicas calculados através das medições apresentem valores superiores ou próximos aos valores de referências, será analisado uma solução ou alguma forma para mitigar o problema.

1.3 Contextualização

O consumo de energia elétrica cresce conforme o desenvolvimento do nosso país. Diariamente, novas cargas são interligadas ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) das concessionárias de energia elétrica distribuídas pelo Brasil. Ao tratar de cargas, são analisados desde aparelhos eletrodomésticos encontrados em nossas casas, como televisores e ar-condicionados, quanto fontes chaveadas, como inversores de frequência, comuns nos processos industriais. Como o sistema de distribuição, na maioria das vezes, é considerado antigo, este pode não ter sido

projetado para fornecer à unidade consumidora (UC) uma energia com qualidade, devido ao aumento do consumo de energia elétrica dos últimos anos.

Tratando do termo QEE, afirma-se que uma instalação elétrica tem qualidade de energia pobre, quando a forma de onda da tensão e/ou da corrente elétrica têm suficientes desvios das normas a ponto de prejudicar o funcionamento ou levar à falha de equipamentos. Quando uma instalação elétrica possui um QEE de boa qualidade, significa que o nível dos desvios das normas é baixo e, portanto, os equipamentos funcionam de forma normalizada, sem apresentar problemas. Um aspecto importante da qualidade da energia elétrica é o seu efeito na eficiência energética. Permitir que o sistema elétrico tenha um alto conteúdo harmônico caracteriza baixa qualidade da energia e provoca perdas adicionais na distribuição dessa energia. A circulação de harmônicos provoca perdas por efeito Joule nos condutores, transformadores e outros equipamentos (DUGAN, 1996).

Por estas questões, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica –, órgão regulador do funcionamento do setor elétrico no Brasil, criou o manual do PRODIST, que são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Este é composto por onze módulos, sendo que o módulo oito referente à QEE é de fundamental importância para este estudo. Para este trabalho de conclusão de curso, sabendo da amplitude do tema “Qualidade de Energia Elétrica”, será realizado o estudo relacionado às harmônicas de tensão e corrente. A seguir, são apresentados os módulos que compõe a PRODIST:

- Módulo 1 – Introdução – traz os propósitos gerais e o âmbito da aplicação do PRODIST;
- Módulo 2 – Planejamento da expansão do sistema de distribuição que estabelece as diretrizes, os requisitos mínimos e os critérios básicos para o planejamento, troca de informações, entre outros, para as futuras expansões do sistema de distribuição de energia elétrica;
- Módulo 3 – Acesso ao sistema de distribuição – define os critérios técnicos e operacionais entre outras informações para as conexões de novos acessantes e também na revisão dos atuais ao sistema de distribuição de energia elétrica;

- Módulo 4 – Procedimentos operativos do sistema – estabelece os processos para a operação do sistema pelas distribuidoras e demais agentes;
- Módulo 5 – Sistema de medição – define os critérios de medição das grandezas, e todos os requisitos para tal padronização como aplicabilidade, especificação do sistema de medição, inspeção e manutenção, leitura, registro e compartilhamento, das informações de medição;
- Módulo 6 – Informações requeridas e obrigações – define como as informações devem ser trocadas entre os agentes e as distribuidoras de energia;
- Módulo 7 – Cálculo de perdas na distribuição – define a metodologia, os procedimentos e as formas de apuração das perdas de energia no sistema de distribuição de energia elétrica;
- Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica – estabelece os parâmetros mínimos ou máximos das grandezas referente à qualidade da energia elétrica dos sistemas de distribuição de energia elétrica, incluindo a qualidade do produto e do serviço prestado;
- Módulo 9 – Ressarcimento de danos elétricos – define, como o nome já diz, as formas de apuração e ressarcimento quando da ocorrência de danos elétricos;
- Módulo 10 – Sistema de informações geográficas regulatório – estabelece o conjunto mínimo de informações da distribuidora de energia, as quais compõem o sistema de informações geográficas regulatórias, o padrão de estrutura das informações (requisitos mínimos) e o formato dos arquivos digitais, o prazo e a forma de envio destas informações, bem como a forma de uso e divulgação destas informações;
- Módulo 11 – Fatura de energia elétrica e informações suplementares – estabelece os procedimentos que devem ser observados na emissão e apresentação das faturas de energia elétrica com as condições mínimas, aspectos relevantes e a forma de apresentação destas informações, seja em papel ou eletrônica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

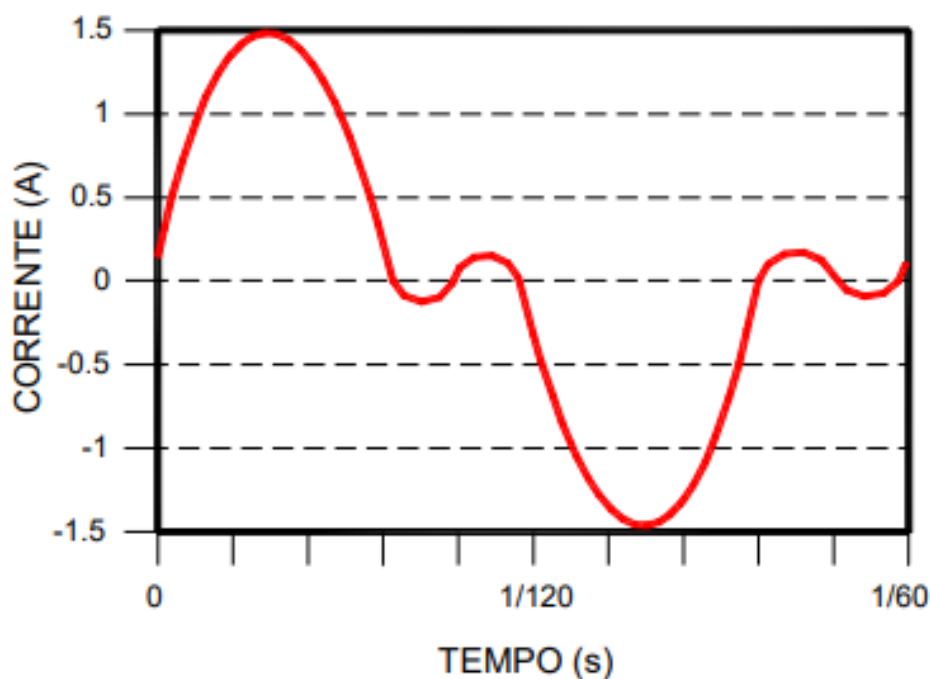
Para melhor compreensão a respeito do tema do trabalho de conclusão de curso, será tratado neste capítulo um resumo sobre os conceitos e definições das distorções harmônicas na Engenharia Elétrica, suas origens e os problemas associados às distorções harmônicas nas ondas de tensão e de corrente, bem como formas de mitigar estes sinais indesejados.

2.1 Conceito e definições de distorções harmônicas

Segundo a ANEEL (2020), as distorções harmônicas são definidas como fenômenos associados às deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. As ondas resultantes da distorção harmônica são ondas não-senoidais, desenvolvendo-se em frequências múltiplas da onda fundamental. Como por exemplo: um sistema com a frequência fundamental de 60 Hz possui como segunda harmônica a frequência de 120 Hz, a terceira harmônica a frequência de 180 Hz etc. (ISONI, 2005).

Na Figura 1, é possível analisar uma onda resultante composta por uma onda de frequência fundamental a qual apresenta conteúdo de 3ª e 5ª harmônicas.

Figura 1 – Exemplo de distorção harmônica, onda fundamental + 3ª harmônica + 5ª harmônica



Fonte: Isoni (2005).

2.1.1 Linearidade e superposição

Um sistema cuja saída seja proporcional à sua entrada é um exemplo de um sistema linear. Entretanto, este sistema deve satisfazer diversas outras propriedades para ser considerado um sistema linear, como por exemplo: aditividade; e homogeneidade (escalonamento) (LATHI, 2008).

A propriedade da adição trata de que se uma entrada x_1 está atuando sozinha e possui efeito y_1 , e se outra entrada x_2 também atua sozinha e possui efeito y_2 , então, quando as duas entradas estiverem atuando no sistema, o efeito total será $y_1 + y_2$, apresentado na Equação 1. Já a propriedade de escalonamento afirma que para um número real ou imaginário arbitrário. k , se uma entrada aumentar k vezes, seu efeito também aumentará k vezes, conforme a Equação 2 (LATHI, 2008).

$$x_1 \rightarrow y_1 \quad e \quad x_2 \rightarrow y_2$$

$$x_1 + x_2 \rightarrow y_1 + y_2 \quad (\text{Equação 1})$$

$$x \rightarrow y_1$$

$$k * x \rightarrow k * y \quad (\text{Equação 2})$$

Estas duas propriedades podem ser combinadas em uma única propriedade, denominada superposição. Esta propriedade, por sua vez, é apresentada na Equação 3 (LATHI, 2008).

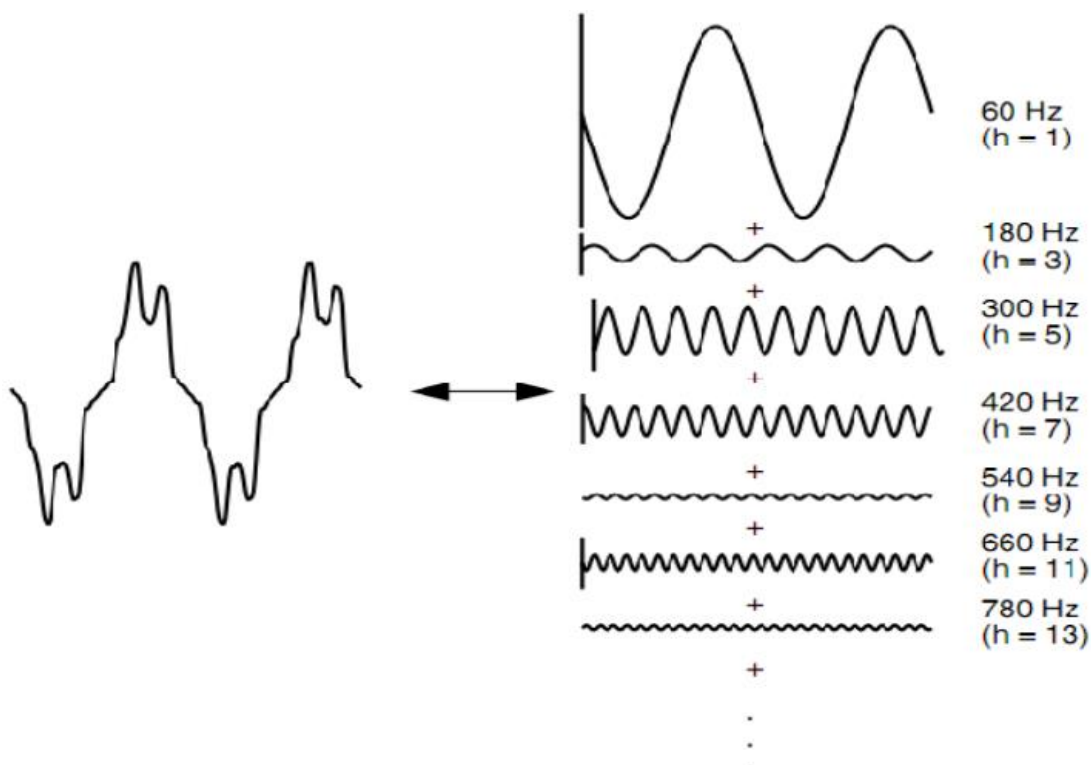
$$x_1 \rightarrow y_1 \quad e \quad x_2 \rightarrow y_2$$

Para todos os valores de constantes k_1 e k_2 .

$$k_1 * x_1 + k_2 * x_2 \rightarrow k_1 * y_1 + k_2 * y_2 \quad (\text{Equação 3})$$

Na Figura 2, estão representadas múltiplas entradas de um sistema LIT ($x_1 = 60$ Hz; $x_2 = 180$ Hz; $x_3 = 300$ Hz; $x_4 = 420$ Hz; $x_5 = 540$ Hz; $x_6 = 660$ Hz; $x_7 = 780$ Hz...) as quais estas entradas, ilustradas por harmônicas de ordem ímpares, são somadas e apresentam um único sinal resultante na saída, destacado à esquerda da imagem. Devida à superposição dessas n fontes de tensão, a saída resulta em um sinal distorcido, totalmente indesejado nos SEP.

Figura 2 – Sinal resultante da superposição das harmônicas de ordem ímpares (h)



Fonte: Dugan (1996).

2.1.2 Indicadores de distorção harmônica

De acordo com Saimon Fagundes (2011), o índice mais comum para mensurar as distorções harmônicas de um sistema é denominado de DHT – Distorção Harmônica Total – e é expresso sob a forma percentual, representando a distorção devida à todas as harmônicas presentes em uma onda resultante. Semelhante à DHT, o indicador DHI – Distorção Harmônica Individual – quantifica a magnitude harmônica em relação ao sinal fundamental. A seguir, são apresentadas as equações para o cálculo das grandezas de DHT e DHI de tensão, conforme seção 4.2.2 do PRODIST módulo 8:

$$DHTv\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} Vh^2}}{V1} * 100 \quad (\text{Equação 4})$$

$$DHIv\% = \frac{Vh}{V1} * 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

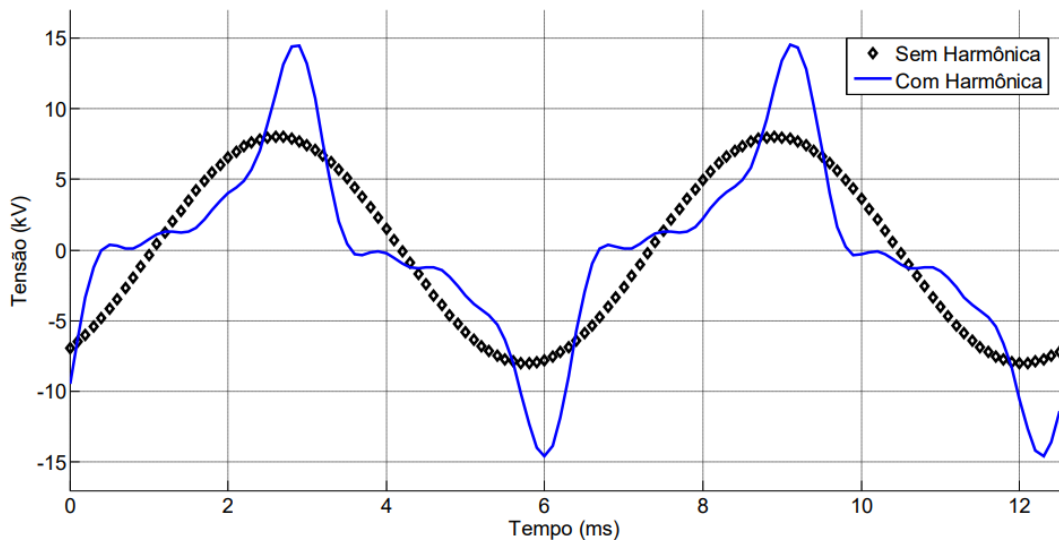
$h = \text{todas as ordens harmônicas de 2 até } h_{\text{máx}}$

$Vh = \text{amplitude da harmônica de ordem } h, e$

$V1 = \text{amplitude de tensão portadora da frequência fundamental}$

Para exemplificar a importância do índice DHT e de como a onda de frequência fundamental é afetada pelas harmônicas, é apresentada a Figura 3, onde é realizado um comparativo entre a fundamental e uma tensão com DHT igual a 57,28%.

Figura 3 – Comparativo entre a fundamental e uma tensão DHT igual a 57,28%



Fonte: Rolim (2015).

2.2 Origem das harmônicas

Segundo Isoni (2005), classificam-se as harmônicas em 2 (dois) grupos: as harmônicas características; e as harmônicas não-características.

As harmônicas características são consideradas teoricamente previsíveis, com amplitude e frequência esperadas, podendo ter seus parâmetros já calculados em fase de projeto de uma instalação com base nos equipamentos ali presentes.

Dentre os principais geradores deste tipo de harmônica, então os conversores estáticos de potência, como inversores e retificadores (FAGUNDES, 2011).

Já as harmônicas não-características, por via de regra, são conceituadas as ondas imprevisíveis, as quais surgem em decorrência de efeitos aleatórios. Os geradores mais comuns das harmônicas não-características são os circuitos eletrônicos, presentes em lâmpadas eletrônicas, por exemplo (FAGUNDES, 2011).

2.2.1 Fontes chaveadas em dispositivos eletrônicos e de iluminação

Atualmente, as fontes de alimentação chaveadas são encontradas em diversos equipamentos eletrônicos monofásicos, como por exemplo, microcomputadores, impressoras, monitores e televisores, tornando-se cada vez mais comuns nos equipamentos eletroeletrônicos. Ao tratar da inexistência de um transformador convencional à entrada de energia elétrica deste modelo de fonte de alimentação, é visto a redução de custo, peso e tamanho deste equipamento, uma vez que este é basicamente formado por uma ponte retificadora monofásica a diodo com retificação de onda completa, capacitores, um circuito chaveador responsável pela transformação do sinal retificado em CA em alta frequência, e um novo circuito retificador (ISONI, 2005).

Tem-se como desvantagens das fontes chaveadas a necessidade de transformador especial para altas frequências e geração de interferência eletromagnética (SENRA, 2013).

No entanto, segundo Isoni (2005), a corrente de entrada assemelha-se em pulsos de curta duração, em decorrência da presença do primeiro bloco funcional da fonte chaveada, composto pela ponte retificadora e capacitor. Desta forma, é caracterizada uma onda periódica não-senoidal, com um significativo conteúdo de 3ª harmônica na corrente elétrica utilizada por esta, sendo somada à corrente de neutro, causando um grande carregamento neste condutor do ramal de alimentação. Por conta do grande aumento da instalação de equipamentos monofásicos que apresentam fonte chaveada, este dispositivo é considerado uma das principais fontes harmônicas e umas das mais difíceis de corrigir, considerando que usualmente estão presentes em massa em instalações comerciais e residenciais, as quais não possuem

uma preocupação sobre a QEE (FAGUNDES, 2011).

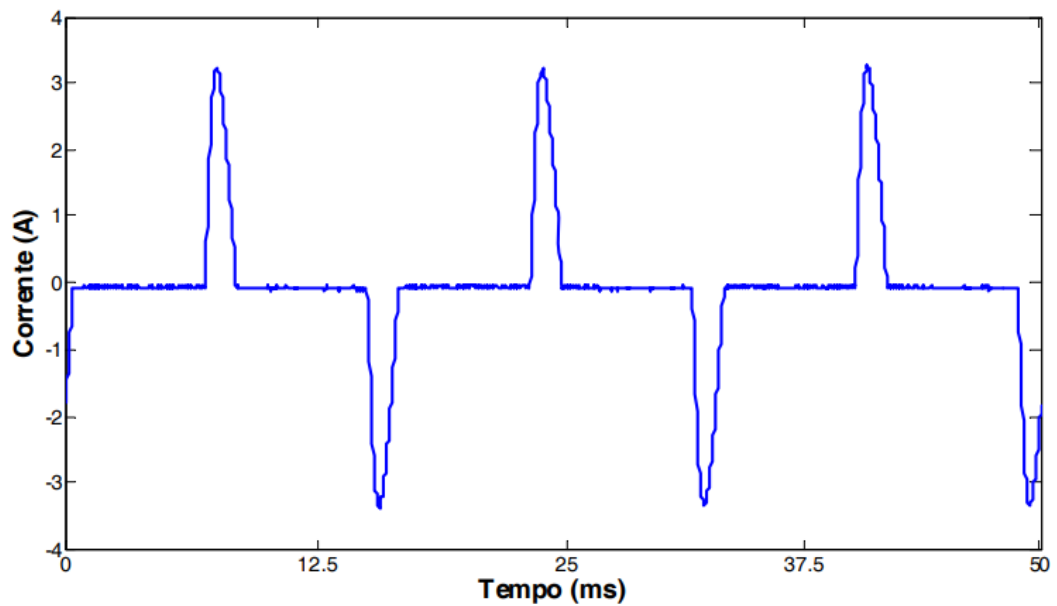
Conforme o estudo realizado por Fernandes (2010) sobre cargas não-lineares em instalações elétricas residenciais, são apresentadas, por meio da Figura 4, as amplitudes das correntes harmônicas individuais de um computador pessoal (PC) e um monitor de vídeo (MON), quando alimentadas por tensão sem distorção. Já na Figura 5, são demonstradas as formas de onda da corrente quando o equipamento indicado está alimentado.

Figura 4 – Assinatura harmônica individual de corrente das cargas sob análise

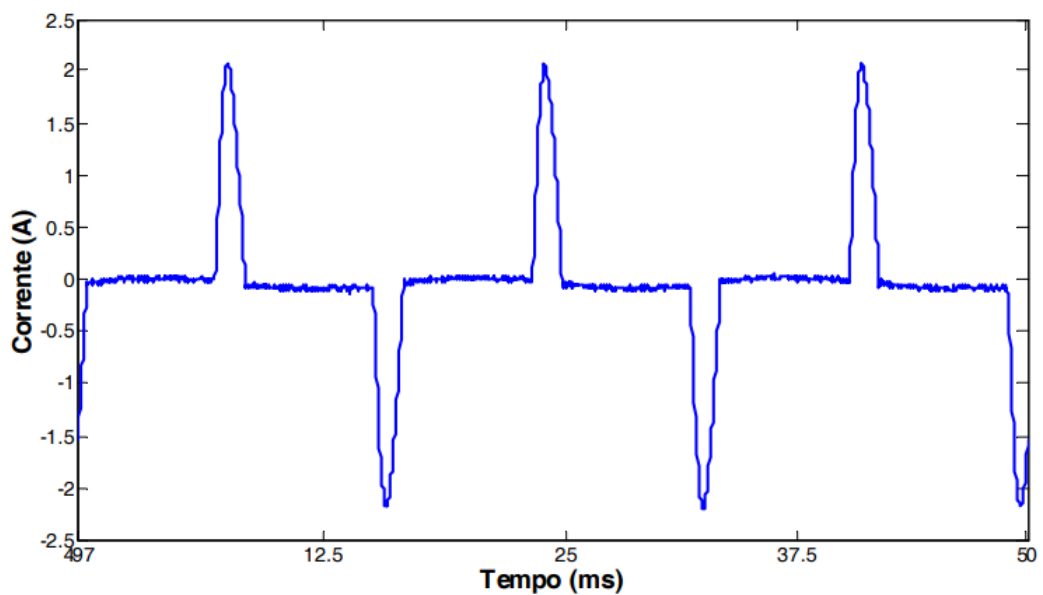
Ordem Harmônica	PC	MON	LFC	LF	LI	VE
1 ^a	0,72	0,41	0,21	0,28	0,79	1,28
2 ^a	0,66	0,38	0,17	0,22	0	0,01
3 ^a	0,56	0,33	0,1	0,13	0	0
4 ^a	0,44	0,27	0,05	0,07	0	0
5 ^a	0,3	0,2	0,04	0,05	0	0
6 ^a	0,18	0,13	0,04	0,05	0	0
7 ^a	0,09	0,07	0,03	0,04	0	0
8 ^a	0,06	0,03	0,02	0,03	0	0
9 ^a	0,07	0,02	0,02	0,03	0	0
10 ^a	0,06	0,02	0,02	0,03	0	0
11 ^a	0,05	0,02	0,02	0,02	0	0
12 ^a	0,02	0,02	0,02	0,02	0	0
13 ^a	0,01	0,01	0,02	0,02	0	0
14 ^a	0,01	0	0,01	0,02	0	0
15 ^a	0,01	0	0,01	0,02	0	0
16 ^a	0,01	0,01	0,01	0,02	0	0
17 ^a	0	0	0,01	0,02	0	0
18 ^a	0	0	0,01	0,01	0	0
19 ^a	0	0	0,01	0,01	0	0
20 ^a	0	0	0,01	0,01	0	0
21 ^a	0	0	0,01	0,01	0	0
22 ^a	0	0	0,01	0,01	0	0
23 ^a	0	0	0,01	0,01	0	0
24 ^a	0	0	0,01	0,01	0	0
25 ^a	0	0	0,01	0,01	0	0

Fonte: Fernandes (2010, p.393)

Figura 5 – Forma de onda da corrente de alimentação (a) do computador e (b) do monitor de vídeo



(a)



(b)

Fonte: Fernandes (2010).

2.2.2 Controladores de tensão com tiristores em lâmpadas e chuveiros

Equipamentos que possuem tiristores responsáveis pelo ajuste de tensão entregue à carga também são responsáveis por conteúdos harmônicos nas

instalações elétricas. Comumente são dispositivos monofásicos ou trifásicos, dependendo da característica da carga, dotados de semicondutores (tiristores) conectados em configuração anti-paralela, de forma que o valor eficaz da onda de tensão em ambos os semi-ciclos possa ser variado por meio do ajuste dos instantes de acionamento destes tiristores, por meio da porta *gate* (ISONI, 2005).

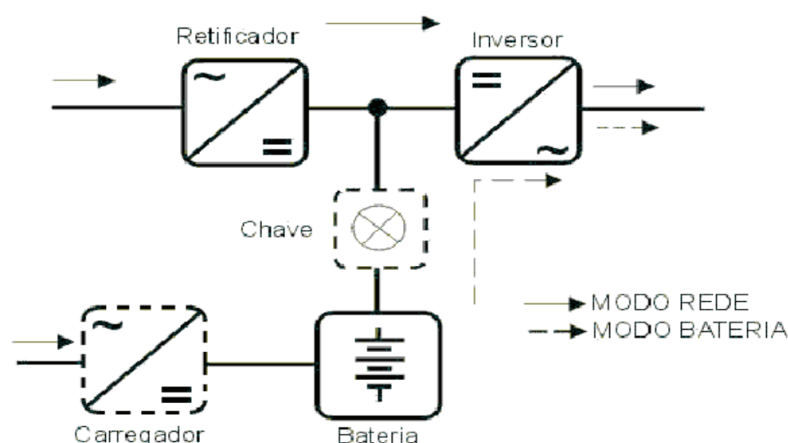
A regulagem do fluxo luminoso em lâmpadas e do nível de aquecimento em chuveiros e em fornos resistivos são exemplos de dispositivos que usufruem de controladores de tensão com tiristores. Desta forma, faz-se com que os semicondutores operem por um tempo mais curto a cada semi-ciclo da tensão da rede, reduzindo também a potência entregue à carga. Assim, ao analisar o comportamento da corrente elétrica de alimentação resultante na entrada, verifica-se um formato de onda descontínuo, não-senoidal e com a presença de conteúdo harmônico (ISONI, 2005).

2.2.3 Conversores trifásicos e *nobreaks*

Ao analisar a geração de distorções harmônicas nos segmentos comerciais de maior porte e industriais, verifica-se a existência de equipamentos com valores de DHT significativos, como o caso dos inversores de frequência e dos *UPS – Uninterruptible Power Systems* –, também denominados de *nobreaks*. Ambos destes equipamentos possuem a Ponte de Graetz em sua topologia elétrica, na etapa de retificação (ISONI, 2005).

O UPS é um equipamento muito utilizado em sistemas de informática e a principal função é garantir a continuidade do fornecimento de tensão à carga, evitando interrupções momentânea de energia à mesma. Um UPS também funciona como condicionador de energia, por apresentar baterias em seu interior, para quando houver falha na alimentação da entrada. O diagrama de blocos apresentado na Figura 6 apresenta a topologia de um *UPS on line*, entretanto, cada modelo deste equipamento possui componentes harmônicos diferentes na corrente alternada, em decorrência da inclusão ou não de filtros e das frequências do sistema projetado (SENRA, 2013).

Figura 6 – Exemplo de topologia de *nobreak*

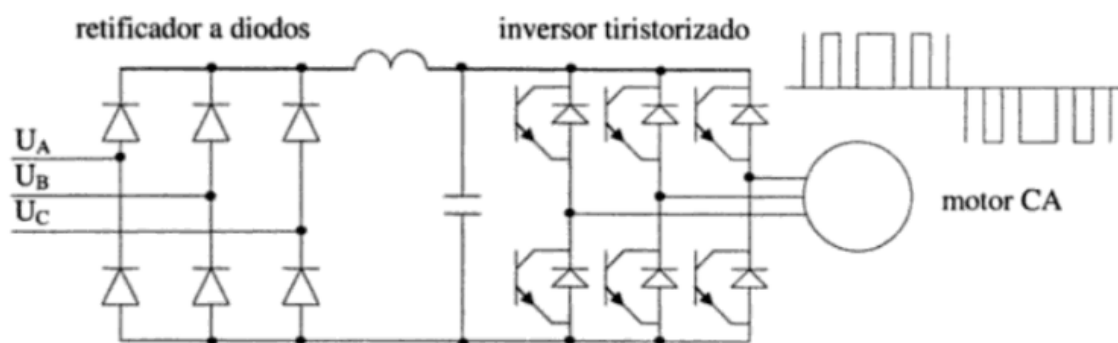


Fonte: ABNT NBR 15014 (2003, p.3).

Semelhante ao funcionamento do UPS, o inversor de frequência também possui sua tensão de alimentação em 60 Hz retificada e posteriormente invertida. Entretanto, diferente do equipamento *nobreak*, a tensão alternada de saída possui frequência variável, tendo aplicação direta em motores para o controle de velocidade de rotações por minuto (RPM), além de outras finalidades (ISONI, 2005).

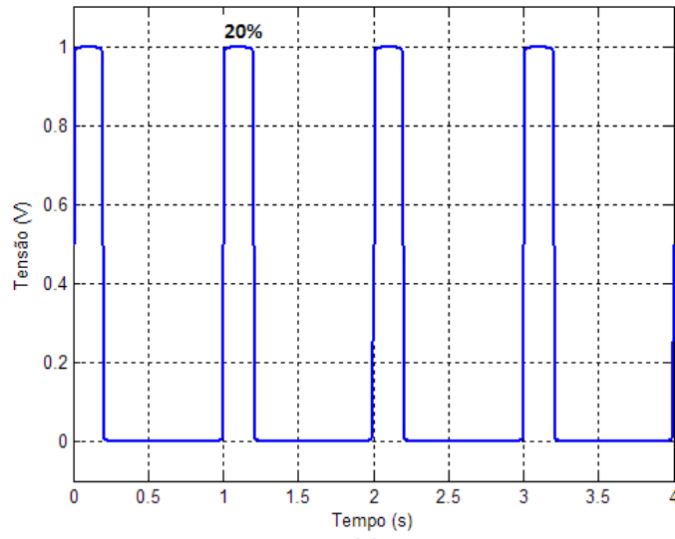
Isto ocorre devido à técnica PWM – *Pulse Width Modulation* – conhecida como modulação por largura de pulso, que, de maneira objetiva, é constituída por um *Duty Cycle* (ciclo de trabalho), o qual é definido por uma porcentagem do período em que a tensão estará em alto nível (ROLIM, 2015), como mostrado na Figura 7 através do PWM com ASD – *Adjustable Speed Drive* – e na Figura 8 com três exemplos de sinais PWM.

Figura 7 – PWM ASD

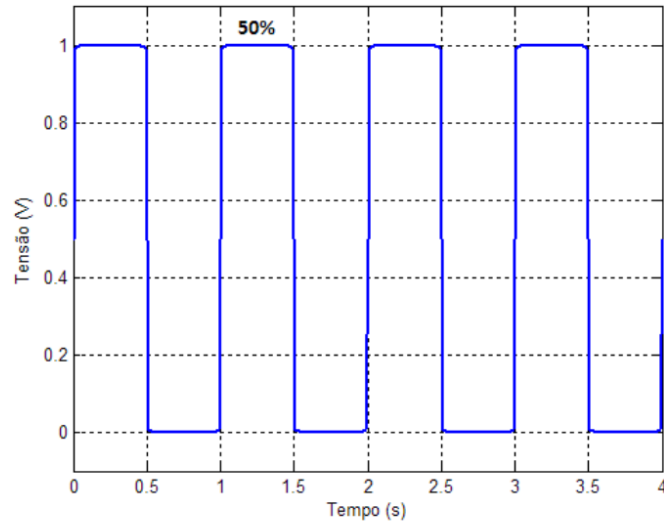


Fonte: Dias (2002)

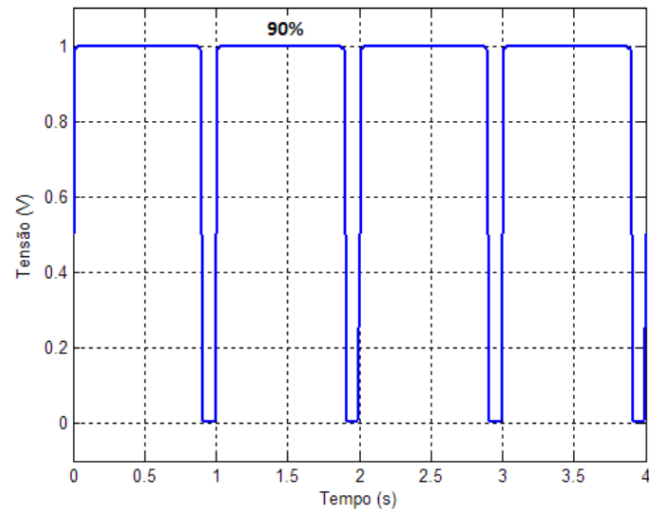
Figura 8 – Representação do sinal PWM em três momentos distintos: (a) DC = 20%, (b) DC = 50% e (c) DC = 90%



(a)



(b)



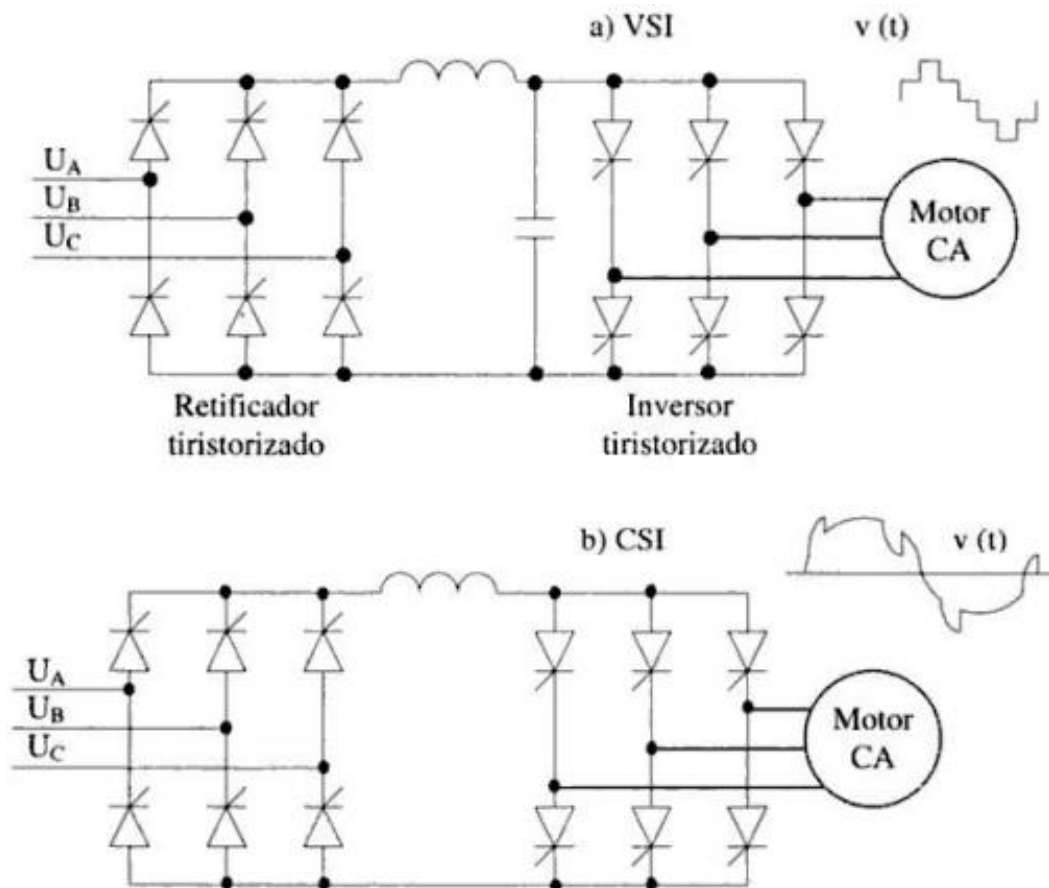
(c)

Fonte: Rolim (2015).

Ao realizar esta sequência de pulsos positivos e negativos, como apresentado na Figura 7, o valor eficaz da tensão de saída resulta à uma onda semelhante à uma senoide (FAGUNDES, 2011, p. 33). Entretanto, todo este processo irá gerar conteúdos harmônicos, além desta modalidade de acionamento CA por PWM estar limitada a motores com uma potência nominal da ordem de 500 HP (DIAS, 2002).

Para máquinas com uma potência superior a 500 HP, são indicados os acionamentos VSI – *Voltage Source Inverter* – e CSI – *Current Source Inverter*. Acionamentos VSI são limitados a aplicações que não requerem variações rápidas de velocidade. Já acionamentos CSI apresentam boas características de aceleração e desaceleração, entretanto precisam de motor com fator de potência indutivo, como motor síncrono ou de indução com capacitores, ou de circuito adicionais para comutação dos tiristores presentes no inversor (DIAS, 2002).

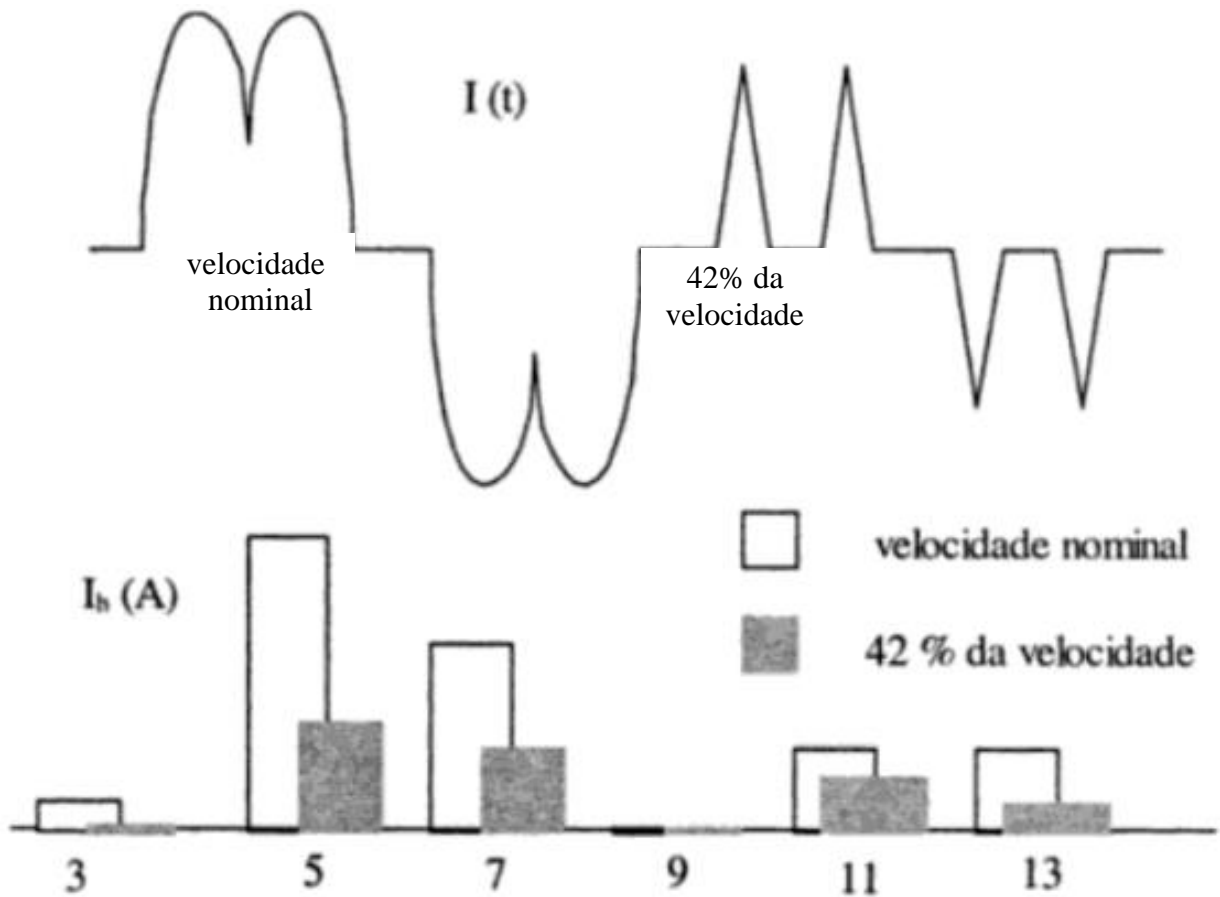
Figura 9 – ASD de grande porte em CA: (a) VSI e (b) CSI



Fonte: Dias (2002).

A Figura 10, apresentada por Guilherme A. D. Dias (2002), mostra a relação da velocidade angular de um motor acionado por PWM com o conteúdo harmônico gerado. É visto que a onda da corrente é afetada de forma significativa para diferentes valores de velocidade, demonstrando que a distorção harmônica para $I(t)$ define-se como variável em relação à velocidade do motor.

Figura 10 – Efeito da DHT devido à variação de velocidade de um motor acionado por PWM



Fonte: DIAS (2002).

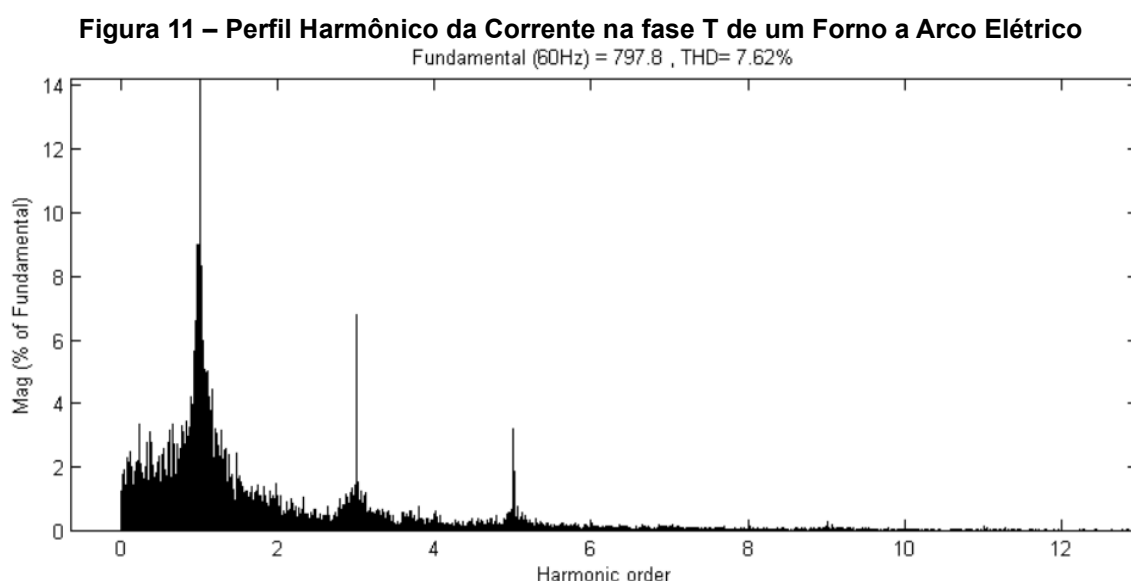
Ao examinar a figura anterior, nota-se que, por mais que haja, aparentemente, uma distorção maior no formato da onda com 42% da velocidade, percebe-se que há uma presença maior de correntes harmônicas de maior amplitude em velocidade nominal, de acordo com o histograma apresentado.

2.2.4 Dispositivos a arco voltaico e lâmpadas de descarga

Dispositivos como fornos a arco, lâmpadas fluorescentes e equipamentos de solda a arco são consideradas cargas geradoras de distorções harmônicas, ao considerar que a tensão e a corrente dos arcos elétricos não possuem características de ondas lineares. Em certas situações, o comportamento dos arcos elétricos é considerado aleatório e imprevisível (ISONI, 2005).

Os fornos a arco são cargas de grande potência utilizadas em indústrias metalúrgicas e são fortemente assimétricas e instáveis, com geração de inter-harmônicos e de harmônicos pares e ímpares de espectro contínuo, sem ordem definida, caracterizando um comportamento aleatório. No início do processo, a corrente de linha é muito variável em amplitude e em conteúdo harmônico, devido à acomodação do metal, e no estado intermediário e de refino, o arco se torna mais estável e há redução de corrente (SENRA, 2013).

Na Figura 11, é possível analisar o comportamento das harmônicas na corrente da fase T em um forno a arco elétrico no início de um processo. Este caso foi estudado pelo autor Soares (2010), onde apresenta-se um forno a arco elétrico com filtro passivo com deficiência na função de corrigir e atenuar as distorções harmônicas de corrente, produzindo um DHT de corrente de 7,62%, superior ao limite permissível de 5% apresentado no artigo.

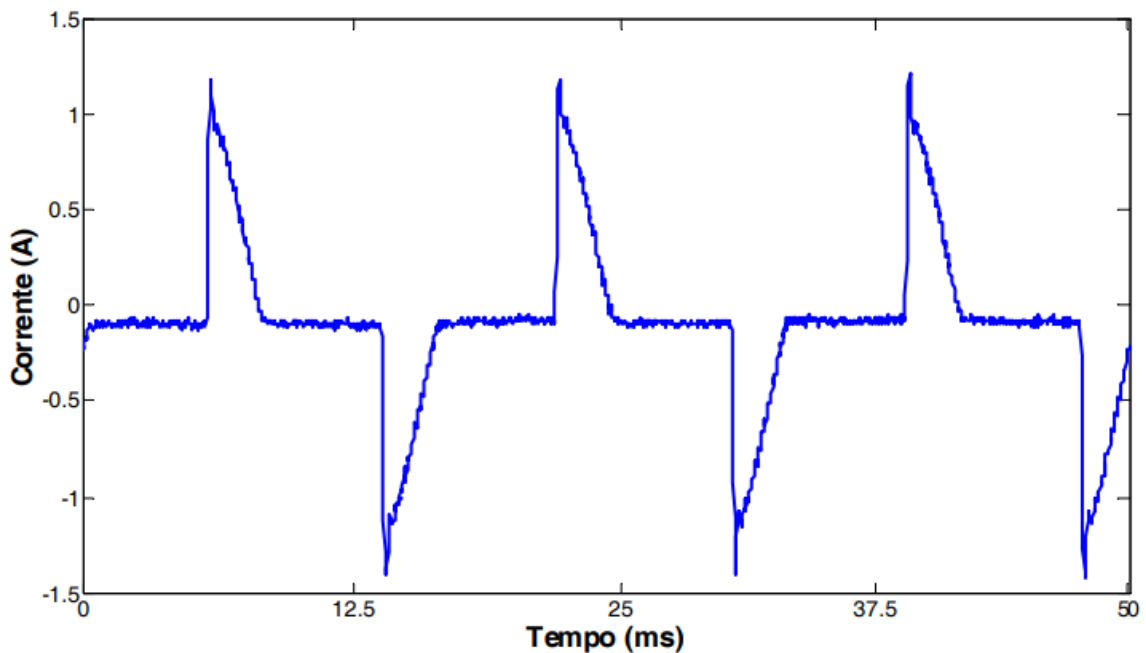


Fonte: Soares (2010).

Para a iluminação fluorescente, os reatores que alimentam as lâmpadas servem para produzir a tensão de ignição, limitar a corrente e ajudar a estabilizar a tensão contra variações bruscas. Existem dois tipos: reator eletromagnético, que produzem harmônicas em função do próprio comportamento do arco, e o reator eletrônico, que geram harmônicas devido à presença de fontes chaveadas.

A Figura 12 mostra a forma de onda da corrente de uma lâmpada fluorescente com reator eletrônico (LF), analisada por Fernandes (2010), com os valores das amplitudes de correntes harmônicas individuais apresentadas também na Figura 4.

Figura 12 – Forma de onda da corrente de alimentação da lâmpada fluorescente com reator eletrônico



Fonte: Fernandes (2010, p.394).

Tratando do exemplo da lâmpada fluorescente alimentada por um reator eletrônico, é possível verificar que a corrente de entrada se compreende por uma função não-linear, divergindo significativamente de uma onda senoidal. Desta forma, entende-se que há a presença de conteúdo harmônico na corrente de alimentação destes dispositivos.

2.3 Problemas associados à distorção harmônica

A distorção harmônica é responsável por diversas situações indesejadas e ao mesmo tempo nocivas nas instalações elétricas, podendo ocasionar efeitos temporários, os quais interferem momentaneamente nas medições de qualquer tipo de equipamento elétrico, ou cumulativos, os quais diminuem a vida útil de certos equipamentos através de sobre-elevações de tensões e temperaturas (FAGUNDES, 2011).

A Tabela 1 apresentada os principais efeitos danosos às instalações elétricas causados pelas distorções harmônicas nos equipamentos comuns no SEP. (ISONI, 2005)

Tabela 1 – Resumo dos efeitos associados à distorção harmônica

Tipo de equipamento ou componente do sistema	Efeitos Principais
Cabos	Maiores níveis de perdas ôhmicas e dielétricas.
Transformadores	Maior nível de perdas, degradação do material isolante e redução de vida útil.
Motores de Indução	Sobreaquecimento devido às perdas por efeito Joule, degradação do material isolante, torques oscilatórios e vibrações e redução da vida útil.
Máquinas Síncronas	Maior nível de aquecimento particularmente nos enrolamentos amortecedores (rotor).
Capacitores	Maior nível de aquecimento, redução da vida útil e possibilidade de queimas/explosões.
Relés	Atuação incorreta.
Computadores	Problemas operacionais (torques pulsantes nos motores de acionamento das unidades de memória, perda de dados).
Pontes Retificadoras	Problemas ligados à forma de onda, à comutação e ao sincronismo.

Fonte: Isoni (2005).

2.3.1 Cabos de alimentação

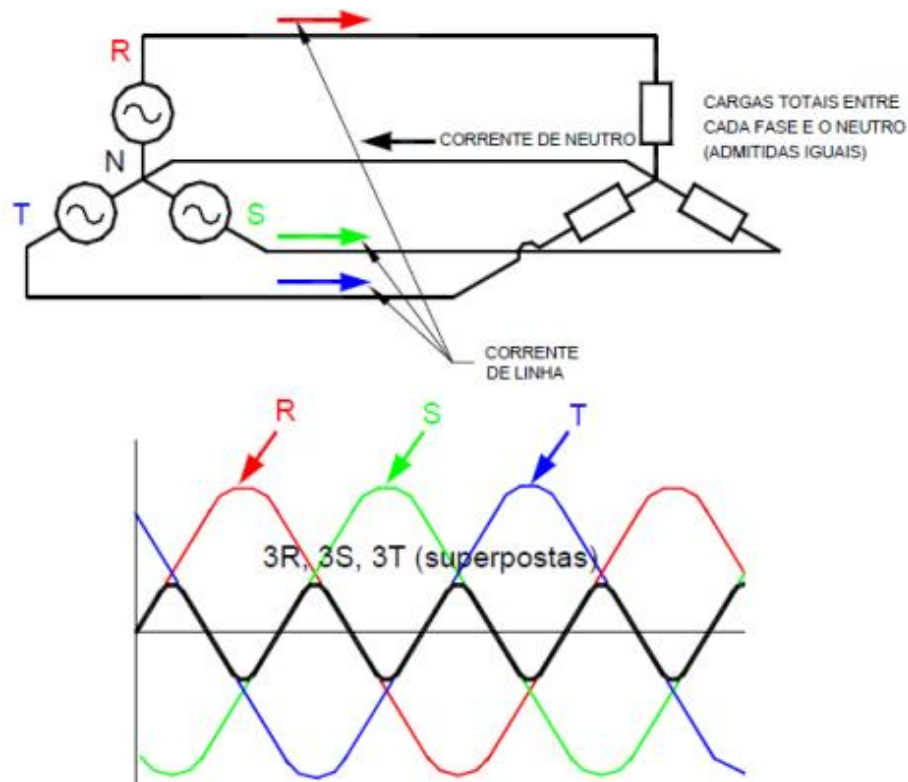
Segundo Senra (2013), ao considerar os efeitos das correntes e tensões harmônicas em cabos de alimentação, deve-se considerar no cálculo das perdas ôhmicas a soma aritmética das perdas à frequência fundamental (perdas nominais) e as perdas devidas às correntes harmônicas. Ou seja, considera-se a resistência CA do cabo para cada frequência do espectro, incluindo o efeito peculiar (*skin effect*) e o efeito de proximidade com outros cabos.

O *Skin Effect* ocorre devido a maior concentração de linhas de força magnética na parte interna do condutor em frequências mais elevadas, havendo maior fluxo magnético no centro do condutor e, conseqüentemente, apresentando maior indutância nesta região. Desta forma, a área periférica do condutor passa a conter menor impedância, fazendo que seja um caminho mais suscetível à passagem da corrente, havendo o aquecimento do condutor devido ao acúmulo de corrente em sua superfície (MERRIKHI, 2006).

Ao tratar sobre o efeito de proximidade, quando um condutor A conduz uma corrente i estando próximo à um condutor B também transportando uma corrente, a distribuição do campo de cada um será alterada pelo efeito da indução do outro condutor próximo, provocando a circulação de correntes parasitas extras. Desta forma, haverá aumento da resistência do condutor e, conseqüentemente, aumento do valor das perdas no cabo (SENRA, 2013).

Em sistemas trifásicos desequilibrados, onde há corrente presente no condutor neutro, também ocorre efeitos negativos causados pelas distorções harmônicas. As componentes harmônicas de ordens múltiplas de três, ao não se anularem no neutro e por estarem em fase, resultam em uma corrente com magnitude três vezes maior. Desta forma, o condutor sofre maior desgaste e aquecimento, tendo a necessidade de ser projetado com um diâmetro maior do que o usual (ROLIM, 2015). Na Figura 13, é possível verificar este fenômeno:

Figura 13 – Correntes de neutro devido à presença de conteúdo harmônico



Fonte: Isoni (2005).

2.3.2 Dispositivos de proteção

Nos dispositivos de proteção, como fusíveis, disjuntores e chaves seccionadoras, a presença de conteúdo harmônico acarreta no aumento da temperatura de trabalho e das perdas nos dispositivos de proteção em todos os equipamentos, e, assim, causando a redução da capacidade da corrente nominal, a qual é fundamental em regime permanente, podendo influenciar a diminuição da vida útil destes dispositivos (RODRIGUES, 2009).

Além disso, em relés de proteção, as distorções harmônicas podem influenciar no tempo de atuação destes dispositivos, podendo aumentar ou diminuir o sinal de desligamento enviado por um relé, chamado de *trip*, fazendo com que estes relés de proteção operem de forma inadequada (FAGUNDES, 2011).

2.3.3 Capacitores

De acordo com Senra (2015), os capacitores não geram conteúdo harmônico, mas podem ser um caminho fácil para as componentes de alta ordem,

especialmente próximas a umas das frequências de ressonância do sistema. Quando este efeito ressonante ocorre, as harmônicas são amplificadas, havendo um aumento da distorção harmônicas total (DIAS, 2002).

Dentre os problemas associados às harmônicas causados nos capacitores, pode-se citar: sobreaquecimento; altas perdas; e sobretensão. Em casos extremos, é possível que seja provocado a perda total da unidade por destruição do dielétrico. Uma possível solução para impedir o efeito de ressonância nos capacitores é através da inclusão de um reator em série com o banco de capacitores, formando um conjunto RC, denominado de filtro sintonizado, dado que está ajustado para ter uma frequência de ressonância inferior à frequência de menor ordem harmônica presente (SENRA, 2013).

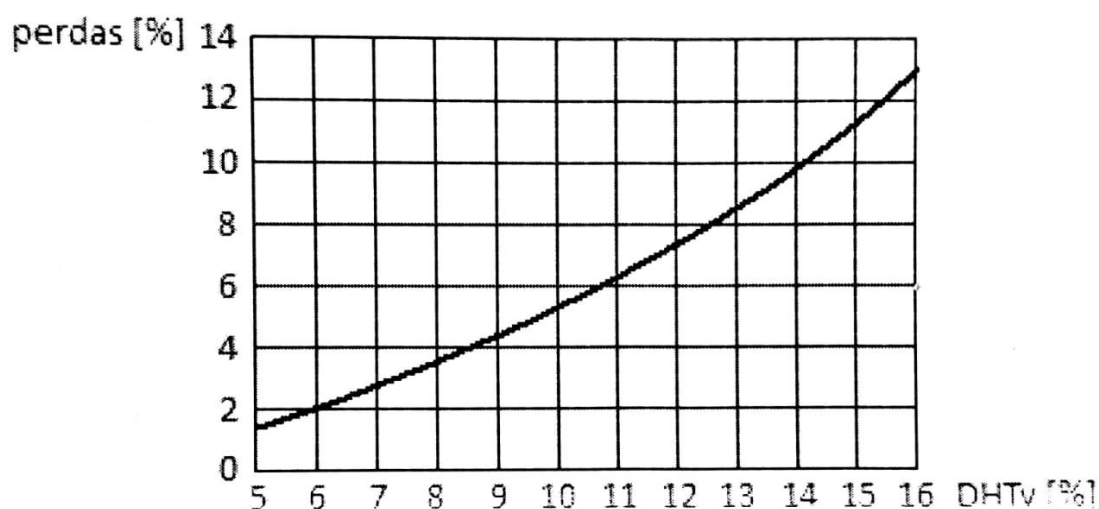
2.3.4 Motores

Em concordância com Senra (2015), dentre os principais problemas causados pelas harmônicas de tensão e de corrente, podemos citar o aumento das perdas internas, as quais são compostas por:

- perdas ôhmicas no estator;
- perdas por efeito pelicular no rotor em função da grande profundidade do cobre;
- perdas no ferro devidas aos fluxos harmônicos, e;
- e perdas devidas ao fluxo assimétrico de dispersão entre estator e rotor, que é desprezível em 60 Hz, mas aumentado em altas frequências.

Por conta das perdas, estas distorções harmônicas de tensão causam aquecimento do motor, reduzindo a vida útil deste equipamento (SENRA, 2013). A Figura 14 mostra um exemplo que ilustra as perdas internas de um motor assíncrono devido à histerese e às correntes de Foucault.

Figura 14 – Relação entre as perdas do motor assíncrono e a DHT de tensão



Fonte: Senra (2015, p.555).

2.3.5 Transformadores de potência

Conforme a ABNT NBR 5356 (2007), norma técnica sobre Transformadores de Potência, estes equipamentos são projetados para funcionarem sobre a frequência de 60 Hz, que é a frequência fundamental no Brasil, reconhecendo todas as faltas e falhas permissíveis nesta frequência.

Entretanto, os transformadores sofrem sobre-elevação térmica quando expostos às correntes com conteúdo harmônico, devido à presença dos núcleos magnéticos saturáveis, reduzindo a vida útil destes equipamentos (FAGUNDES, 2011).

2.4 Técnicas de mitigação

Segundo Senra (2015), existem alguns procedimentos para atenuação dos efeitos das distorções harmônicas. Dentre os métodos, pode-se citar: o HMT – *Harmonic Mitigation Transformer* – também conhecido como transformador deslocador de fase; o Transformador de Isolação; e os Filtros Harmônicos, que serão tratados no tópico 2.4.1.

A Tabela 2 apresenta um resumo algumas das técnicas de mitigação dos problemas envolvendo harmônicas, de acordo com o sintoma e a causa:

Tabela 2 – Resumo de sintoma, causa e mitigação para as distorções harmônicas

Sintoma	Causa	Mitigação
A distorção de tensão excede os limites	<p>1) Corrente das fontes harmônicas é grande demais para o sistema de potência.</p> <p>2) O sistema de potência é ressonante em uma ou mais das frequências harmônicas dominantes.</p>	<p>1) Mudar a posição do banco de capacitores.</p> <p>2) Converter o banco de capacitores em um filtro ressonante em derivação para dessintonizar o circuito.</p> <p>3) Mudar o porte do banco de capacitores.</p>
A distorção harmônica aparece e desaparece em horas específicas do dia	<p>A principal causa das harmônicas é algum tipo de processo industrial ou comercial</p>	<p>Determinar a fonte e aplicar filtros</p>
A distorção harmônica aparece só com carga baixa	<p>1) O circuito é ressonante somente para uma harmônica, mas as fontes são de pequeno porte e não conseguem superar as perdas em carga pesada.</p> <p>2) A fonte de harmônicas existe somente em períodos associados com cargas leves. Por exemplo, a iluminação noturna que está ligada tarde da noite.</p> <p>3) A tensão do sistema é aumentada com carga baixa, resultando no acréscimo da geração de harmônicas pelos transformadores do sistema.</p>	<p>1) Realocar o banco de capacitores ou mudar os seus portes para eliminar a ressonância.</p> <p>2) Iterar os ajustes de chaveamento do banco de capacitores para reduzir a probabilidade de ressonância em carga leve. Reduzir a tensão do sistema com carga baixa através de reguladores de tensão ou pelo desligamento do banco de capacitores.</p>

Fonte: Adaptado de Dias (2002).

Tabela 2 (conclusão)

Sintoma	Causa	Mitigação
Transformadores de força se sobreaquecem com carga abaixo da nominal	1) As correntes harmônicas são excessivas. 2) O transformador é ressonante com um banco de capacitores no lado de carga em uma frequência harmônica.	1) Aplicar uma derivação ressonante entre o transformador e a carga para manter as correntes fora do transformador. 2) Dessintonizar o banco de capacitores. 3) Alterar o porte do banco de capacitores.
Máquinas rotativas se sobreaquecem sem carga ou com carga baixa	A tensão através da máquina é excessivamente distorcida	1) Determinar a causa da distorção; 2) Mudar a posição do banco de capacitores. 3) Converter o banco de capacitores em um filtro ressonante em derivação para dessintonizar o circuito. 4) Mudar o porte do banco de capacitores.

Fonte: Adaptado de Dias (2002).

2.4.1 Filtros de harmônicos

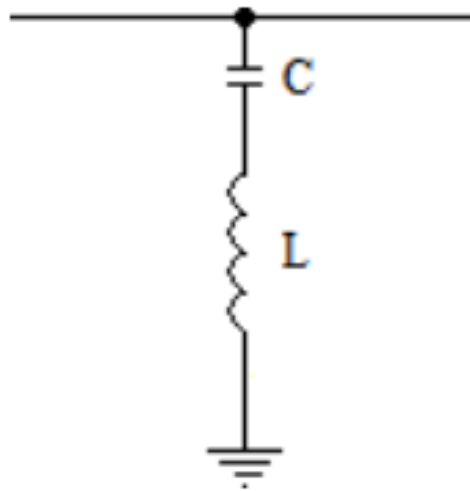
Uma das soluções mais comuns para mitigação do conteúdo harmônico no sistema é a inclusão de filtros harmônicos. Com o estudo do espectro harmônico da corrente da carga, é possível projetar um filtro sintonizado para uma determinada frequência. Estes filtros podem ser classificados como Filtros Passivos e Filtros Ativos.

a) Filtros passivos

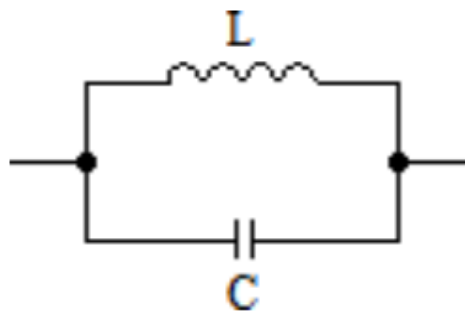
Filtros passivos são compostos por indutores e capacitores, com uma frequência de corte definida em projeto. A desvantagem deste modelo de filtro é vista quando há alguma alteração no perfil da carga ou quando há inclusão de outras cargas, que faz com que o espectro das frequências harmônicas do sistema sofra alteração. Nestes casos, é necessário um novo projeto de filtro para mitigar as frequências indesejadas. Os filtros passivos podem ser projetados com seus componentes LC em paralelo (constituindo um filtro passa-altas) ou em série (constituindo um filtro passa-baixas), ilustrado na Figura 15, respectivamente, em (a)

e em (b) (SENRA, 2013).

Figura 15 – Topologia dos filtros de harmônicas passivo paralelo (a) e série (b)



(a)



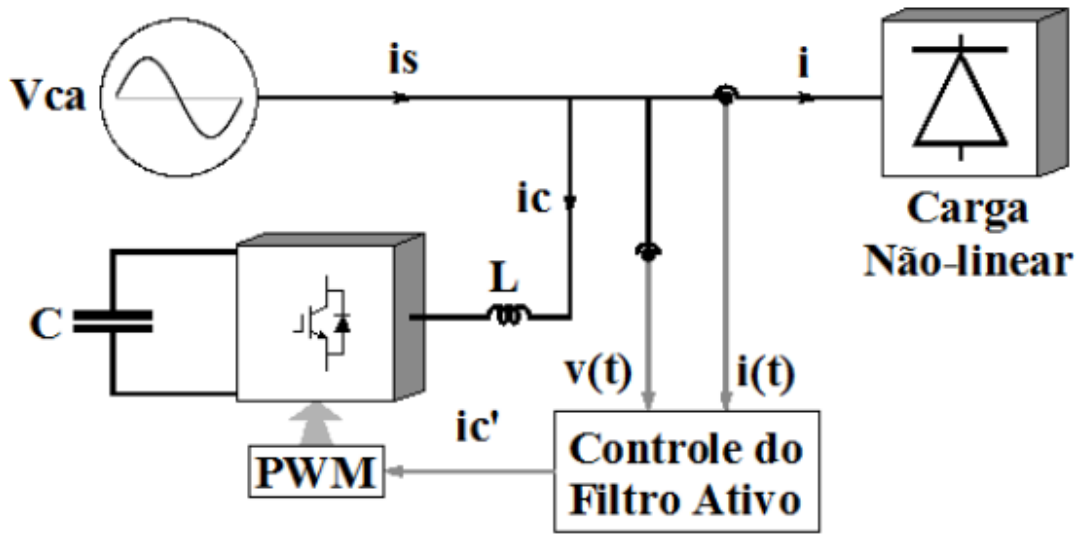
(b)

Fonte: Morais (2011)

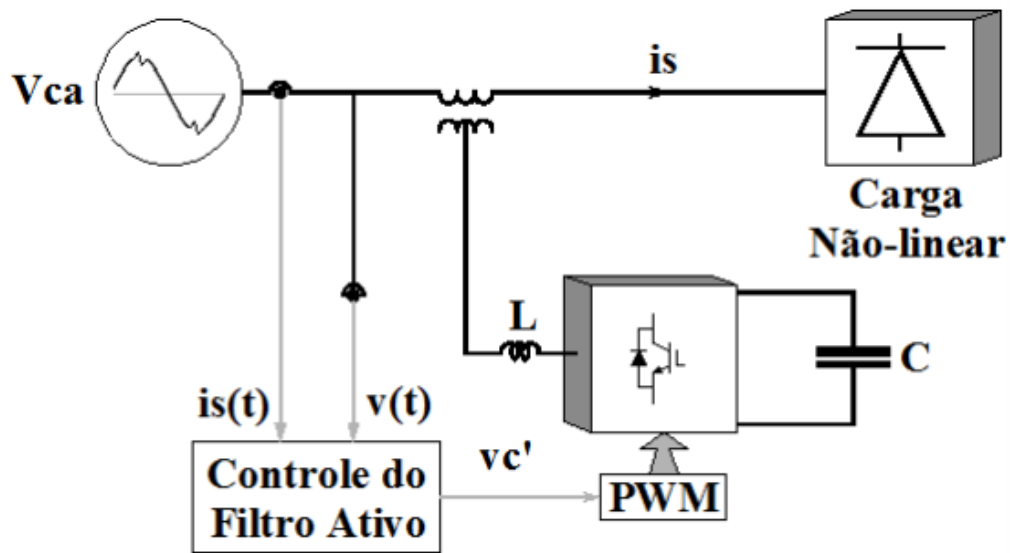
a) Filtros ativos

Diferentemente do filtro passivo, que é projetado para uma frequência de corte específica, o filtro ativo monitora continuamente as ordens harmônicas presentes. Composto, basicamente, por um controlador ativo e um conversor PWM (Figura 16), este filtro gera uma corrente (ou tensão) não-senoidal que, ao ser sobreposta à corrente (ou tensão) da fase do sistema, a corrente na carga seja uma função exatamente senoidal, como apresentado na Figura 17 (SENRA, 2013).

Figura 16 – Topologia dos filtros de harmônicas ativo paralelo (a) e série (b)



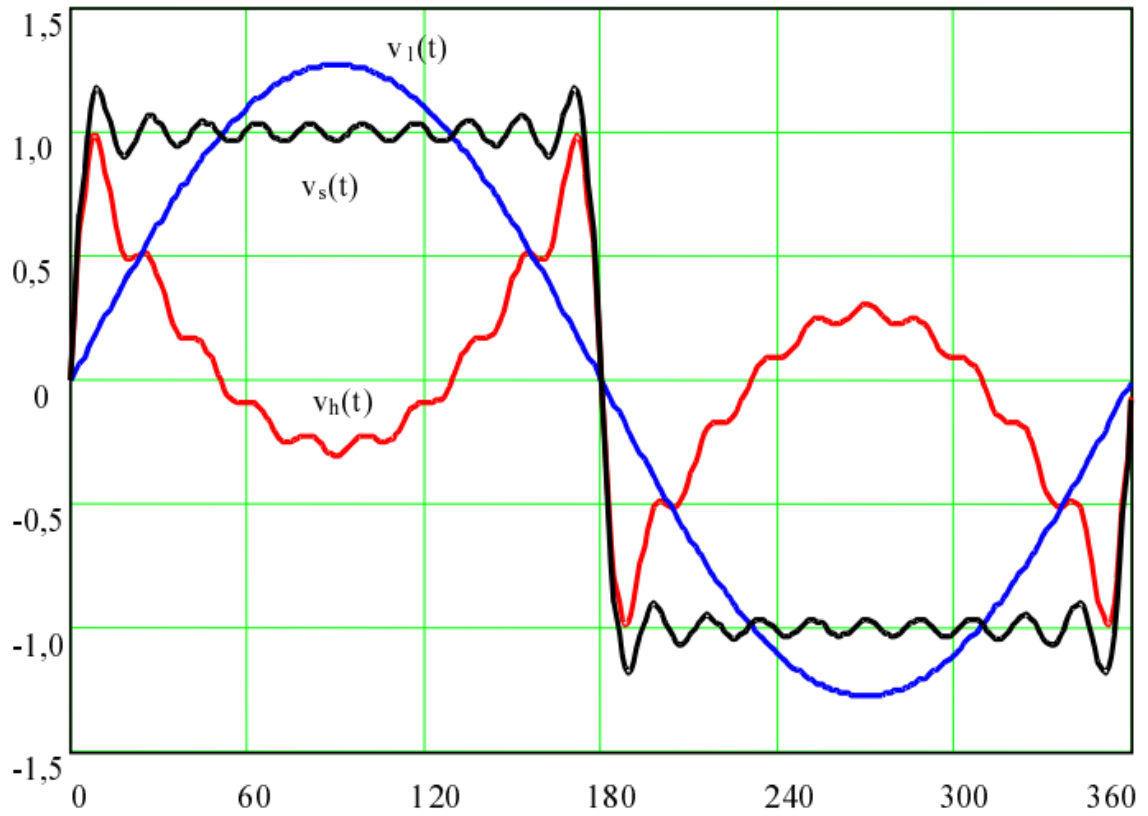
(a)



(b)

Fonte: Morais (2011)

Figura 17 – Tensão de entrada $v_s(t)$ e suas componentes



Fonte: Ribeiro (2003).

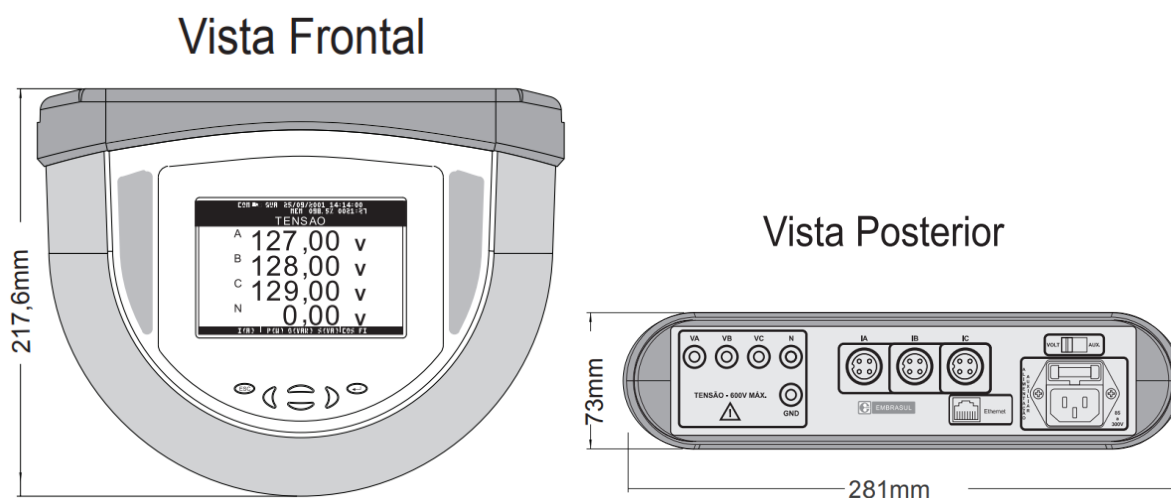
A tensão $v_h(t)$ é a componente de $v_s(t)$ que deve ser anulada pelo filtro ativo para que a carga fique submetida a uma tensão senoidal sem distorções, ilustrada pela onda $v_1(t)$.

3 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

3.1 Instrumento

O instrumento de medição utilizado neste estudo é o analisador de energia elétrica RE7000, da marca EMBRASUL. Este equipamento, resumidamente, é um medidor registrador de grandezas elétricas, dotado de entradas trifásicas de tensão e corrente, as quais permitem a análise de tensões, corrente, potências ativas, reativas e aparentes, fator de potência, desbalanceamentos, frequências, distorção total de demanda, consumos, demandas e Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD). Também, o equipamento utilizado possui módulos adicionais para medições mais específicas, possibilitando que o analisador realize medições em sistemas desbalanceados e com conteúdo harmônico, além de captar eventos transitórios e de realizar medições de *flicker* (como afundamentos, elevações e interrupções da tensão RMS) (EMBRASUL, 2013).

Figura 18 – Visualização do painel frontal e inferior do analisador de energia RE7000



Fonte: Embrasul (2013).

O principal módulo a ser utilizado neste estudo é o Módulo H – Harmônicas – do analisador da linha RE, o qual dispõe de diversas ferramentas que garantem uma análise completa da situação mensurada. Dentre as ferramentas podem-se citar variadas as tabelas, histogramas, formas de onda e relatórios obtidos através deste módulo, além das muitas possibilidades de configuração de cada uma dessas funções (quantas ou quais fases serão analisadas, se os valores serão em % ou RMS, quais ordens e etc.).

A seguir, na Tabela 3, são descritas as especificações técnicas do analisador utilizado, RE7000 portátil. Já a Tabela 4 indica as especificações técnicas dos sensores de corrente utilizados, TI3000.

Tabela 3 – Especificações técnicas do analisador RE7000/PT

Apresentação	Display gráfico tipo LCD, com backlight (retro iluminação).
Alimentação	70 a 500 VCA, e alimentação DC de 100 a 500 V.
Frequência	45 a 70 Hz
Faixa da Medição de Tensão	50 a 500 VCA
Precisão da Medição de Tensão	0,5% da leitura
Norma da Medição de Tensão	IEC 61000 – 4 – 30
Precisão da Medição de Corrente	0,5% para faixa de 5% a 100% do fundo de escala 1,5% para faixa de 2% a 5% do fundo de escala
Sensor de Corrente	Flexível – TI3000
Comunicação	Via porta Ethernet 10/100Mbps
Memória Interna	2 GB
Consumo	10 VA
Temperatura de operação	-10° a +60°C
Umidade Relativa do Ar	0 a 95% sem condensação.
Isolamento	2 kV – 60 Hz
Dimensões	281x292x73 mm
Peso	1,7 kg
Categoria de Instalação	CAT III/600V
Grau de Proteção	IP-65
Conversor A/D	16 bits
Taxa de amostragem	128 amostras por ciclo
Base de tempo	Cristal de quartzo – Resolução de 100 ms

Fonte: Adaptado de Embrasul (2013).

Tabela 4 – Especificações técnicas do sensor de corrente TI3000

Faixa de Medição	Até 3000A
Precisão	0,5% da leitura
Escala de Frequência	40 – 5000 Hz
Tensão de Operação	500V IEC 1010 CAT III
Normas	Segundo IEC 1010 e CE (1997)
Temperatura de Operação e Umidade Relativa	-20 a 55°C
Raio Mínimo de Curvatura do Sensor	19mm
Grau de Proteção	Sensor IP65

Fonte: Adaptado de Embrasul (2013).

3.2 Software

O software utilizado é o ANL7000, versão 5.16, que é compatível com os analisadores da linha RE da Embrasul. Este programa tem o objetivo de realizar as leituras dos dados armazenados na memória dos registradores do analisador RE7000 e apresentar variadas funções existentes para o estudo das medições, através de relatórios e gráficos (EMBRASUL, 2012).

Ao todo são gerados quinze arquivos pelo analisador de energia, sendo: sete com extensão *.dat*, seis com extensão *.cfg*, um com extensão *.emb* e um com extensão *.emb2*. Para iniciar a decodificação das amostras no software, é necessário realizar o carregamento do arquivo *.emb*.

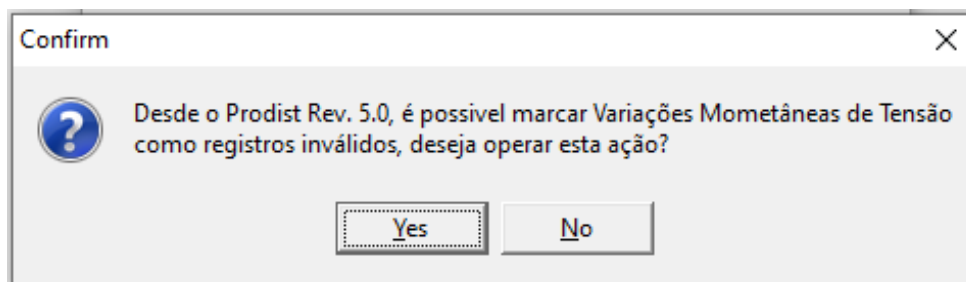
Figura 19 – Carregamento do arquivo *.emb* para o software ANL7000



Fonte: Figura gerada pelo autor através do software ANL7000 (2021).

Anteriormente ao acesso à tela principal do software ANL7000, o mesmo questiona o usuário sobre a possibilidade de considerar medições indicadas por VTCD como registros inválidos. Para análises baseadas na PRODIST, é necessária a confirmação deste item.

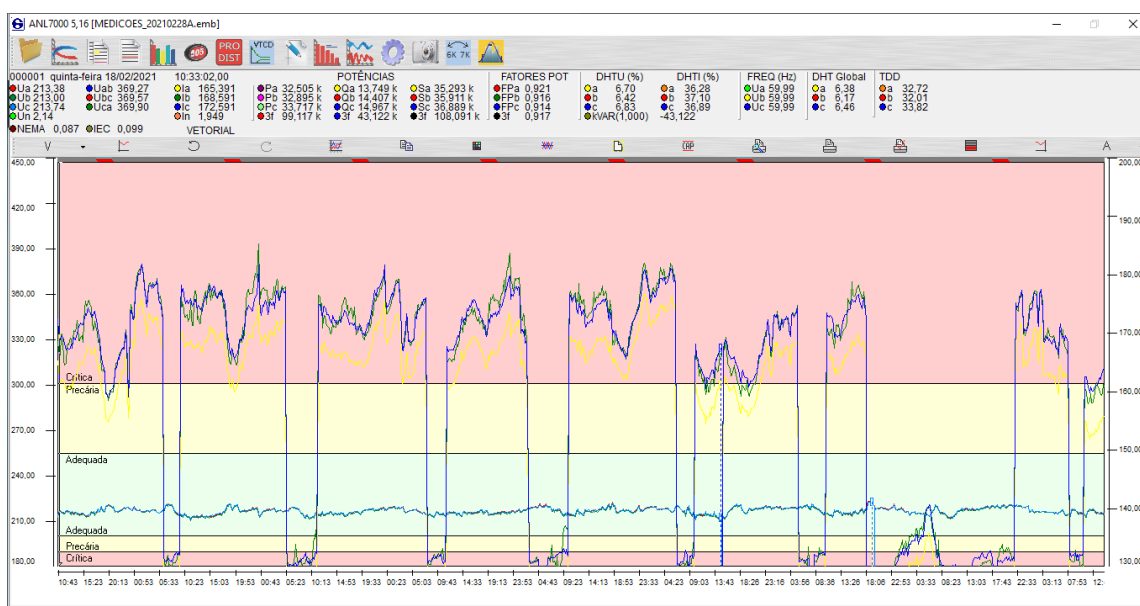
Figura 20 – Consideração do software ANL7000 sobre registros inválidos



Fonte: Figura gerada pelo autor através do software ANL7000 (2021).

Obtendo acesso ao programa, é possível gerar os relatórios completos sobre a análises das grandezas elétricas (tensão, corrente e potência consumida), dos afundamentos de tensão e falta de energia, além de visualizar os gráficos globais e as VTCD's (considerados registros inválidos). Aliás, o software permite a análise das harmônicas registradas no período de medição, fundamental para o propósito deste projeto de diplomação.

Figura 21 – Visualização da tela principal do software ANL7000



Fonte: Figura gerada pelo autor através do software ANL7000 (2021).

3.3 Método

Para este estudo, em acordo com o item 2.5.1.1 do Módulo 8 do PRODIST, elaborado pela ANEEL (2020), realizou-se o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas para gerar os indicadores individuais em intervalos consecutivos (período de integralização), com duração de 10 minutos cada, exceto os casos englobados no item 9.1.6.2. Este item declara que, em ocorrências de VTDC ou interrupções de longa duração (registros inválidos), o intervalo de medição de 10 (dez) minutos deve ser expurgado e substituído por igual número de leituras válidas, agregando-se consecutivamente às demais amostras. Desta forma, totaliza-se um período de 1 (uma) semana de medição.

3.3.1 Terminologia

Para parametrizar a simbologia das grandezas mensuradas, considerando a diversidade de termos utilizados pelos autores, utiliza-se a terminologia apresentada na Tabela 5:

Tabela 5 – Terminologia do autor

Identificação das Grandezas Gerais	Símbolo
Ordem harmônica	h
Tensão harmônica de ordem h (V)	V_h
Corrente harmônica de ordem h (A)	I_h
Amplitude de tensão portadora da frequência fundamental (V)	V_1
Amplitude de corrente portadora da frequência fundamental (A)	I_1
Distorção harmônica individual (%)	DHI
Distorção harmônica individual de tensão (%)	DHIv
Distorção harmônica individual de corrente (%)	DHIi
Distorção harmônica total (%)	DHT
Distorção harmônica total de tensão (%)	DHTv
Distorção harmônica total de corrente (%)	DHTi
Identificação das Grandeza Específicas ao PRODIST	Símbolo
DHTv para as componentes pares não múltiplas de 3 (%)	DHTv _p
DHTv para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (%)	DHTv _i
DHTv para as componentes múltiplas de 3 (%)	DHTv ₃

Fonte: Elaboração própria (2021).

Tabela 5 (conclusão)

Identificação das Grandezas Gerais	Símbolo
Valor do indicador $DHTv$ (%) que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DHTv_{(95\%)}$
Valor do indicador $DHTv_p$ (%) que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DHTv_{p(95\%)}$
Valor do indicador $DHTv_i$ (%) que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DHTv_{i(95\%)}$
Valor do indicador $DHTv_3$ (%) que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DHTv_{3(95\%)}$

Fonte: Elaboração própria (2021).

3.3.2 Fundamentação

Segundo a ANEEL (2020), para a análise dos dados, deve-se seguir uma metodologia para a medição dos sinais e, para a coleta de dados, devem-se utilizar sistemas de medição cujas informações coletadas podem ser processadas por meio de recurso computacional. Nos sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro quando o sistema for conectado em estrela aterrada e, fase-fase para as demais configurações.

3.3.3 Instrumentação

Conforme o item 3.3 do Módulo 5 da PRODIST – Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura –, os sistemas de medição destinados à apuração dos parâmetros de QEE (como no caso das distorções harmônicas) devem apurar as leituras por meio de equipamentos que operem segundo o princípio da amostragem digital. Para fins do cálculo de distorções harmônicas, o sistema de medição deve apurar, no mínimo, até a 40^a (quadragésima) ordem harmônica. Ademais, as medições devem corresponder ao tipo de ligação do usuário, abrangendo medições entre todas as fases e o neutro fornecidos no ponto de conexão e, caso o neutro não seja fornecido pela distribuidora no ponto de conexão, a medição deve ser realizada entre as fases. (ANEEL, 2020)

3.3.4 Valores de referência

a) Normas da ANEEL (PRODIST)

A regulamentação brasileira que trata de limites harmônicos está no módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). Nesse documento, são estabelecidas a terminologia, a metodologia de medição, a instrumentação e os valores de referência para as distorções de tensão harmônicas.

A resolução normativa que descreve o PRODIST, atualmente, não define limites para os harmônicos de corrente, somente para harmônicos de tensão. Os parâmetros $DHT_{V(95\%)}$, $DHT_{Vp(95\%)}$, $DHT_{Vi(95\%)}$ e $DHT_{V3(95\%)}$ indicam se as distorções estão ou não dentro dos valores tolerados, conforme exposto na Tabela 6. Se os valores destas variáveis ultrapassam os limites de 8%, 2%, 6% e 5%, respectivamente, em apenas 5% da quantidade total de leituras realizadas, o que equivale a aproximadamente 51 amostras, diz-se que os harmônicos estão prejudicando a qualidade da energia elétrica do sistema.

Na Tabela 6, são apresentados os valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental). Observa-se, na tabela, que a regulamentação brasileira admite uma distorção de tensão, na baixa tensão, de até dez por cento.

Tabela 6 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão Nominal		
	$V1 \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V1 < 69,0 \text{ kV}$	$69,0 \text{ kV} \leq V1 < 230,0 \text{ kV}$
$DHT_{V(95\%)}$	10,0 %	8,0 %	5,0 %
$DHT_{Vp(95\%)}$	2,5 %	2,0 %	1,0 %
$DHT_{Vi(95\%)}$	7,5 %	6,0 %	4,0 %
$DHT_{V3(95\%)}$	6,5 %	5,0 %	3,0 %

Fonte: ANEEL (2020).

Na sétima revisão do Módulo 8 da PRODIST da ANEEL (2015), estão definidos os níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental), dados usados como referência para os autores: S. M. Fagundes (2011), M. E. Rolim (2015) e A. F. Neto (2009). Entretanto, a

resolução em vigor não trata das DHI's, apenas das DHT's.

Tabela 7 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)			
		$V1 \leq 1$ [kV]	$1 < V1 \leq 69$ [kV]	$69 < V1 \leq 230$ [kV]	$69 < V1 < 230$ [kV]
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Adaptado da ANEEL (2015).

Os valores dispostos nas Tabelas 6 e 7 são calculados pela Equação 4 para distorções harmônicas totais e pela Equação 5 para distorções harmônicas individuais, ambas apresentadas no item 2.1.2. Como particularidade entre os cálculos, alteram-se apenas as ordens harmônicas a serem consideradas, sendo elas as ordens pares, ímpares múltiplas de 3 e ímpares não múltiplas de três.

b) Recomendação técnica da IEEE-519-1992

Esta recomendação produzida pelo IEEE, descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, indica métodos de medição e limites de distorção. Os limites estabelecidos se referem aos valores medidos no Ponto de Acoplamento Comum – PAC – e diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC. Quanto maior for a corrente de curto-circuito (I_{cc}) em relação à corrente de carga, maiores são as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC e, à medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis. A grandeza DHT_i é definida como a distorção harmônica da corrente, em % da máxima demanda da corrente de carga demanda de 15 ou 30 minutos. Isto significa que a medição deve ser feita no pico de consumo. (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 1993)

Tabela 8 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de corrente

120 V ≤ V₁ ≤ 69 kV						
I_{cc} / I_1	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DHT _i
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
69 kV < V₁ ≤ 161 kV						
I_{CC} / I_1	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DHT _i
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50<100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100<1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
161kV < V₁						
I_{cc} / I_1	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DHT _i
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: NETO (2009).

As harmônicas de ordem par são limitadas em 25% dos limites das harmônicas ímpares da Tabela 8. Segundo Neto (2009), as distorções de corrente que resultem componente contínuo, como conversores de meia onda, não são admissíveis.

Todo equipamento de geração de energia é limitado aos mesmos valores de distorção harmônica de corrente que $I_{CC} / I_L < 20$, independente do real valor desta relação para estes dispositivos (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 1993).

c) Manuais dos equipamentos instalados

Além das normativas da ANEEL e da recomendação IEEE-519-1992, serão consideradas como valores de referência as indicações de distorções harmônicas presentes nos manuais dos equipamentos instalados na unidade consumidora analisada.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Apresentação

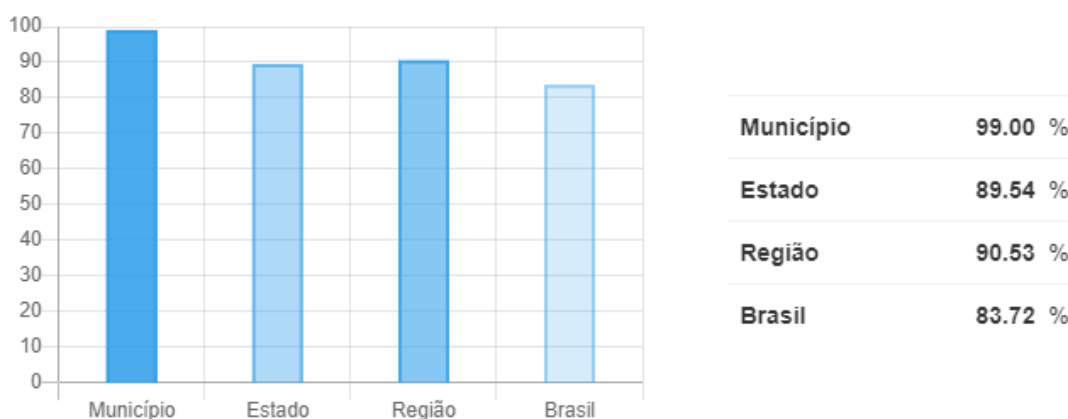
Neste tópico, é realizado uma abordagem sobre a importância do SEMASA, para captação, tratamento e distribuição de água para a cidade de Itajaí, realizando um comparativo com o estado de Santa Catarina, com a região Sul e com o Brasil. Também, é apresentado dados sobre a Estação de Recalque de Água Tratada do bairro Centro, além de uma visão técnica da unidade, demonstrando as cargas presentes na instalação elétrica do local.

4.1.1 SEMASA de Itajaí

Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico de Itajaí elaborado pela Prefeitura de Itajaí (2012), o Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura foi legalmente constituída em 9 de janeiro de 2003, pela Lei Municipal nº 3.863, iniciando seus serviços em abril e, em julho do mesmo ano, o Decreto Municipal nº 6.834 estabeleceu as competências e padrões técnicos relacionadas aos serviços públicos de água e esgoto no município de Itajaí, regulamentando a relação entre a SEMASA e seus clientes. Neste ano inicial (2003), a SEMASA cuidou de medidas emergenciais para garantir água de qualidade à população e assegurar que não houvesse interrupção do fornecimento e, em 2004, a SEMASA iniciou estudos para estabelecer as diretrizes básicas para os próximos anos, planejando os investimentos necessários para atender o crescimento da cidade dentro dos padrões ambientais e tecnológicos.

Segundo Sistema Nacional de Informações de Saneamento – SNIS (2019) –, o município de Itajaí é atendido pela rede pública de abastecimento de água numa faixa maior que 90%, sendo superior ao índice do estado de Santa Catarina, da região Sul e do Brasil, como ilustrado na Figura 22. Este percentual indica a parcela da população total (urbana e rural) efetivamente atendida por rede de abastecimento de água em relação à população total residente dos prestadores que responderam o SNIS, no ano de referência, no caso, 2019.

Figura 22 – Índice de atendimento total de água



Fonte: SNIS (2009).

Em 2019, Itajaí possuía uma população total de 219.536 habitantes, sendo 207.658 residentes da área urbana do município.

O Sistema de Abastecimento de Água existente no Município de Itajaí é composto por uma série de unidades que, em conjunto, garantem a captação, adução, tratamento, reserva e distribuição de água à cidade de Itajaí. A Tabela 9 apresenta a produção atual de água tratada de cada unidade de tratamento do sistema.

Tabela 9 – Produção de água tratada das unidades do SEMASA

Unidade	Produção Atual (l/s)
Estação de Tratamento de Água – São Roque	720,00
Estação de Tratamento de Água – Arapongas	170,00
Estação de Tratamento de Água – Limoeiro	8,30
Poços Artesianos	25,00

Fonte: Adaptado da Prefeitura de Itajaí (2012).

Segundo a Prefeitura de Itajaí (2012) através do Plano Municipal de Saneamento Básico, o volume de água tratada produzido no Sistema de Abastecimento de Água de Itajaí nas Estações de Água Tratada do São Roque (Figura 23) e de Arapongas (Figura 24) correspondeu a 21.075.258 m³/ano. Já na Estação de Tratamento de Água do Limoeiro e nos poços artesianos, este volume equivaleu à 207.032 m³/ano.

Figura 23 – Estação de Tratamento de Água do São Roque



Fonte: Prefeitura de Itajaí (2012).

Figura 24 – Estação de Tratamento de Água de Arapongas



Fonte: Prefeitura de Itajaí (2012).

Na Figura 25 e 26, são apresentadas as localizações das estações de tratamento de água e dos poços artesianos, respectivamente.

Figura 25 – Localização das estações de tratamento de água



Fonte: Prefeitura de Itajaí (2012).

Figura 26 – Localização dos poços artesianos



Fonte: Prefeitura de Itajaí (2012).

4.1.2 ERAT Centro e cargas instaladas

A Estação de Recalque de Água Tratada do Centro está localizada na Rua João Bauer, nº 104, no bairro Centro de Itajaí. A unidade é constituída por 3 (três) conjuntos de motobombas centrífugas, os quais possuem a função de pressurização da rede de água localizada no Centro, e um reservatório, com capacidade para 1.500 (mil) m³ de água tratada, o qual encontra-se desativado (PREFEITURA DE ITAJAÍ, 2012).

Figura 27 – Reservatório desativado na ERAT Centro



Fonte: Prefeitura de Itajaí (2012).

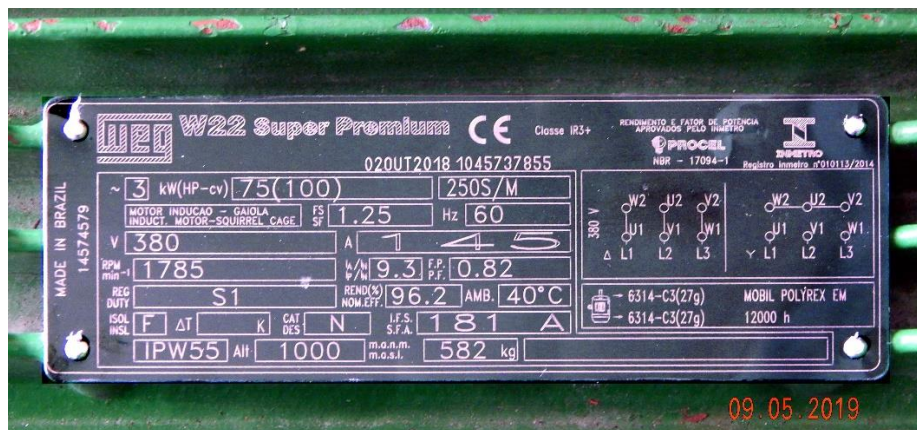
Os motores de indução dos conjuntos motobombas são equipamentos WEG, carcaça 250S/M, da linha *Super Premium*, com uma potência de 100 cv e uma corrente nominal de 145 A. Esta linha de motores WEG de alto rendimento apresenta perdas de 20 a 40% menores em comparação com os motores elétricos convencionais (WEG, 2021). Já as bombas centrífugas são fabricadas pela KSB, modelo OMEGA 150-360 B. A seguir, serão apresentados os registros fotográficos de cada CMB com as devidas placas de informações.

Figura 28 – CMB 1



Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 29 – Placa de informações do motor do CMB 1



Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 30 – Placa de informações da bomba do CMB 1



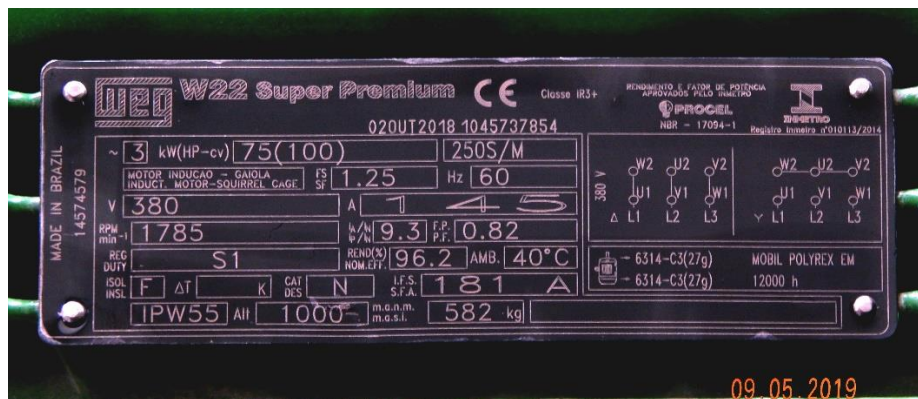
Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 31 – CMB 2



Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 32 – Placa de informações do motor do CMB 2



Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 33 – Placa de informações da bomba do CMB 2



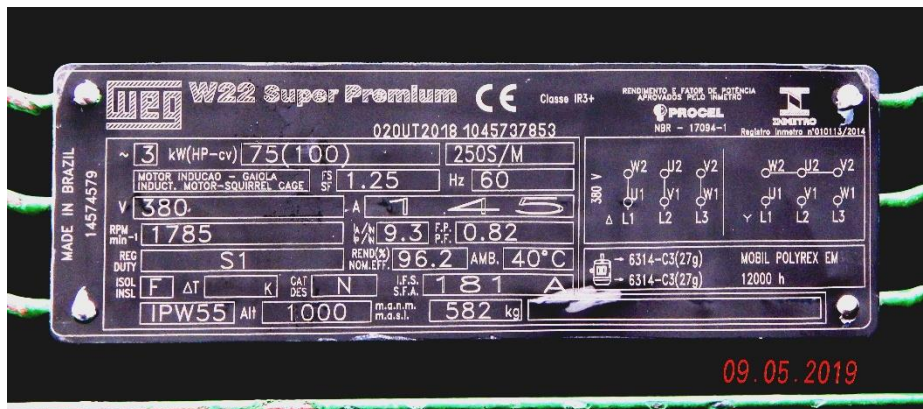
Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 34 – CMB 3



Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 35 – Placa de informações do motor do CMB 3



Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 36 – Placa de informações da bomba do CMB 3



Fonte: Fotografia tirada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Tabela 10 – Resumo das especificações dos CMB's de pressurização

BOMBA CENTRÍFUGA	
Modelo	KSB OMEGA 150-360 B
Vazão (m ³ /h)	360,0
Altura manométrica (mca)	48,0
Ano	2018

MOTOR DE INDUÇÃO	
Modelo	WEG W22 Super Premium
Carcaça	250S/M
Potência (cv)	100,0
Tensão (V)	380,0
Corrente nominal (A)	145,0
Frequência (Hz)	60,0
Fator de Potência	0,82
Rendimento (%)	96,2
Número de Polos	4
Rotação (RPM)	1785,0
Ano	2018

Fonte: Elaboração do autor (2021).

As cargas são acionadas individualmente por inversores de frequência da marca Schneider, modelo ATV630D90N4. Este inversor possui limite de corrente de linha de 156,2 A à uma tensão de 380 V, podendo alimentar motores trifásico de até 90 kW (SCHNEIDER ELECTRIC, 2019).

Figura 37 – Inversor de frequência ATV630D90N4 Schneider



Fonte: Schneider Electric (2019).

Segundo Saimon Fagundes (2011), os inversores de frequência são considerados um dos principais geradores de conteúdo harmônico, visto no item 2.2.3. Desta forma, a Schneider Toshiba Inverter Europe SAS (2015) disponibiliza para os usuários um estudo realizado por Y. Guignard com dados de simulação sobre as distorções harmônicas individuais de corrente de ordens primas e as distorções harmônicas totais de corrente, para todos os modelos de inversores de frequência da linha ATV, para 100% de carga e para 80% de carga. Os valores das distorções harmônicas de corrente do ATV630D90N4 estão disponibilizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Distorções harmônicas de corrente do ATV630D90N4

Ordem Harmônica	ATV630D90N4 - DHli (%)	
	100% de carga	80% de carga
5 ^a	35	40
7 ^a	19	23
11 ^a	8,5	8,4
13 ^a	6,2	6,5
17 ^a	5	5
19 ^a	3,9	3,9
23 ^a	3,5	3,5
25 ^a	2,8	2,8
29 ^a	2,6	2,6
31 ^a	2,2	2,2
35 ^a	2	2,1
37 ^a	1,8	1,8
41 ^a	1,6	1,7
DHTi	42,3	48,0
Corrente de entrada (A)	156,2	128,2

Fonte: Adaptado de Schneider Toshiba Inverter Europe SAS (2015).

Desta forma, estes valores de conteúdo harmônico de corrente são considerados previsíveis para o sistema analisado, tendo amplitude e frequência já esperadas, variando de acordo com a carga consumida por cada CMB. (ISONI, 2005)

Além dos três conjuntos motobombas, a unidade sob estudo possui outras cargas como iluminação e ares-condicionados, apresentadas no quadro de cargas do diagrama unifilar representado no ANEXO I, elaborado pelo autor. Este diagrama mostra a interligação entre o ramal de alimentação no Ponto de Entrega (PDE) da concessionária CELESC, transformador de potência, medição, proteção e cargas, além do ponto de conexão do analisador RE7000.

O número da unidade consumidora da ERAT Centro é 27597025, com

modalidade tarifária horária verde do Grupo A4 e demanda contratada de 135 kW. A concessionária CELESC alimenta a UC na tensão primária de 23,1 kV. O padrão de entrada de energia elétrica desta UC é composto por uma subestação com 1 (um) transformador de potência instalado em poste de 225 kVA, conectado com o primário em delta e o secundário em estrela, o qual realiza o rebaixamento da tensão primária para 220/380 V.

Figura 38 – Segunda via da fatura de energia elétrica 03/2021 da UC 27597025

SERVICO MUNICIPAL DE AGUA SANEAMEN

CPJ 05.472.936/0001-39 LOCAL: 1701 ETAPA/LIVRO: 63/021443

R JOAO BAUER, 115 - ESTACAO BOMBEAMENTO DE AGUA - CENTRO

CENTRO ITAJAI (ITJ) - ITAJAI - SC - 88301-100

RESERVADO AO FISCO

PERÍODO FISCAL: 01/03/2021

0D9E.E643.BE40.A4DA.80E7.8711.5F7C.4CA5

DADOS DA UNIDADE CONSUMIDORA / FATURAMENTO / FORNECIMENTO
SERVICO PUBLICO / MOD TARIFARIA HORARIA VERDE / TRIFASICO

CONTRATO DE FORNECIMENTO

PERÍODO: TODOS

DEMANDA PONTA (kW):

135 CONSUMO PONTA (kWh):

DEMANDA FORA PONTA (kW):

0 CONSUMO FORA PONTA (kWh):

RESERVA CAP.F. PONTA (kW):

RESERVA CAP. PONTA (kW):

DADOS DA MEDIÇÃO - CONSUMO REGISTRADO NO MÊS

EQUIPAMENTO	LEITURA		GRANDEZA	CONSTANTE DE FATURAMENTO	MEDIDO
	ATUAL	ANTERIOR			
42132918					
CNP	2901895	2669457	kWh PT	0,0240	5717,00
CNF	32387069	29934548	kWh FP	0,0240	60332,00
DNP	1150	1346	kW PT	0,0960	113,16
DNF	1187	1484	kW FP	0,0960	116,80
DEP	17031	15881	kW PT	0,0960	113,16
DFP	18978	17791	kW FP	0,0960	116,80
UFO	0	0	kWh PT	0,0240	0,00
UFF	13	13	kWh FP	0,0240	0,00
DMP	60796	56528	kW PT	0,0240	104,99
DMF	69938	65574	kW FP	0,0240	107,35
ERA	4581386	4246970	kVA _{rh} TP	0,0240	8226,00

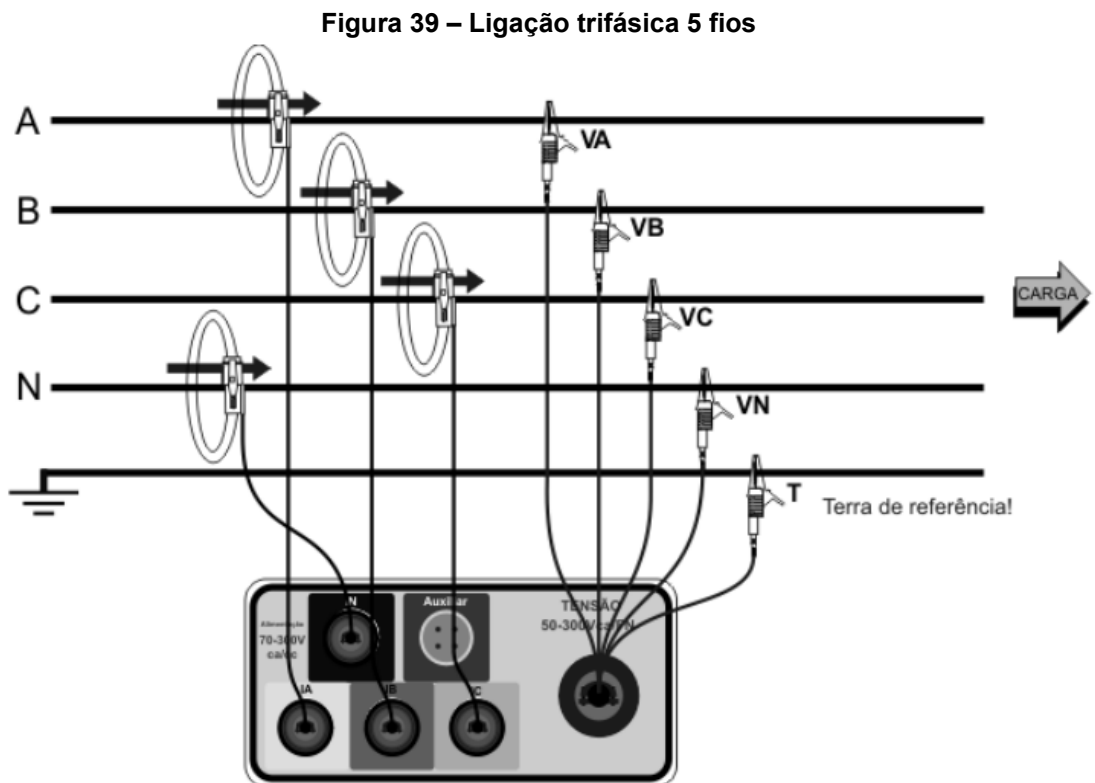
Fonte: Figura capturada pelo autor (2021).

4.2 Instalação do analisador de energia

O ponto de acoplamento comum escolhido para a instalação do analisador está localizado na entrada do QGBT – Quadro Geral de Baixa Tensão – sala de comando da ERAT Centro. Este ponto de acoplamento contempla todas as cargas instaladas no sistema, de forma a mensurar as grandezas elétricas geradas por

completo.

A ligação utilizada é a 5F-4E-GE-GE (Figura 39), de modo a mensurar com maior precisão as correntes de neutro, importantes para análises harmônicas quando se trata de harmônicas ímpares múltiplas de três, como visto na Figura 13 no item 2.3.1.



Fonte: Embrasul (2013).

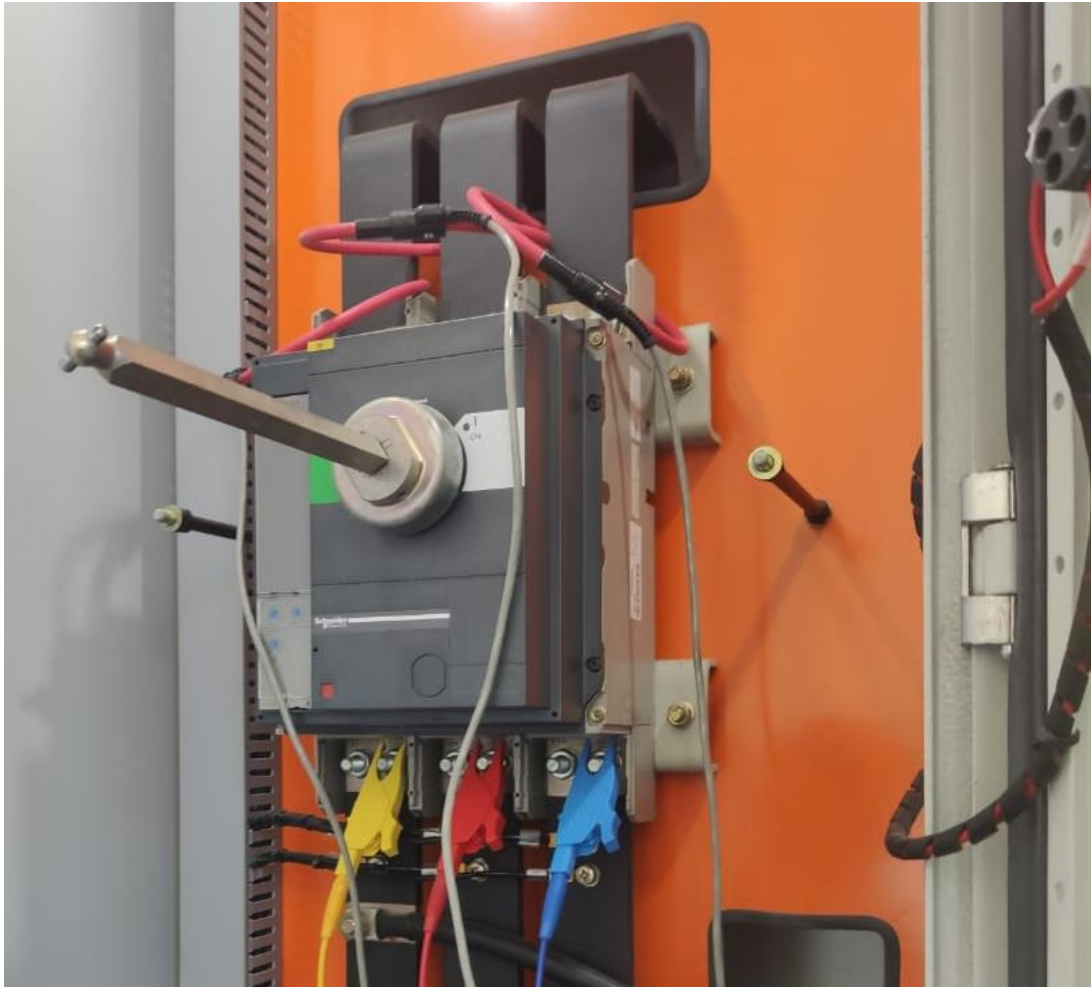
As conexões dos sensores de corrente das fases estão situadas anteriormente à chave geral do quadro, e a conexão do sensor de corrente de neutro situa-se no condutor de entrada do barramento de neutro comum, vindo da medição. Os sensores de corrente possuem em seus corpos uma seta indicando a orientação para instalação, a qual deve apontar a direção da carga. Segundo o Manual do Operação e Instalação do RE7000, da Embrasul (2013), a inversão dos sensores pode ocasionar erros de medição, como corrente invertida e potências incorretas.

Já os cabos de entrada de tensão são conectados nos polos da chave geral do QGBT, para as três fases, e nos barramentos de neutro e terra, para as demais entradas, como ilustrado na Figura 39. Para funcionamento, o analisador RE7000 é alimentado pelos cabos de entrada de tensão da Fase A e do Neutro, com a chave

seletora indicando a opção “volt”.

A instalação do analisador de energia ocorreu no dia 18 de fevereiro de 2021 às 10:33, sendo removido no dia 26 de fevereiro às 14:53 após 1177 registros. O instrumento foi configurado conforme às grandezas elétricas do SEP e ao método apresentado no item 3.3, para realizar as integrações a cada 10 minutos.

Figura 40 – Instalação do RE7000 no QGBT



Fonte: Fotografia capturada pelo autor na ERAT Centro (2021).

Figura 41 – Analisador de energia RE7000 em funcionamento



Fonte: Fotografia capturada pelo autor na ERAT Centro (2021).

4.3 Leitura e análise das amostras

Após remoção do equipamento de medição no dia 26 de fevereiro de 2021, realizou-se o download das amostras via cabo Ethernet por meio do software ANL7000. Para fins de análise, selecionou-se o intervalo que compreende de 18 de fevereiro de 2021 às 10:33 até 25 de fevereiro de 2021 às 11:23, totalizando 1012 registros, sendo 1008 registros válidos e 4 registros inválidos acusados pelo próprio programa.

Figura 42 – Seleção do intervalo de registro para análise

Intervalo de Registros	
Data Inicial:	18/02/2021 10:33:02
Data Final:	25/02/2021 11:23:32
Intervalo Selecionado:	
Registros Inválidos: 4	
Registros Válidos: 1008	
Total de Registros: 1012	
<u>C</u> onfirmar Intervalo	<u>L</u> ista de Registros

Fonte: Figura gerada pelo autor através do software ANL7000 (2021).

A Tabela 12 apresenta os registros considerados inválidos pelo programa utilizado, especificando a data, o horário, a magnitude (p.u.), a duração do evento (s) e o tipo de evento. O item 9.1.6.2 do Módulo 8 do PRODIST da ANEEL (2020) considera VTDC's (interrupções e afundamentos momentâneos, por exemplo) como registros inválidos, tratado no item 3.3 deste documento.

Tabela 12 – Registros inválidos da medição

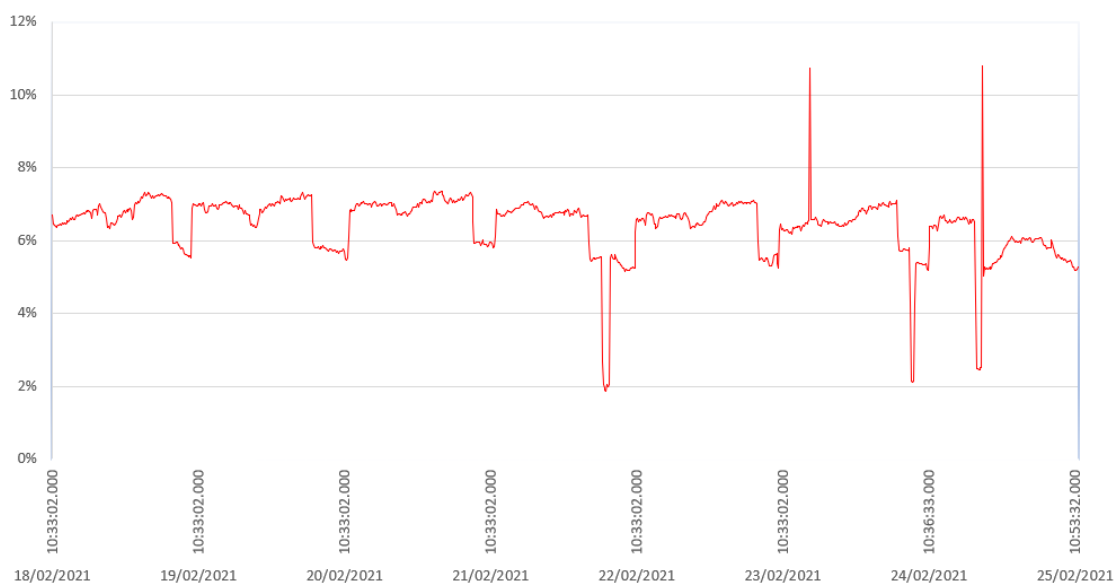
Registro	Data – Horário	Mag. (p.u.)	Duração (s)	Tipo
709	23/02/2021 – 08:42:59	0,224	0,14	Afundamento Momentâneo
748	23/02/2021 – 15:01:26	0,000	0,08	Interrupção Momentânea
910	24/02/2021 – 18:10:22	0,000	0,12	Interrupção Momentânea
918	24/02/2021 – 19:42:34	0,032	0,07	Interrupção Momentânea

Fonte: Adaptado de Software ANL7000 (2021).

5 RESULTADOS

A partir do analisador de QEE, extraiu-se os valores de conteúdo harmônico até a 41ª ordem e realizou-se a comparação com os parâmetros estabelecidos nos valores de referência (item 3.3.4). Os valores de todas as amplitudes de distorções harmônicas de cada ordem mensurada foram exportados do software ANL7000 e manuseados em planilhas para uma análise mais específica.

Figura 43 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Fase A em 1008 registos válidos



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Figura 44 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Fase B em 1008 registos válidos



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Figura 45 – Distorção Harmônica Total de Tensão na Fase C em 1008 registros válidos



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Analisando os gráficos de DHT_v das três fases apresentados anteriormente, é possível verificar picos e vales destacadamente. Estes valores estão diretamente relacionados aos eventos de VTDC, apresentados na Tabela 12, e são classificados como registros inválidos pela PRODIST, sendo desconsiderados da análise deste projeto de diplomação por trata-se de situações momentâneas. Desta forma, infere-se que a DHT_v oscila entre os valores dentro do limite regulamentado pela ANEEL.

Figura 46 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Fase A em 1008 registros válidos



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Figura 47 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Fase B em 1008 registros válidos



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Figura 48 – Distorção Harmônica Total de Corrente na Fase C em 1008 registros válidos



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Os valores do índice DHT_i avaliados apresentam um percentual muito superior quando comparados ao índice de DHT_v para o mesmo sistema. Novamente, é possível evidenciar a ocorrência dos eventos momentâneos por conta da presença de vales nos gráficos das três fases.

Através dos dados extraídos do programa ANL7000, foi possível encontrar os valores das máximas distorções harmônicas totais de tensão e de corrente dentro

do intervalo analisado, desconsiderando os registros inválidos. As máximas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Máximos valores de DHT de tensão e de corrente nas Fases A, B e C

Reg.	Data – Horário	DHT de Tensão (%)			DHT de Corrente (%)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
384	21/02/2021 – 02:23:02	7,36	-	-	-	-	-
378	21/02/2021 – 01:23:02	-	7,14	-	-	-	-
379	21/02/2021 – 01:33:02	-	-	7,42	-	-	-
926	24/02/2021 – 21:03:32	-	-	-	45,33	-	-
926	24/02/2021 – 21:03:32	-	-	-	-	44,97	-
940	24/02/2021 – 23:23:32	-	-	-	-	-	46,32

Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Tratando dos limites estabelecidos no PRODIST, ressalta-se que este não regula a carga, ou seja, a concessionária não gerencia os índices de conteúdo harmônico de corrente. A interpretação dos resultados, neste primeiro caso, é baseada nas Tabelas 6 e 7, com a faixa de tensão nominal inferior a 1,0 kV, exibido na Tabela 14. Além disso, é ressaltado que a resolução em vigor em 2021 não possui parâmetros máximos de DHl_v , apenas para os índices DHT_v . (ANEEL, 2020)

Entretanto, na Tabela 15, realiza-se a comparação dos índices individuais com base nos limites apresentados na sétima resolução da /PRODIST. (ANEEL, 2015)

Tabela 14 – Comparação da máxima DHT_v em cada fase com o limite regulamentado pela ANEEL

Indicador	Limite ANEEL (2021)	Medições		
	$V1 \leq 1,0 \text{ kV}$	Fase A	Fase B	Fase C
$DHT_{v(95\%)}$	10,0 %	7,36	7,14	7,42
$DHT_{vp(95\%)}$	2,5 %	0,65	1,07	1,07
$DHT_{vi(95\%)}$	7,5 %	7,31	6,97	7,21
$DHT_{v3(95\%)}$	6,5 %	0,79	1,23	1,34

Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Tabela 15 – Comparação da máxima DHIv em cada fase

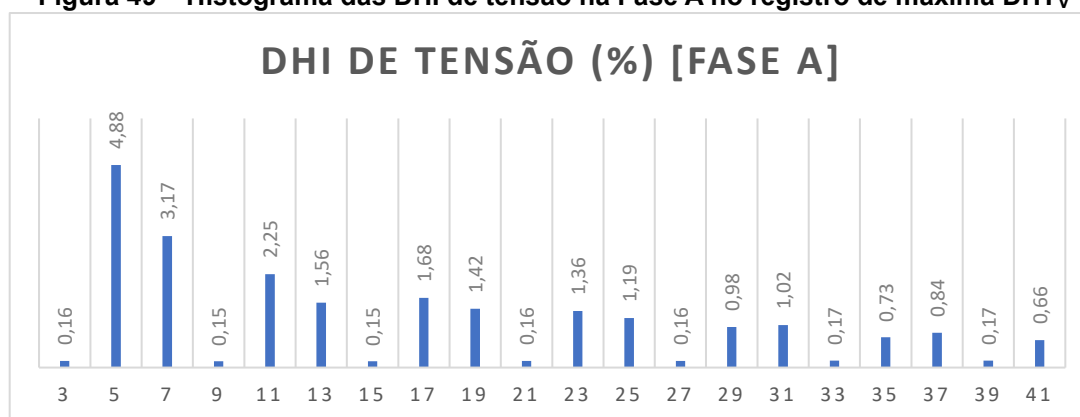
Ordem Harmônica	Fase A	Fase B	Fase C	Limite ANEEL (2015)
	DHI (%)	DHI (%)	DHI (%)	DHI (%)
2 ^a	0,32	0,39	0,38	2,5
3 ^a	0,47	0,5	0,52	6,5
4 ^a	0,19	0,29	0,29	1,5
5 ^a	5,07	4,82	5,16	7,5
6 ^a	0,18	0,29	0,3	1
7 ^a	3,43	3,25	3,16	6,5
8 ^a	0,19	0,3	0,3	1
9 ^a	0,28	0,4	0,36	2
10 ^a	0,17	0,29	0,3	1
11 ^a	2,47	2,31	2,51	4,5
12 ^a	0,17	0,29	0,3	1
13 ^a	1,61	1,48	1,52	4
14 ^a	0,2	0,31	0,31	1
15 ^a	0,21	0,33	0,36	1
16 ^a	0,19	0,31	0,32	1
17 ^a	1,77	1,69	1,91	2,5
18 ^a	0,19	0,32	0,32	1
19 ^a	1,47	1,35	1,44	2
20 ^a	0,22	0,35	0,35	1
21 ^a	0,21	0,33	0,4	1
22 ^a	0,21	0,34	0,34	1
23 ^a	1,46	1,48	1,66	2
24 ^a	0,19	0,33	0,34	1
25 ^a	1,26	1,19	1,23	2
26 ^a	0,21	0,34	0,34	1
27 ^a	0,2	0,34	0,43	1
28 ^a	0,21	0,35	0,34	1
29 ^a	1,03	1,09	1,25	1,5
30 ^a	0,2	0,34	0,34	1
31 ^a	1,09	1	1,05	1,5
32 ^a	0,21	0,35	0,35	1
33 ^a	0,24	0,38	0,47	1
34 ^a	0,21	0,36	0,35	1
35 ^a	0,81	0,9	1,03	1,5
36 ^a	0,22	0,37	0,36	1
37 ^a	0,89	0,84	0,89	1,5
38 ^a	0,23	0,38	0,38	1
39 ^a	0,26	0,38	0,45	1
40 ^a	0,22	0,39	0,38	1
41 ^a	0,72	0,81	0,96	1,5

Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Através do resumo presente na Tabela 14, observa-se que os valores de DHT_V estão dentro do limite regulamentado pela ANEEL por meio do Módulo 8 do PRODIST.

As Figuras 49, 50 e 51 são histogramas exportados do software ANL7000 pelo autor, de forma a ilustrar o valor RMS da tensão presente em cada ordem harmônica em relação à onda fundamental, no registro de máximo DHT_V . Nas Tabelas 16, 17 e 18, são apresentados os valores correspondentes à cada harmônica de tensão, da ordem fundamental até à 41ª ordem.

Figura 49 – Histograma das DHI de tensão na Fase A no registro de máxima DHT_V



Fonte: Gerado pelo autor através do software ANL7000 (2021).

Tabela 16 – Valores mensurados na Fase A no registro de máxima DHT_V

Registro		384	RMS (V)		219,41
Fundamental (Hz)		60,0	DHT (%)		7,36
IMPAR	RMS(V)	%FUND	PAR	RMS(V)	%FUND
1	218,820	100,00	2	0,353	0,16
3	0,366	0,16	4	0,299	0,13
5	10,683	4,88	6	0,305	0,13
7	6,950	3,17	8	0,332	0,15
9	0,332	0,15	10	0,319	0,14
11	4,934	2,25	12	0,312	0,14
13	3,414	1,56	14	0,353	0,16
15	0,332	0,15	16	0,339	0,15
17	3,679	1,68	18	0,332	0,15
19	3,108	1,42	20	0,407	0,18
21	0,366	0,16	22	0,387	0,17
23	2,986	1,36	24	0,346	0,15
25	2,606	1,19	26	0,380	0,17
27	0,360	0,16	28	0,394	0,17
29	2,145	0,98	30	0,366	0,16
31	2,246	1,02	32	0,366	0,16

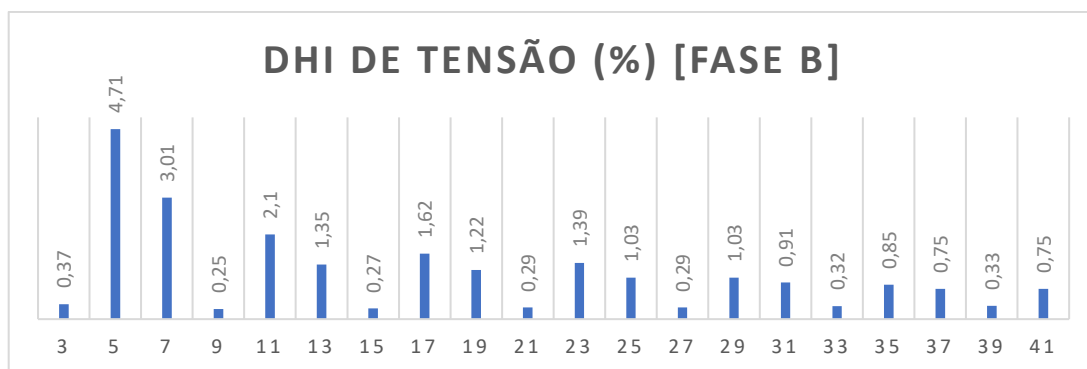
Fonte: Adaptado de Software ANL7000 (2021).

Tabela 16 (conclusão)

IMP	RMS(V)	%FUND	PAR	RMS(V)	%FUND
33	0,394	0,17	34	0,394	0,17
35	1,615	0,73	36	0,394	0,17
37	1,853	0,84	38	0,400	0,18
39	0,394	0,17	40	0,407	0,18
41	1,446	0,66	42	0	0

Fonte: Adaptado de Software ANL7000 (2021).

Figura 50 – Histograma das DHI de tensão na Fase B no registro de de máxima DHT_v



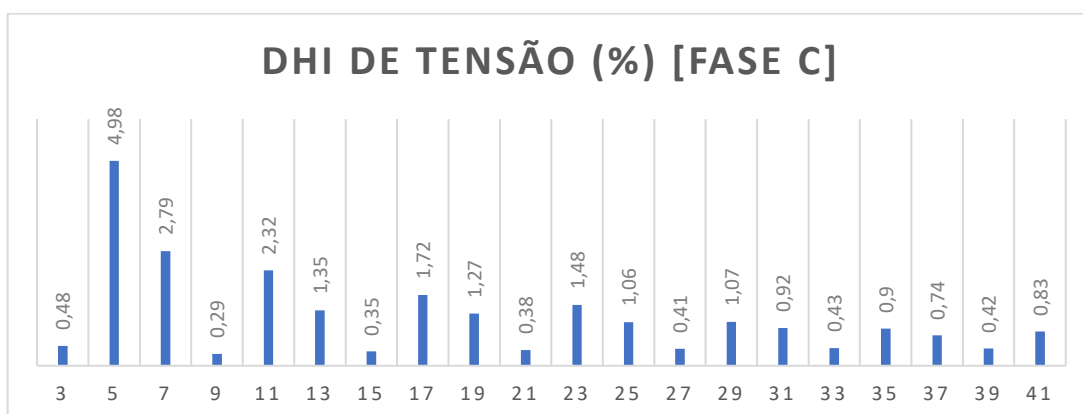
Fonte: Gerado pelo autor através do software ANL7000 (2021).

Tabela 17 – Valores mensurados na Fase B no registro de máxima DHT_v

Registro		378	RMS (V)		219,23
Fundamental (Hz)		60,0	DHT (%)		7,14
IMP	RMS(V)	%FUND	PAR	RMS(V)	%FUND
1	218,675	100,00	2	0,597	0,27
3	0,828	0,37	4	0,550	0,25
5	10,317	4,71	6	0,556	0,25
7	6,590	3,01	8	0,577	0,26
9	0,550	0,25	10	0,556	0,25
11	4,595	2,10	12	0,556	0,25
13	2,952	1,35	14	0,597	0,27
15	0,597	0,27	16	0,590	0,27
17	3,556	1,62	18	0,597	0,27
19	2,681	1,22	20	0,665	0,30
21	0,638	0,29	22	0,651	0,29
23	3,047	1,39	24	0,624	0,28
25	2,267	1,03	26	0,651	0,29
27	0,638	0,29	28	0,685	0,31
29	2,267	1,03	30	0,645	0,29
31	1,995	0,91	32	0,658	0,30
33	0,719	0,32	34	0,692	0,31
35	1,860	0,85	36	0,685	0,31
37	1,642	0,75	38	0,719	0,32
39	0,726	0,33	40	0,726	0,33
41	1,649	0,75	42	0	0

Fonte: Adaptado de Software ANL7000 (2021).

Figura 51 – Histograma das DHI de tensão na Fase C no registro de máxima DHT_v



Fonte: Gerado pelo autor através do software ANL7000 (2021).

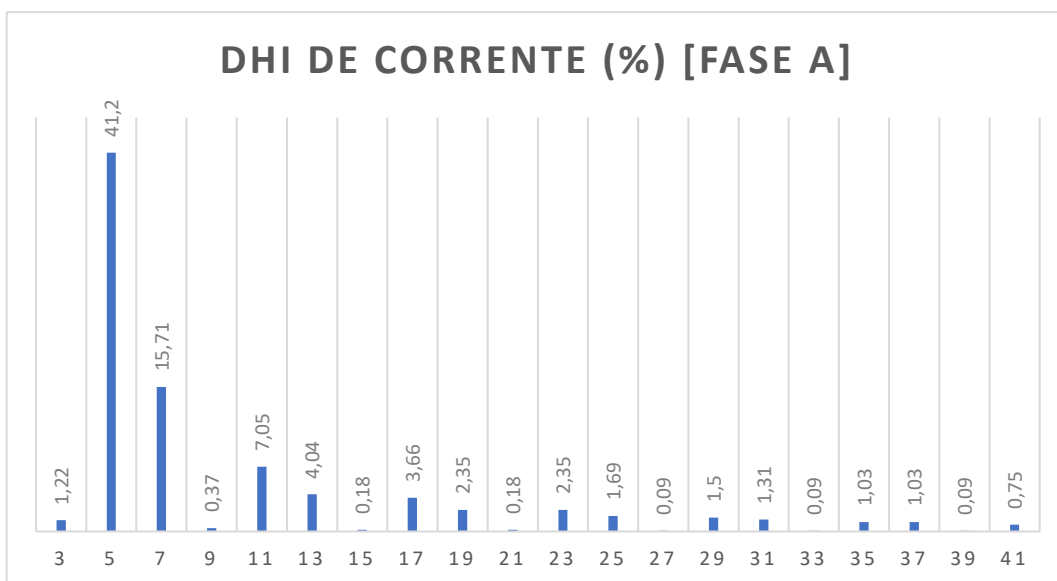
Tabela 18 – Valores mensurados na Fase C no registro de máxima DHT_v

Registro			RMS (V)		
Fundamental (Hz)			DHT (%)		
IMPAR	RMS(V)	%FUND	PAR	RMS(V)	%FUND
1	219,080	100,00	2	0,611	0,27
3	1,059	0,48	4	0,577	0,26
5	10,921	4,98	6	0,597	0,27
7	6,122	2,79	8	0,590	0,26
9	0,651	0,29	10	0,604	0,27
11	5,084	2,32	12	0,604	0,27
13	2,966	1,35	14	0,618	0,28
15	0,767	0,35	16	0,645	0,29
17	3,787	1,72	18	0,645	0,29
19	2,789	1,27	20	0,706	0,32
21	0,848	0,38	22	0,679	0,30
23	3,251	1,48	24	0,679	0,30
25	2,328	1,06	26	0,713	0,32
27	0,903	0,41	28	0,692	0,31
29	2,362	1,07	30	0,692	0,31
31	2,016	0,92	32	0,706	0,32
33	0,964	0,43	34	0,706	0,32
35	1,982	0,90	36	0,733	0,33
37	1,629	0,74	38	0,760	0,34
39	0,930	0,42	40	0,760	0,34
41	1,819	0,83	42	0	0

Fonte: Adaptado de Software ANL7000 (2021).

Já as Figuras 52, 53 e 54, semelhante às anteriores, ilustram o valor eficaz da corrente presente em cada ordem harmônica em relação à onda fundamental no registro de máximo DHT_i através de histogramas. Também são apresentados os valores correspondentes à cada harmônica de corrente, da ordem fundamental até à 41ª ordem, nas Tabelas 19, 20 e 21.

Figura 52 – Histograma das DHI de corrente na Fase A no registro de máxima DHTi



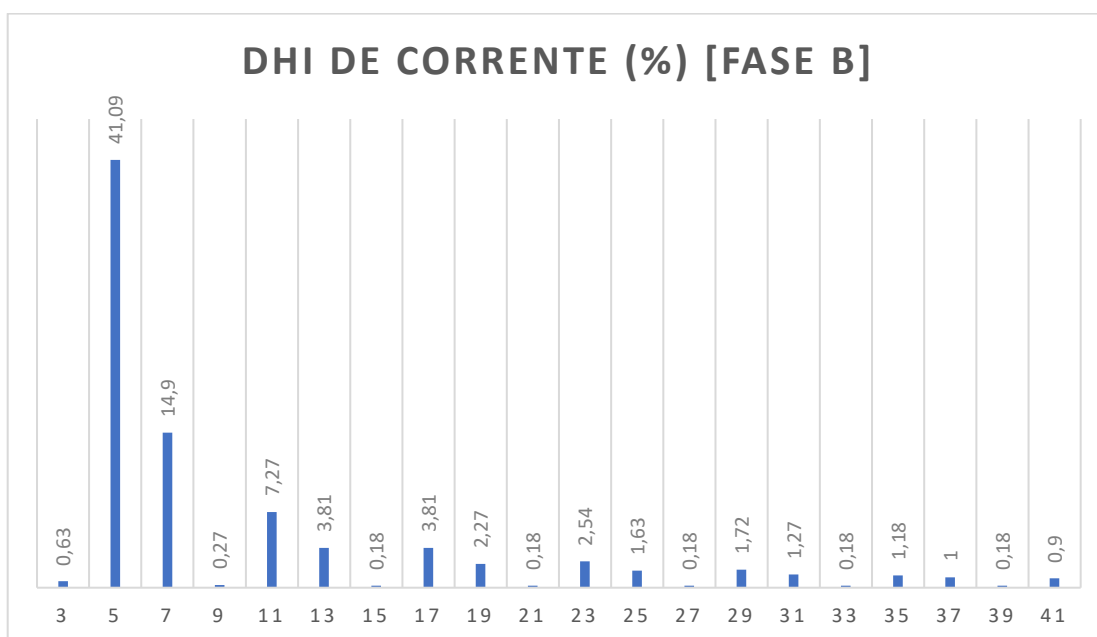
Fonte: Gerado pelo autor através do software ANL7000 (2021).

Tabela 19 – Valores mensurados na Fase A no registro de máxima DHTi

Registro		926	RMS (A)		119,211
Fundamental (Hz)		60,0	DHT (%)		45,33
IMPAR	RMS(A)	%FUND	PAR	RMS(A)	%FUND
1	108,607	100,00	2	1,022	0,94
3	1,328	1,22	4	0,306	0,28
5	44,750	41,20	6	0,306	0,28
7	17,062	15,71	8	0,409	0,37
9	0,409	0,37	10	0,102	0,09
11	7,663	7,05	12	0,102	0,09
13	4,393	4,04	14	0,306	0,28
15	0,204	0,18	16	0,102	0,09
17	3,985	3,66	18	0,102	0,09
19	2,554	2,35	20	0,204	0,18
21	0,204	0,18	22	0,204	0,18
23	2,554	2,35	24	0,102	0,09
25	1,839	1,69	26	0,204	0,18
27	0,102	0,09	28	0,204	0,18
29	1,635	1,50	30	0,102	0,09
31	1,430	1,31	32	0,102	0,09
33	0,102	0,09	34	0,102	0,09
35	1,124	1,03	36	0,102	0,09
37	1,124	1,03	38	0,102	0,09
39	0,102	0,09	40	0,102	0,09
41	0,817	0,75	42	0	0

Fonte: Adaptado de Software ANL7000 (2021).

Figura 53 – Histograma das DHI de corrente na Fase B no registro de máxima DHTi



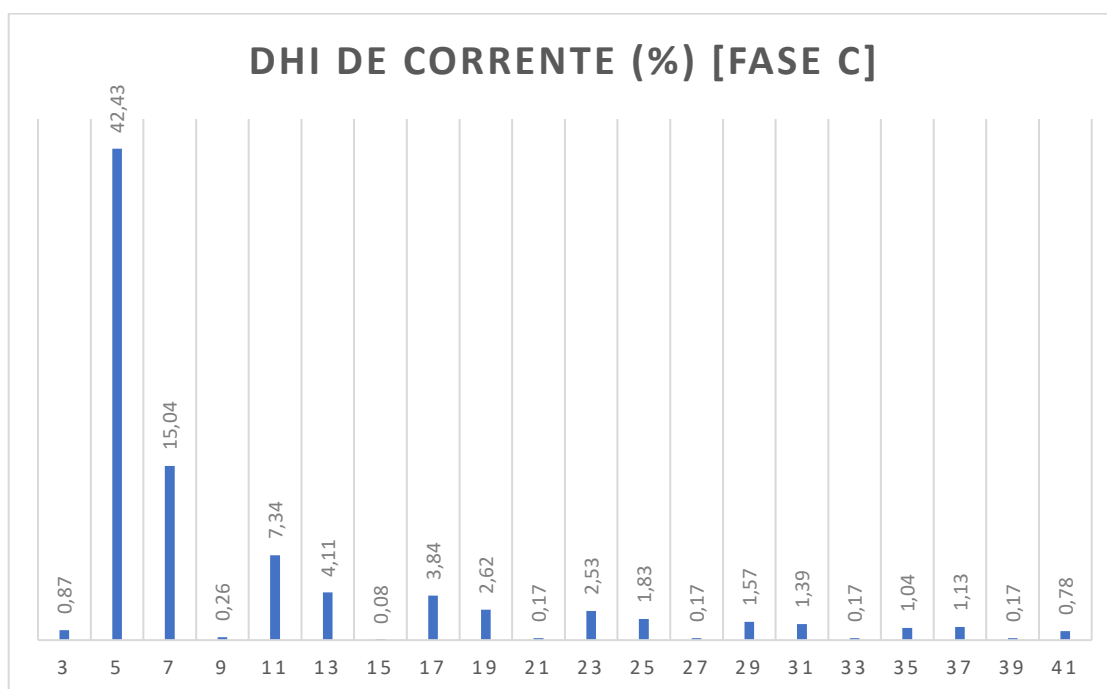
Fonte: Gerado pelo autor através do software ANL7000 (2021).

Tabela 20 – Valores mensurados na Fase B no registro de máxima DHTi

Registro		926	RMS (A)		123,152
Fundamental (Hz)		60,0	DHT (%)		44,97
IMP	PAR	RMS(A)	%FUND	RMS(A)	%FUND
1	2	112,342	100,00	1,021	0,90
3	4	0,715	0,63	0,306	0,27
5	6	46,162	41,09	0,306	0,27
7	8	16,749	14,90	0,408	0,36
9	10	0,306	0,27	0,204	0,18
11	12	8,170	7,27	0,102	0,09
13	14	4,289	3,81	0,306	0,27
15	16	0,204	0,18	0,204	0,18
17	18	4,289	3,81	0,102	0,09
19	20	2,553	2,27	0,306	0,27
21	22	0,204	0,18	0,204	0,18
23	24	2,860	2,54	0,102	0,09
25	26	1,838	1,63	0,204	0,18
27	28	0,204	0,18	0,204	0,18
29	30	1,940	1,72	0,204	0,18
31	32	1,430	1,27	0,204	0,18
33	34	0,204	0,18	0,204	0,18
35	36	1,328	1,18	0,204	0,18
37	38	1,123	1,00	0,204	0,18
39	40	0,204	0,18	0,204	0,18
41	42	1,021	0,90	0	0

Fonte: Adaptado de Software ANL7000 (2021).

Figura 54 – Histograma das DHI de corrente na Fase C no registro de máxima DHTi



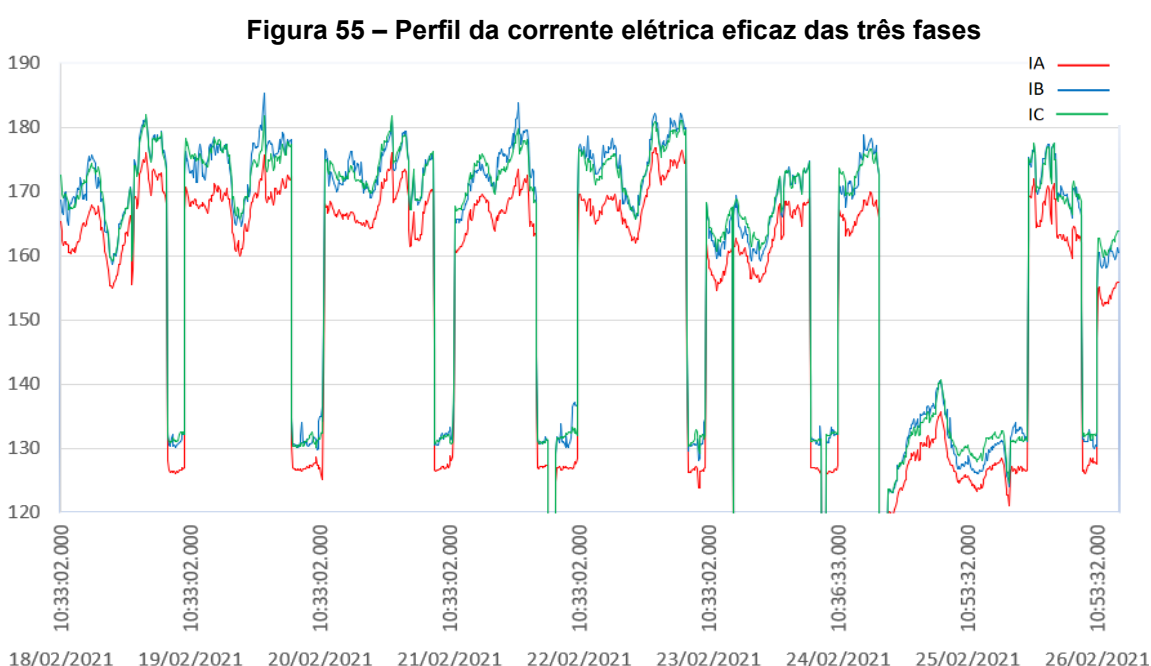
Fonte: Gerado pelo autor através do software ANL7000 (2021).

Tabela 21 – Valores mensurados na Fase C no registro de máxima DHTi

Registro		940	RMS (A)		128,621
Fundamental (Hz)		60,0	DHT (%)		46,32
IMPAR	RMS(A)	%FUND	PAR	RMS(A)	%FUND
1	116,738	100,00	2	1,123	0,96
3	1,021	0,87	4	0,306	0,26
5	49,534	42,43	6	0,306	0,26
7	17,567	15,04	8	0,511	0,43
9	0,306	0,26	10	0,204	0,17
11	8,579	7,34	12	0,102	0,08
13	4,800	4,11	14	0,306	0,26
15	0,102	0,08	16	0,204	0,17
17	4,494	3,84	18	0,102	0,08
19	3,064	2,62	20	0,306	0,26
21	0,204	0,17	22	0,204	0,17
23	2,962	2,53	24	0,102	0,08
25	2,145	1,83	26	0,204	0,17
27	0,204	0,17	28	0,204	0,17
29	1,838	1,57	30	0,102	0,08
31	1,634	1,39	32	0,204	0,17
33	0,204	0,17	34	0,204	0,17
35	1,225	1,04	36	0,102	0,08
37	1,328	1,13	38	0,204	0,17
39	0,204	0,17	40	0,204	0,17
41	0,919	0,78	42	0	0

Fonte: Adaptado de Software ANL7000 (2021).

Na Figura 55, verifica-se o perfil da corrente elétrica eficaz ao longo do período o qual o analisador encontrava-se instalado. As maiores variações ocorrem devido ao acionamento de um ou dois conjuntos motobomba, pois representam a maior parcela da carga instalada nesta unidade consumidora. As menores variações justificam-se devido ao controle escalar da velocidade do motor, através do inversor de frequência, onde os valores da tensão (V) e frequência (f), que são entregues ao motor, devem satisfazer uma relação (V/f) a qual varia de forma controlada nas aplicações de torque variável, como no caso do controle de vazão em motobombas centrífugas (MELO, 2004).



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Como tratado no item 2.2.3 sobre o impacto causado por conversores trifásicos no espectro harmônico, é de suma importância realizar uma análise específica para os inversores de frequência presentes na instalação. Através do estudo realizado por Y. Guignard disponibilizado pela Schneider Toshiba Inverter Europe SAS (2015), é possível realizar uma comparação do conteúdo harmônico mensurado com os valores simulados.

Para elaboração da Tabela 22, utilizam-se os dados presentes na Tabela 11 como valores de referência. Consideram-se os índices de máxima distorção harmônica de corrente mensurados para cada ordem, e que o inversor de frequência opera com funcionamento de 80% de sua capacidade de carga.

Tabela 22 – Análise harmônica entre o inversor ATV630D90N4 com as Fases A, B e C

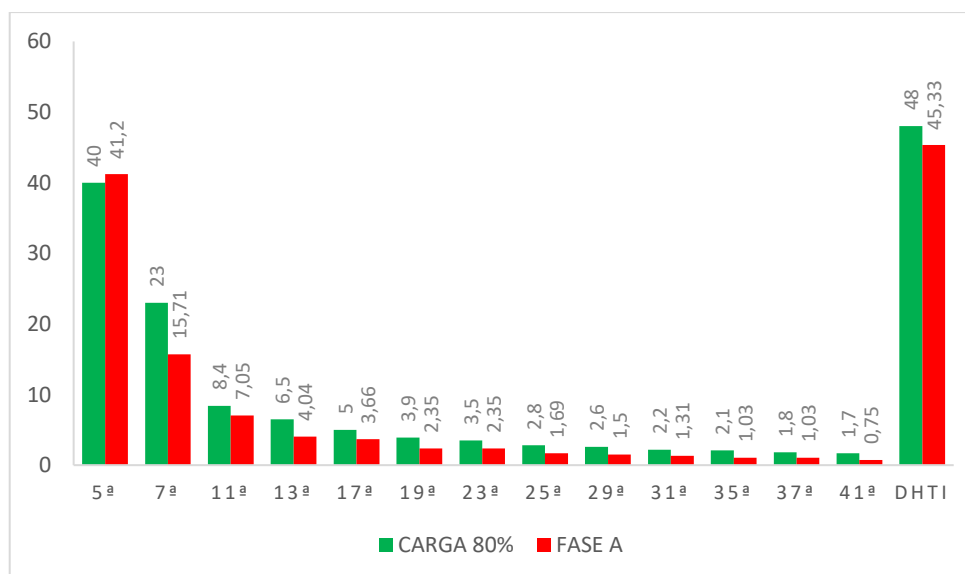
Ordem Harmônica	DHli (%)				
	ATVD90N4 100% de carga	ATVD90N4 80% de carga	Fase A	Fase B	Fase C
5 ^a	35	40	41,2	41,09	42,43
7 ^a	19	23	15,71	14,91	15,05
11 ^a	8,5	8,4	7,05	7,27	7,35
13 ^a	6,2	6,5	4,05	3,82	4,11
17 ^a	5	5	3,67	3,82	3,85
19 ^a	3,9	3,9	2,35	2,27	2,62
23 ^a	3,5	3,5	2,35	2,55	2,54
25 ^a	2,8	2,8	1,69	1,64	1,84
29 ^a	2,6	2,6	1,51	1,73	1,57
31 ^a	2,2	2,2	1,32	1,27	1,4
35 ^a	2	2,1	1,03	1,18	1,05
37 ^a	1,8	1,8	1,03	1	1,14
41 ^a	1,6	1,7	0,75	0,91	0,79
DHTi	42,3	48,0	45,33	44,97	46,32
Corrente de entrada (A)	156,2	128,2	119,2*	123,5*	128,6*

* Os valores de corrente mensurados nas fases A, B e C são do ponto de acoplamento do instrumento de medição e não na alimentação do inversor de frequência, entretanto, os CMB representam a grande parcela do consumo desta unidade consumidora.

Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

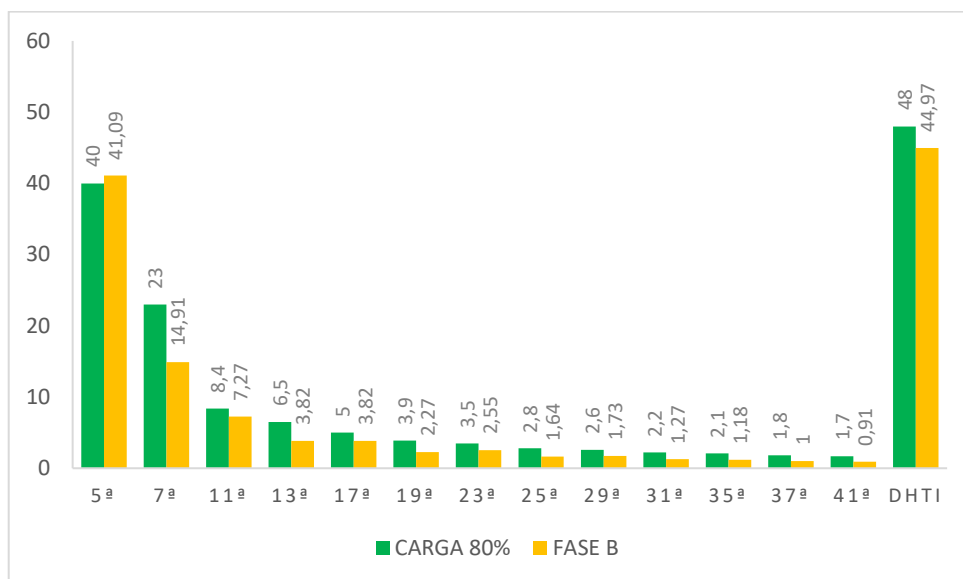
Constata-se que os valores de distorção harmônica de corrente possuem relação direta com o inversor de frequência ATV630D90N4. Destaca-se também a alta amplitude das harmônicas da 5^a e 7^a ordem, afetando diretamente o espectro harmônico no PAC, onde está localizado o analisador de energia elétrica.

Figura 56 – Análise da DHli e da DHTi entre o inversor ATV630D90N4 em 80% de carga e a Fase A



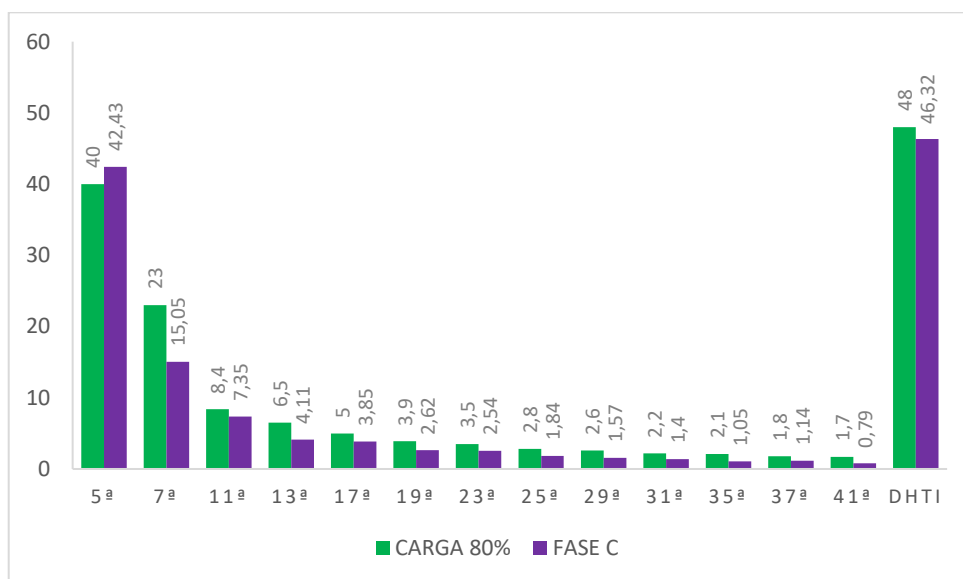
Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Figura 57 – Análise da DHli e da DHTi entre o inversor ATV630D90N4 em 80% de carga e a Fase B



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Figura 58 – Análise da DHli e da DHTi entre o inversor ATV630D90N4 em 80% de carga e a Fase C



Fonte: Gerado pelo autor a partir dos resultados das medições (2021).

Além do estudo de harmônicas, o analisador de energia RE7000 oferta ao usuário outras informações relevantes para análise de QEE, por exemplo, a variação de frequência. Esta, por sua vez, é um indicativo dos valores máximos e mínimos de frequência de operação ofertados pela concessionária de energia elétrica local. Segundo a ANEEL (2020), este indicativo deve operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz em condições normais de operação e em regime

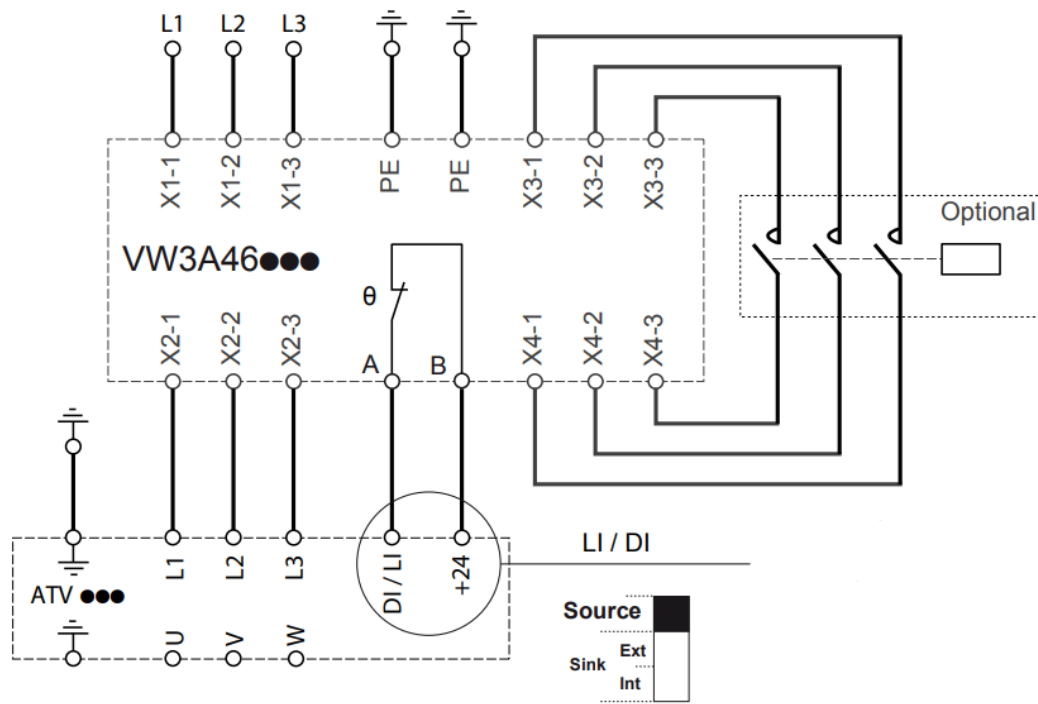
permanente e, quando há ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, a frequência deve retornar, no intervalo de tempo de 30 (trinta) segundos, após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz. Analisando os registros obtidos no intervalo de medição deste estudo, é visto que o menor registro encontrado foi de 59,92 Hz no dia 19 de fevereiro de 2021 às 23:23:02 e o maior registro encontrado foi de 60,06 Hz no dia 18 de fevereiro de 2021 às 17:03:02, ambos dentro dos limites previstos.

6 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos no presente estudo, é possível identificar que a distorção harmônica total nas tensões das Fases A, B e C possuem índices de 7,36%, de 7,14% e de 7,42%, respectivamente. Estes percentuais estão em conformidade com os limites previstos no Módulo 8 da PRODIST (inferior à 10,0%). Observando os índices individuais de tensão para as ordens harmônicas pares, ímpares não-múltiplas de três e ímpares múltiplas de três, verifica-se que, para os três casos, os percentuais também estão em conformidade com a regulamentação da ANEEL. Entretanto, a distorção harmônica individual de tensão para ordens ímpares não-múltiplas de três apresentou valores bem próximos aos limites estabelecidos na normativa da PRODIST, devendo ser realizado uma nova análise harmônica caso haja alguma alteração, adição ou remoção de carga da unidade em questão, de forma a verificar se o percentual manteve-se abaixo do limite.

Ademais, considera-se elevado o valor da distorção harmônica de corrente da 5ª ordem, quando comparado ao conteúdo harmônico previsto na documentação dos inversores ATV630D90N4 da Schneider (Tabela 22). Desta forma, é visto a necessidade da inserção de um filtro passivo na alimentação de cada inversor, conforme o diagrama apresentado na Figura 59. O manual da linha ATV630 da Schneider Electric (2021), para tensão de alimentação trifásica de 380 V e frequência de 60 Hz) indica os filtros passivos de referências VW3A46151 e VW3A46170 (nomenclaturas presentes no manual do ATV630) para obter uma DHTi inferior à 10% e à 5%, respectivamente.

Figura 59 – Esquema recomendado



Fonte: Schneider Electric (2021).

Figura 60 –Filtro passivo VW3A46***



Fonte: Schneider Electric (2021).

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a conclusão deste projeto de diplomação, verifica-se que existem questões intrínsecas a serem estudadas de forma mais profunda. O foco deste estudo é dado sobre o tema das distorções harmônicas presentes nas ondas de tensão e de corrente em um SEP, entretanto, existem outros assuntos a serem analisados com maior cautela, detalhados nos tópicos a seguir:

- Dar continuidade ao estudo com ênfase nas demais variáveis presentes no PRODIST, como fator de potência, desequilíbrio de tensão, variação de frequência e flutuação de tensão;
- Realizar uma análise peculiar na entrada de cada inversor de frequência presente na unidade, de forma a obter dados com maior fidedignidade e confirmar se os índices dispostos na Tabela 22 possuem relação apenas com o inversor em funcionamento durante a medição;
- Realizar a modelagem e planejamento de filtros para mitigar o problema de distorções harmônicas;
- Considerar os possíveis erros de medição para obter maior exatidão nos resultados adquiridos.

REFERÊNCIAS

- [1] DUGAN, R.C., M.F McGranaghan, H.W. Beaty. **Electric Power Systems Quality**, McGraw- Hill, New York, 1996.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Revisão 12. Resolução Normativa nº 863/2019 e Resolução Normativa nº 871/2020.
- [3] ISONI, Marcos. **Distorções harmônicas: uma revisão de conceitos gerais**. A moderna efficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas. São Paulo, 2005.
- [4] LATHI, B. P.. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- [5] FAGUNDES, Saimon M., **Efeito da Qualidade de Energia no Funcionamento de Relés de Proteção de Sobrecorrente em Subestações**. FURB. Blumenau: 2011
- [6] ROLIM, M. E. **Análise da Qualidade de Energia Elétrica: Distorções Harmônicas em uma Planta Industrial – Estudo de Caso em uma Indústria de Biodiesel**. Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015.
- [7] SENRA, R.. **Energia Elétrica: Medição, Qualidade e Eficiência**. 1. ed. São Paulo: Baraúna, 2013.
- [8] FERNANDES, Ricardo A. S.; SILVA, Ivan N. da; OLESKOVICZ, Mário. **Identificação de Cargas Lineares e Não-Lineares em Sistemas Elétricos Residenciais Usando Técnicas para Seleção de Atributos e Redes Neurais Artificiais**. Revista Controle & Automação, São Carlos, v. 21, n. 4, p. 389-405, ago. 2010.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15014. Conversor a semicondutor - Sistema de alimentação, com saída em corrente alternada (Nobreak) – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [10] DIAS, Guilherme A.D. **Harmônicas em sistemas industriais** – 2ed.

EDIPUCRS, 2002. Disponível em:
https://books.google.com.br/books?id=tdq_dQPWZqIC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false

[11] SOARES, D., SIMONETTI, D. S. L. **Análise harmônica e inter-harmônica de um Forno Elétrico a Arco**, 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010, Sao Paulo, Brazil, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDUSCON.2010.5739910.

[12] MERRIKHI, J.; MOGHANI, J. S.; FALLAH, E. **Modeling Flux Skin Effect on the Harmonic Currents of TCR**. International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2nd. (ICPESA 2006). Hong Kong, 2006.

[13] RODRIGUES, J. E. **Interferência de Harmônicas em equipamentos de Medição de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356. Transformador de Potência: Generalidades**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

[15] MORAIS, Ernande Eugenio Campelo. **Estudo e Projeto de Filtros Passivos para Atenuação de Harmônicos em Instalações Elétricas Industriais**. 137 f. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

[16] RIBEIRO, Enio Roberto. **Filtros Ativos Série para a Compensação de Harmônicas de Tensão**. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

[17] EMBRASUL. **Analizador de Energia RE7000: Manual de Instalação e Operação**, 2013.

[18] EMBRASUL. **Software de Análise de Dados ANL7000, Manual de Operação**, 2012.

[19] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Módulo 5 – Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Revisão 6. Resolução

Normativa nº 863/2019 e Resolução Normativa nº 888/2020.

[20] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Revisão 12. Resolução Normativa nº 664/2015.

[21] NETO, A. F. **Filtros Ativos Paralelos Aplicados a Sistemas Elétricos Trifásicos a Quatro Fios**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina – PR, 2009.

[22] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. Standard 519-1992. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, IEEE, New York, NY, 1993.

[23] PREFEITURA DE ITAJAÍ. Plano Municipal de Saneamento Básico de Itajaí - SC: Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário. **Diagnóstico**. 2012. Elaborado por HABITARK Engenharia Ltda - CREA/SC 062919-0. Disponível em:

<http://www.semasaitajai.com.br/upload/documentos/planoSaneamentoDiagnostico.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.

[24] BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto**. Brasília: SNIS, 2019.

[25] WEG. **W22 Super Premium**. Motor de Indução Trifásico. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h47/hc7/WEG-w22-super-premium-motor-de-inducao-trifasico-50041203-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2021.

[26] SCHNEIDER ELECTRIC. **Inversores de frequência Altivar Process ATV600**. Catálogo. 2019. Disponível em: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=ATV600_Catalog_PT_DIA2ED2140502PT_2019-03.pdf&p_Doc_Ref=DIA2ED2140502PT. Acesso em: 30 mar. 2021.

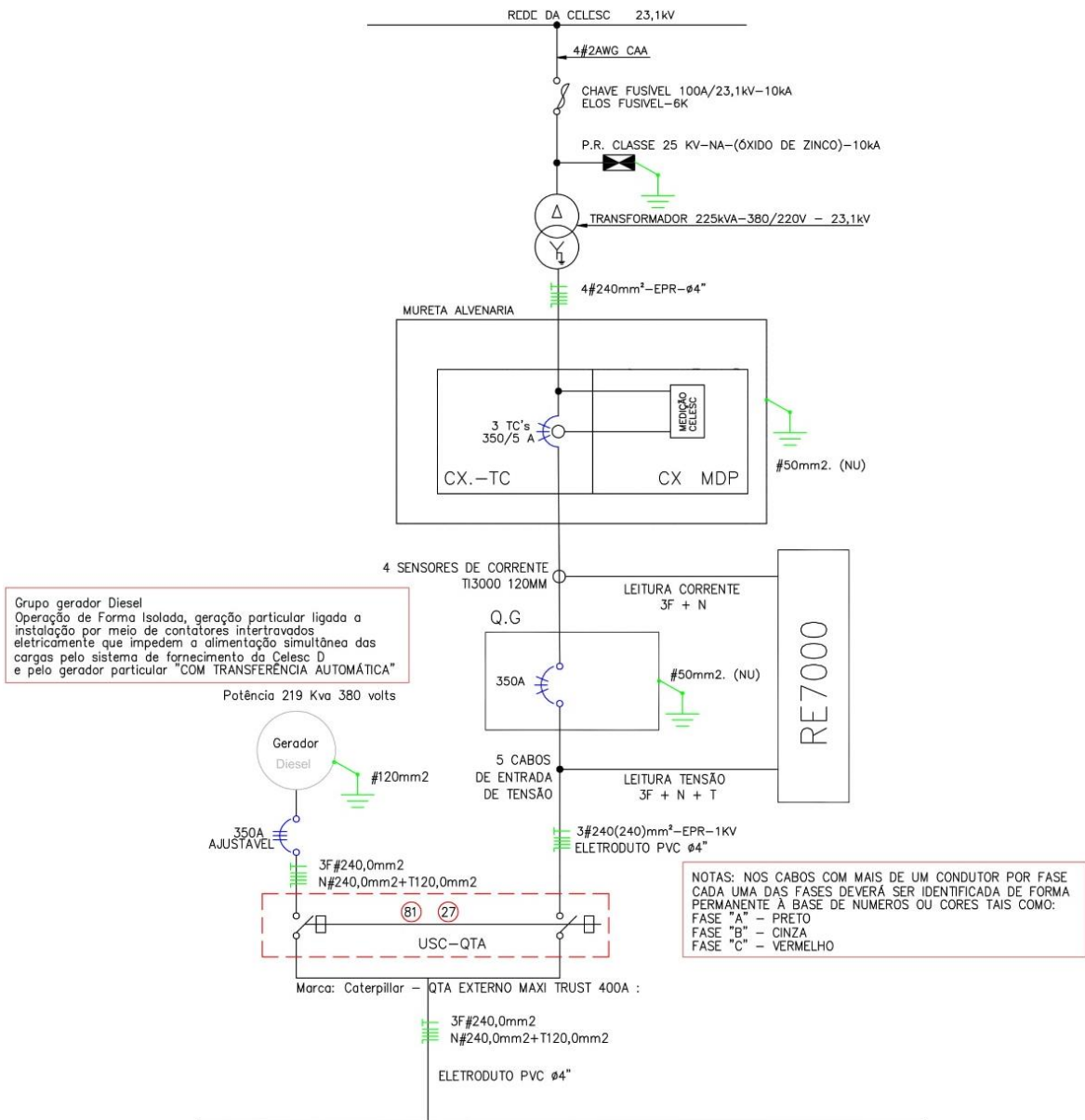
[27] STIE – SCHNEIDER TOSHIBA INVERTER EUROPE SAS. **Altivar Process**

ATV630/930/650/950 Harmonics. Where i can find Harmonics (THDi) for ATV630. 2015. Publicado por Y. Guignard. Disponível em: <https://www.se.com/in/en/faqs/FA386045/>. Acesso em: 30 mar. 2021.

[28] MELO, Rinaldo Oliveira de. **Condicionamento de Potência de uma Motobomba em um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico através de um Conversor de Frequência.** 82 f. Curso de Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Energéticas e Nucleares, Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

[29] SCHNEIDER ELECTRIC. **Altivar VW3A46101 ... A46176:** instruction sheet - atv passive filters. Instruction sheet - ATV passive filters. 2021. Disponível em: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Instruction+sheet&p_File_Name=ATV_IS_passive_filters_EAV38321_01.pdf&p_Doc_Ref=EAV38321. Acesso em: 23 mar. 2021.

ANEXO I – DIAGRAMA UNIFILAR ERAT CENTRO



QUADRO CARGAS								
CIRCUITO	DESCRIÇÃO	POTÊNCIA (W)	POTÊNCIA (kW)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	CABOS (mm²)	FASE	DISJUNTOR
C1	ILUMINAÇÃO	1.500	1,50	220,00	6,81	1,50	R	10A
C2	MOTOR 100CV	73.600	73,6	380,00	121,6	95,0	RST	175A
C3	MOTOR 100CV	73.600	73,6	380,00	121,6	95,0	RST	175A
C4	AR COND.	5.200	5,20	220,00	23,63	6,0	T	32A
C5	AR COND.	5.200	5,20	220,00	23,63	6,0	R	32A
C6	AR COND.	5.200	5,20	220,00	23,63	6,0	S	32A
TOTAL		164.300	164,30	380	-	240	RST	350A

CALCULO DEMANDA		
POTÊNCIA INSTALADA ATUAL (KW)	=	164,3
POTÊNCIA A INSTALAR (KW)	=	-
POTÊNCIA TOTAL (KW)	=	164,3
FATOR DEMANDA (%)	=	0,80
DEMANDA (KW)	=	131,2
FATOR DE POTENCIA	=	0,92
TOTAL DEMANDA ATUAL (KVA)	=	142,6