

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
SISTEMAS DE CONTROLE E ELETRICIDADE DE NAVIOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DO NAVIO PATRULHA
GURUPI



1ºTen FABIO ALVES DE ALMEIDA
Rio de Janeiro
2023

1ºTen FABIO ALVES DE ALMEIDA

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DO NAVIO PATRULHA
GURUPI

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Controle e Eletricidade de Navios.

Orientadores:

D. Sc. Murilo Eduardo Casteroba Bento

D. Sc. Robson Francisco da Silva Dias

Eng. Me. Ulisses Anastácio de Oliveira

CIAA
Rio de Janeiro
2023

FOLHA DE APROVAÇÃO

1ºTen FABIO ALVES DE ALMEIDA

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DO NAVIO PATRULHA GURUPI

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Controle e Eletricidade de Navios.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Murilo Eduardo Casteroba Bento, D. Sc – UFRJ 

Robson Francisco da Silva Dias, D. Sc – UFRJ 

Eng. Me. Ulisses Anastácio de Oliveira _____

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Deus, e a todas as pessoas, que, de alguma forma, colaboraram para que este trabalho fosse concluído. A começar por meus orientadores, Professores Murilo Eduardo Casteroba Bento e Robson Francisco Dias, cujas orientações, sugestões e disponibilidade fizeram com que o trabalho fosse direcionado corretamente.

À UFRJ, aqui representada pelo Professor Robson, pela disponibilização dos medidores utilizados neste trabalho. Adicionalmente, gostaria de agradecer também ao Professor Cesar e ao Capitão-Tenente Silva Martins, por todo apoio e ajuda, quando as primeiras ideias deste trabalho começaram a surgir.

À tripulação do Navio Patrulha e, em especiais, aos 1ºTen Espírito, 2ºTen Silva Queiroz e 3ºSG-EL Sgambato pelo apoio na instalação dos equipamentos e na busca de informações e documentos. Obrigado pela dedicação que tiveram ao longo de todo o período em que trabalhamos e convivemos na Divisão de Máquinas do Navio Patrulha Gurupi.

À minha esposa, Jessica, por sua paciência, pelas ideias contribuídas, pelo apoio e sacrifício.

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DO NAVIO PATRULHA GURUPI

Resumo

A qualidade da energia em navios da Marinha do Brasil é necessária para otimizar o desempenho operacional e a gestão de equipamentos e sistemas embarcados. Este estudo focou na avaliação da qualidade da energia do Navio Patrulha Gurupi, utilizando uma análise qualitativa e quantitativa de problemas de qualidade e parâmetros elétricos, incluindo tensão, corrente, frequência, fator de potência e distorções harmônicas, tanto em estado atracado quanto em operação marítima. O estudo foi fundamentado na norma Engenalmarinst 30-08A e explorou a especificidade do sistema de geração e distribuição do navio para entender a manifestação de fenômenos elétricos no contexto militar-naval. A metodologia de coleta e análise de dados foi adaptada, utilizando um medidor FLUKE 435-II, e limitada a dois geradores devido à disponibilidade do navio e outros fatores. Os dados foram analisados com softwares especializados e apresentados graficamente para facilitar a comparação com os limites normativos. Os resultados indicaram que alguns parâmetros de análise da qualidade da energia, durante transitórios, não estava dentro dos padrões normativos. Dessa forma, identificou-se a necessidade de coletas adicionais e análise das harmônicas individuais de corrente para uma avaliação mais completa.

Palavras- chave: Qualidade de energia. Navio Patrulha Gurupi. Engenalmarinst 30-08A. Distorção Harmônica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento de uma descarga atmosférica	27
Figura 2 – Efeito de um transiente oscilatório devido ao chaveamento de um banco de capacitores	28
Figura 3 – Forma de onda com efeito "BROWNOUT"	31
Figura 4 – Flutuação de tensão típica devido ao uso forno a arco	33
Figura 5 – Tensões de linha em desequilíbrio	35
Figura 6 – Tensão alternada senoidal com presença de ruído	36
Figura 7 – "Notching"	37
Figura 8 – Triângulo de potências	40
Figura 9 – Circuito do Conversor buck-boost simulado no PSCAD	43
Figura 10 – Gráfico do Conversor buck-boost simulado no PSCAD	44
Figura 11 – Harmônicos na tensão de saída de um conversor CC "Buck-Boost"	44
Figura 12 – Ciclo de histerese e a variação do fluxo magnético em relação a corrente em uma bobina	45
Figura 13 – Medição de circuitos monofásicos e trifásicos pela norma IEC 61000 3-2	53
Figura 14 – O Navio Patrulha Gurupi atracado no cais da portuguesa	58
Figura 15 – Conjunto Motor-Gerador	59
Figura 16 – Quadro Elétrico Principal	60
Figura 17 – Quadro Elétrico Auxiliar	60
Figura 18 – Equipamentos alimentados seção de distribuição "A" do QEP	62
Figura 19 – Equipamentos alimentados seção de distribuição "B" do QEP	63
Figura 20 – Equipamentos alimentados seção de distribuição "C" do QEP	63
Figura 21 – Equipamentos alimentados seção de distribuição "A" do QEA	64
Figura 22 – Equipamentos alimentados seção de distribuição "B" do QEA	64
Figura 23 – Analisador de qualidade de energia Fluke 435 série II	70
Figura 24 – Local de instalação do analisador de qualidade de energia	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Problemas que afetam a qualidade de energia	26
Tabela 4.1 – Dados de placa do gerador AVK	59
Tabela 4.2 – Demanda de carga de projeto do navio	66
Tabela 4.3 – Demanda de carga atual do navio	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Nível máximo das tensões em V no período	74
Gráfico 2 – Nível mínimo das tensões em V no período	75
Gráfico 3 – Nível máximo das correntes de pico no período.....	75
Gráfico 4 – Nível mínimo das correntes de pico no período.....	76
Gráfico 5 – Variação de frequência no período	77
Gráfico 6 – Nível máximo de DHT_V no período	77
Gráfico 7 – Nível máximo de DHT_I no período	78
Gráfico 8 – Nível máximo de DHT_V da 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a harmônica no período	79
Gráfico 9 – Nível máximo de DHT_I da 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a harmônica no período no período	79
Gráfico 10 – Nível máximo e mínimo das tensões em V no período	80
Gráfico 11 – Nível máximo e mínimo das correntes de pico no período	81
Gráfico 12 – Variação de frequência no período	82
Gráfico 13 – FP durante o período do gerador 1.....	83
Gráfico 14 – Histograma do FP durante o período do gerador 1	83
Gráfico 15 – Nível máximo de DHT_V no período	83
Gráfico 16 – Nível máximo de DHT_I no período	84
Gráfico 17 – Nível máximo de DHT_V da 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a harmônica no período	85
Gráfico 18 – Nível máximo de DHT_I da 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a harmônica no período no período	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Características e limites para alimentação “Tipo I”	52
Quadro 3.1 – Limites máximo de tensão harmônica individual e total	55
Quadro 3.2 – Limites para DHI_I em % para sistemas de 120 a 69KV.....	55
Quadro 4.1 – Condições de operação dos principais equipamentos	67
Quadro 4.2 – Principais problemas de QEE observados a bordo	68
Quadro 4.3 – Informações e dados coletados durante os períodos de medição	72

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMRJ	Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	A ré; termo náutico para designar parte traseira de um navio
AV	A vante; termo náutico para designar parte dianteira de um navio
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
BEI	Bomba de Esgoto e Incêndio
CA	Corrente Alternada
CAP	Compressor de Alta Pressão
CAV	Controle de Avarias
CC	Corrente Contínua
CCM	Centro de Controle de Máquinas
DEN	Diretoria de Engenharia Naval
DHI	Distorção Harmônica Individual
DHT	Distorção Harmônica Total
Excel	Software desenvolvido pela empresa Microsoft para análise e confecção de planilhas
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FP	Fator de Potência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>
IFF	<i>Identification Friend or Foe</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MB	Marinha do Brasil
MCA	Motor de Combustão Auxiliar

MCP	Motor de Combustão Principal
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>
PowerLog	Software de aplicação da empresa Fluke para análise de parâmetros medidos em seus equipamentos
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSCAD	Software para modelagem, simulação e análise de sistemas de potência
QEE	Qualidade de energia elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTAS	Unidade de Tratamento de Águas Servidas

LISTAS DE SÍMBOLOS

A	Ampére
φ	Ângulo de fase
Δ	Delta, triângulo
Y	Estrela
Hz	Hertz
k	Kilo
m	Metro
”	Polegadas
rpm	Rotações por minuto
t	Toneladas
pu	Valor por unidade
V	Volt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Apresentação do Problema	16
1.2 Justificativa e Relevância	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo geral	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Metodologia do Trabalho	18
1.4.1 Quanto aos fins	18
1.4.2 Quanto aos meios	18
1.4.3 Quanto as limitações do conteúdo	19
1.4.4 Técnicas de pesquisa utilizadas	19
1.5 Etapas do Trabalho	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 Definições e problemas que afetam a QEE	23
2.1.1 Transitórios ou transientes	26
2.1.2 Variações de tensão de curta duração (VTCD)	28
2.1.3 Variações de tensão em estado permanente (VTLD)	30
2.1.4 Interrupções	32
2.1.5 Flutuações de tensão	33
2.1.6 Desequilíbrio de tensão	34
2.1.7 Ruídos ou Noise	36
2.1.8 Notching	37
2.1.9 Deformações de frequência	38
2.1.10 Conceito sobre Fator de Potência	39
2.1.11 Harmônicas	40
2.1.11.1 Harmônicas – Causas e Efeitos	42
2.1.11.2 Parâmetros mais importantes de medição das harmônicas	46
2.1.11.3 Soluções para as harmônicas	48
3 NORMAS REGULAMENTARES RELACIONADAS A QEE	49
3.1 Engenalmarinst N°30-08A	51

3.2 IEC 61000	52
3.3 IEEE Std 519™-2014	54
4 DADOS E PESQUISA DE CAMPO	57
4.1 Carga Analisada: NPa Gurupi	57
4.1.1 Rede de distribuição elétrica do navio	58
4.1.2 Condições de operação e equipamentos de bordo	66
4.2 Processo Metodológico da Medição	69
4.2.1 Considerações iniciais	69
4.2.2 Analisador de qualidade de energia FLUKE 435-II	70
4.2.3 Jornada de medição	71
5 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
5.1 Tratamento de Dados	73
5.2 Primeiro Período de Medições	74
5.2.1 Medição - 25/09/23 a 26/09/23 - Gerador nº 1 (Navio Atracado)	74
5.2.1.1 Níveis de tensão e corrente	74
5.2.1.2 Variação de frequência	77
5.2.1.3 DHT_V e DHT_I	77
5.2.1.4 DHT_V e DHT_I das harmônicas de 3ª e 5ª e 7ª ordem	79
5.2.2 Medição - 27/09/23 a 28/09/23 – Gerador nº 1 (Navio Atracado)	80
5.2.2.1 Níveis de tensão e corrente	80
5.2.2.2 Variação de frequência	81
5.2.2.3 Fator de Potência	82
5.2.2.4 DHT_V e DHT_I	83
5.2.2.5 DHT_V e DHT_I das harmônicas de 3ª e 5ª e 7ª ordem	85
6 CONCLUSÃO	86
6.1 Considerações Finais	86
6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos	88
REFERÊNCIAS	89
ANEXO A	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Problema

A Qualidade de Energia (QEE) é um conceito fundamental na engenharia elétrica, abordando a análise e mitigação de distúrbios elétricos que podem afetar a operação confiável de sistemas elétricos. Nas últimas décadas, a crescente aplicação desse conceito tem encontrado terreno fértil na área naval, abrangendo vários tipos e classes de meios navais, inclusive no âmbito militar. Esse enfoque é guiado não apenas pela redução dos custos operacionais, mas também pelo compromisso em aprimorar os aspectos ambientais, alinhando-se às tendências globais de sustentabilidade (MOURA, 2011).

A QEE influencia diretamente a eficiência dos sistemas de propulsão e motores nas embarcações. Distúrbios elétricos e flutuações de energia podem levar a perdas energéticas significativas. Uma qualidade de energia estável e consistente otimiza o funcionamento desses sistemas, reduzindo o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de gases poluentes (MOURA, 2011).

A importância de assegurar um fornecimento de energia de alta qualidade em embarcações navais é crucial para evitar perdas prematuras de equipamentos e para prolongar a vida útil dos meios navais. Entretanto, as limitações atuais no processo de diagnóstico da qualidade de energia a bordo dos navios apresentam desafios significativos. A complexidade dos sistemas elétricos marítimos, juntamente com a natureza mutável das cargas e as perturbações elétricas inerentes ao ambiente marítimo, estes fatos dificultam a identificação precisa e o tratamento desses problemas. Nesse contexto, este trabalho defende a utilização de um equipamento analisador de frequência e simulações confiáveis para avaliação da qualidade de energia a bordo do Navio Patrulha Gurupi (NPa Gurupi), acreditando que essa abordagem pode aprimorar a eficiência da embarcação em suas atividades designadas.

No cenário dinâmico da engenharia elétrica, a QEE emergiu como um conceito central, abordando os aspectos de distribuição, geração e utilização de energia elétrica, que vão além da simples disponibilidade de potência. (IEEE 1159-2019, 2019)

1.2 Justificativa e Relevância

A justificativa para assegurar a qualidade de energia nas embarcações navais é incontestável, pois ela se torna um fator crítico para a eficiência e durabilidade do equipamento a bordo, bem como para a própria vida útil do meio naval. A instabilidade elétrica pode resultar em perdas substanciais de equipamentos sensíveis e sistemas críticos, comprometendo a funcionalidade e segurança da embarcação. Além disso, a longevidade operacional da esquadra naval é afetada diretamente pela qualidade do suprimento elétrico, pois distúrbios recorrentes podem acelerar o desgaste e falha prematura de componentes, levando a reparos onerosos e interrupções indesejadas.

Outrossim, a consciência do conceito de QEE pode ser visto como um passo na mudança de perspectiva da Marinha do Brasil (MB) no que se refere à gestão da energia de bordo, servindo como um escopo para futuras aquisições e implementações de novas tecnologias disponíveis no mercado, cujas características e funcionalidades contribuirão para a modernização e eficácia dos sistemas de distribuição embarcados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O argumento principal deste estudo reside na proposição de que a utilização do equipamento FLUKE 435 II, através de método e simulações confiáveis para avaliar a qualidade de energia em embarcações, cujo objetivo de resultado da análise é a busca pela eficiência das atividades navais. Ao realizar esta análise, é possível identificar os distúrbios elétricos, prever comportamentos de sistemas sob diferentes cenários e otimizar a alocação de recursos, contribuindo para uma operação mais econômica e eficaz das embarcações.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para ser possível que o objetivo principal seja atingido, é necessário esclarecer os conteúdos envolvidos à QEE encontrados na literatura e demonstrar como seus problemas

podem se manifestar a bordo, visando a contribuir para uma análise mais assertiva das medições realizadas. Para que isto ocorra, torna-se necessário discorrer sobre as normas e a legislação em vigor referentes à QEE, sob a ótica de navios da MB e do IEEEE.

Realizar a medição de grandezas elétricas e parâmetros de QEE encontrados a bordo de um navio da MB, o Navio Patrulha Gurupi, de maneira a permitir uma visão inicial da QEE fornecida pelos geradores disponíveis ao contrapor os resultados obtidos com os limites estabelecidos pelas normas em vigor.

O objetivo deste estudo é, portanto, oferecer uma abordagem sobre o sistema de distribuição de energia e as principais cargas encontradas, no Navio Patrulha Gurupi, culminando em possíveis soluções para avaliar e melhorar a qualidade de energia nesta belonave. Além disso, este estudo visa contribuir para a excelência das operações navais e estabelecer bases sólidas para a aplicação de métodos inovadores na avaliação da qualidade de energia em embarcações.

1.4 Metodologia do Trabalho

A classificação da pesquisa se limita, neste trabalho, quanto aos fins (objetivos) e quanto aos meios (procedimentos e técnicas).

1.4.1 Quanto aos fins

Quanto aos fins, foi realizada a pesquisa exploratória. Esta, versa sobre os conceitos relacionados à QEE nos navios da MB, com o objetivo de elucidar estes conceitos.

1.4.2 Quanto aos meios

Quanto aos meios, foi realizada a pesquisa aplicada, de campo. Para esta forma de pesquisa, utiliza-se uma abordagem em relação aos meios qualitativa-quantitativa, tomando como referência de campo o Navio Patrulha Gurupi.

1.4.3 Quanto as limitações do método

A coleta e análise dos dados obtidos pela campanha de medição se limita a utilização do Diesel gerador auxiliar N°1 (MCA 1) e Diesel gerador auxiliar N°2 (MCA 2), com os equipamentos normalmente sendo operados em duas condições: de porto, no qual o navio conduz a rotina diária, com manutenções de rotina e outras atividades; e no mar, realizando teste de máquinas, que faz parte da jornada de testes do sistema de propulsão e equipamentos de navegação, entre outros equipamentos importantes para a correta operação do navio no mar.

Dessa forma, não foi possível concluir a respeito da totalidade da qualidade energia elétrica do navio, em todas as condições operativas existentes para este meio naval. Pelo fato do meio se encontrar na condição de impossibilitado de manobrar (IM), por um curto período, devido a necessidade de manutenção corretiva em um dos motores do seu sistema de propulsão principal, e também ao fato do seu terceiro gerador, Diesel gerador de emergência (DGE) estar inoperante no período da realização da pesquisa de campo deste trabalho.

1.4.4 Técnicas de pesquisa utilizadas

A monografia foi desenvolvida por meio de análise de referências bibliográficas, em específico, (Chapman, 2013), (Leão, 2014), (Martinho, 2013), (Monteiro, 2018), (Ferreira, 2008), (Alam & Gain, 2014), (Martzloff, 1997), (Deckman & Pomillo, 2010), (Paredes et al, 2017), (Bien e Hanzelka, 2004), (Marz , 2016), (Saito, 2020), (Garcia, 2007), (Pailillo et al, 2013), (Arruda, 2003), (Andery e Helman, 1995) e de (Ireson & Coombs, 1988), artigos, catálogos, normas técnicas, internet e através de pesquisa diretamente no ramo da indústria naval, para compreender metodologias de medição de harmônicos e análise dos dados fornecidos pelos equipamentos para desenvolvimento do estudo de caso realizado no Navio Patrulha Gurupi.

Além disso, foi aplicado como ferramenta de auxílio o programa PSCAD, cujo objetivo foi clarear a apresentação dos conceitos, principalmente, em relação às harmônicas.

No que tange as normas, foi realizada a introdução e o emprego da Engenalmarinst 30-08A, da norma técnica IEEE Std 519™-2014 e do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), utilizadas durante a apresentação dos conceitos de QEE, no intuito de possibilitar uma correlação entre os conceitos teóricos e a realidade. Aplicou-se também a pesquisa documental, realizada a bordo, a partir da consulta a publicações da MB e a outros documentos internos, empregada durante a coleta e análise de dados, consistindo em algumas visitas realizadas ao navio, que se encontrava atracado no Cais da Portuguesa, do ComGptPatNavSE, 1º Distrito Naval, local sede do meio.

Nas visitas previamente agendada com o navio, foi realizada a consulta a livros históricos e de serviço dos equipamentos, cujo objetivo era de correlacionar as características do sistema de distribuição de energia do navio com os aspectos da QEE.

A escolha do meio justificou-se por duas razões: (i) o navio encontra-se disponível ao setor operativo, mesmo que passando por períodos de provas de cais e com a manutenção de seus equipamentos em dia; (ii) navio em que servi a bordo por 4 anos seguidos, onde eu pude observar alguns déficits nas plantas energéticas, o que também pode ser considerada uma oportunidade de observar o comportamento dos parâmetros de tensão, corrente e, principalmente, a existência de harmônicos em sua rede de distribuição.

1.5 Etapas do trabalho

Na seção 1, estarão introduzidos aspectos referentes à problemática e justificativa do tema para a realização do trabalho. Além disso, estarão relacionados os seus objetivos e metodologias, por fins e por meios, utilizada durante a pesquisa e o desenvolvimento.

Na seção 2, serão apresentados os conceitos de QEE encontrados nas referências bibliográficas, também estarão presentes os seus fenômenos, problemas mais comuns e de que forma estes podem se manifestar no ambiente de bordo, com o intuito de oferecer subsídios à pesquisa de campo realizada. Adicionalmente, serão abordados aspectos referentes à legislação e normatização da QEE no âmbito da MB e da IEEE.

A pesquisa de campo será introduzida na seção 3, onde serão apresentados aspectos técnicos do sistema de distribuição de energia do Navio Patrulha Gurupi, as principais cargas existentes e seus possíveis impactos na QEE, considerando a condição de operação a bordo.

Ademais, serão apresentados aspectos relacionados ao período de medições realizado a bordo, sua problemática, grandezas estudadas, metodologia empregada e o instrumento utilizado.

Os resultados obtidos serão relatados e verificados durante a seção 4, onde se tentará compreender o comportamento das grandezas elétricas a bordo e se atendem às normas em vigor. Em síntese, a conclusão do trabalho e o diagnóstico das medições serão realizados na seção 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta monografia dispôs dos princípios empregados em duas análises da qualidade de energia, uma na Fragata Liberal e outra no NDCC Mattoso Maia, a primeira foi realizada pelo 1ºTen Rafael Reis (Cavalcanti, 2021), a segunda pelo 1ºTen Perrut (Perrut, 2022), ambas análises foram apresentadas ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk (CIAW), por ocasião da conclusão do curso de aperfeiçoamento avançado em sistemas de controle e eletricidade em navios, a primeira ocorreu em 2021 e a segunda em 2022. Dessa maneira, foi gerada a oportunidade de empregar, com a mesma linha de pensamento e avaliação, a verificação da qualidade de energia fornecida pelos geradores do Navio Patrulha Gurupi.

É indispensável destacar que as contribuições acadêmicas de Martzloff em 1997 e de Deckman & Pomillo em 2010 exercem um papel importante na elaboração do contexto histórico subjacente ao desenvolvimento deste trabalho. Suas monografias forneceram uma visão panorâmica da trajetória evolutiva da preocupação com a qualidade da energia elétrica, paralela ao progresso notável na eletrônica de potência e no emprego de cargas não-lineares. Esses alicerces teóricos possibilitam uma melhor apreciação dos desafios e oportunidades inerentes ao campo, que é de vital importância não apenas para aplicações industriais e domésticas, mas também para operações críticas em ambientes marítimos, como os de navios de guerra da Marinha do Brasil.

Para a metodologia e terminologia empregadas no trabalho, foi de extrema relevância a incorporação das diretrizes fornecidas pelo padrão IEEE 1159-2019, que foi promulgado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), uma entidade internacional que congrega profissionais da engenharia em uma tentativa de estabelecer uniformidade nos protocolos tecnológicos.

Ao abordar distúrbios elétricos que podem comprometer a qualidade da energia, foram consultadas várias fontes. Com o intuito de aprimorar a análise e fornecer esclarecimentos adicionais sobre questões conceituais complexas, empregou-se o software PSCAD na simulação dessas anomalias elétricas. Esta abordagem proporciona um entendimento mais aprofundado e uma representação mais precisa dessas irregularidades, o que é crucial para garantir a eficácia e a segurança de sistemas de energia em navios militares e mercantes.

No que tange ao embasamento teórico, deve-se ressaltar a significativa contribuição de pesquisadores como Monteiro (2018) e Ferreira (2008), bem como o trabalho de Alam & Gain (2014). Estas fontes aportaram consideráveis insights e conhecimentos que fortaleceram o arcabouço teórico do projeto, sobretudo no que diz respeito a distúrbios elétricos e suas implicações.

No tocante a tópicos especializados, como harmônicos e inter-harmônicos, houve uma exploração minuciosa de várias fontes acadêmicas, incluindo, mas não se limitando aos trabalhos de Paredes et al (2017), o guia de qualidade de energia de Bien e Hanzelka (2004), e o artigo de Marz (2016) que discorre sobre inter-harmônicos. Estes contribuíram substancialmente para a compreensão de cargas lineares e não-lineares, bem como para a interpretação de fenômenos complexos associados a essas cargas.

Questões como variações de curta duração, desequilíbrios de tensão e transitórios foram exploradas com base nos estudos de Saito (2020), Garcia (2007), Pailillo et al (2013) e Arruda (2003). Quanto à flutuação de tensão, o material educacional de pós-graduação de Deckman e Pomillo (2020) serviu como uma referência acadêmica valiosa.

Em relação aos preceitos de confiabilidade, as teorias de Andery e Helman (1995) e de Ireson & Coombs (1988) foram consultadas. Ambas convergem na importância da operação sem falhas e da adequação às demandas, princípios que são aplicáveis tanto a instalações terrestres quanto a ambientes naval-militares.

Informações específicas sobre o Navio Patrulha Gurupi foram obtidas através de publicações internas, incluindo o Livro de Controle de Avarias (CAV) e o manual dos diesel-geradores. Estes documentos são vitais para entender o contexto operacional e as especificações técnicas da embarcação.

No contexto da Marinha do Brasil, a publicação Engenalmarinst 30-08A foi empregada como referência para demarcar os limites preconizados pela instituição naval quanto aos parâmetros de qualidade de energia a serem seguidos pelos meios navais.

Finalmente, para as atividades práticas de coleta de dados no campo, o manual do analisador de potência Fluke 435 série II foi utilizado como um recurso indispensável. Este manual forneceu orientações cruciais sobre as várias opções de análise disponíveis, permitindo uma avaliação mais precisa e confiável dos dados coletados durante as operações do navio.

2.1 Definições e problemas que afetam a QEE

O tema de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é crucial em vários domínios, desde instalações industriais até navios de guerra. O conceito de QEE é multifacetado e não uniformemente definido. Segundo Leão (2014), ele abrange as características de tensão e corrente que garantem o funcionamento eficaz e duradouro de sistemas elétricos. Martinho (2013) salienta que a definição de QEE é também influenciada pela posição e necessidades dos usuários na cadeia industrial.

O estudo da QEE não se limita apenas às propriedades senoidais de tensão e corrente em uma rede, mas também envolve a análise de distorções e eventos que afetam essas formas de onda. Alam & Gain (2014) enfatizam que tais distorções podem prejudicar o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos da rede.

A QEE é examinada de duas óticas principais: a da fonte de energia e a da carga. Distúrbios na geração e distribuição podem ter ramificações significativas para ambos. Para operações em grande escala, como em complexos industriais e navios, essa dualidade torna-se ainda mais crítica. Nos navios da Marinha do Brasil (MB), por exemplo, problemas de QEE podem afetar gravemente a eficiência operacional e a segurança (Evans, Hoevenaars & Eng, 2007; Holmes, 2006).

Adicionalmente, questões como a compatibilidade magnética dos equipamentos a bordo e a assinatura magnética do navio estão interligadas à QEE. Harmônicas na corrente podem complicar medidas como contraminagem e varredura, tendo implicações na guerra de minas (Holmes, 2006).

O gerenciamento da QEE também é vital para a manutenção e lubrificação de equipamentos críticos a bordo, e qualquer perturbação em sua qualidade pode exigir decisões imediatas para evitar danos maiores. Portanto, tanto do ponto de vista da fonte quanto da carga, compreender os fenômenos que influenciam a QEE é fundamental para o pessoal embarcado e para o gerenciamento de riscos.

A qualidade de energia a bordo de navios de guerra é um aspecto fundamental para o desempenho e a segurança das embarcações. A qualidade de energia pode ser definida como o grau de adequação da tensão, corrente e frequência fornecidas aos equipamentos elétricos e eletrônicos, de modo a garantir o seu funcionamento correto e eficiente. Um dos principais fatores que afetam a qualidade de energia é a presença de harmônicos, que são componentes de frequência múltipla da frequência fundamental da rede elétrica. Os harmônicos podem causar distorções na forma de onda da tensão e da corrente, reduzindo a eficiência energética, provocando sobreaquecimento, interferências eletromagnéticas, danos aos equipamentos e falhas no sistema.

A análise da QEE consiste em medir e avaliar os parâmetros elétricos que indicam o nível de distorção harmônica e outros fenômenos que podem comprometer a qualidade da energia fornecida aos equipamentos. Existem diversos métodos e instrumentos para realizar essa análise, sendo um dos mais utilizados o analisador de qualidade de energia Fluke 435 II. Esse equipamento é capaz de medir e registrar os principais parâmetros elétricos, tais como tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência, energia, distorção harmônica total

(DHT), índice de demanda máxima (IDM), flicker, transitórios, interrupções e afundamentos (Fluke, 2012). Além disso, o Fluke 435 II possui uma interface gráfica que permite visualizar as formas de onda, os espectros harmônicos, os diagramas fasoriais e os gráficos de tendência dos parâmetros medidos.

A avaliação da QEE tem um impacto significativo para o desempenho e a segurança das embarcações. Ao identificar e quantificar os harmônicos e outros distúrbios elétricos presentes na rede elétrica, é possível adotar medidas corretivas ou preventivas para mitigar os seus efeitos negativos. Por exemplo, é possível instalar filtros passivos ou ativos para reduzir os níveis de distorção harmônica, ajustar os parâmetros dos reguladores de tensão e frequência para evitar flutuações indesejadas, dimensionar adequadamente os cabos e os transformadores para evitar sobrecargas e sobreaquecimento, entre outras ações. Dessa forma, é possível melhorar a eficiência energética das embarcações, prolongar a vida útil dos equipamentos elétricos e eletrônicos, evitar falhas no sistema elétrico e garantir a continuidade do fornecimento de energia para as operações críticas do meio naval.

A verificação da qualidade de energia também pode contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações para as embarcações. Ao monitorar e avaliar os parâmetros elétricos, é possível obter informações valiosas sobre o comportamento e o desempenho dos equipamentos e sistemas elétricos, que podem ser utilizadas para otimizar o seu funcionamento, aumentar a sua confiabilidade, reduzir o seu consumo de energia e minimizar as suas emissões de poluentes. Além disso, pode estimular a inovação e a pesquisa na área de engenharia elétrica, gerando novos conhecimentos, métodos e soluções para os desafios e as demandas do meio naval.

Segundo Pimentel (2010), o Instituto de Engenheiros Elétricos e Elétricos (IEEE), organização americana mundial que emite normas padronizadas a respeito de energia elétrica, classifica conceitualmente os fenômenos eletromagnéticos que influenciam a qualidade da energia elétrica de acordo com o quadro abaixo:

TABELA 2.1 – PROBLEMAS QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA

Categorias	Espectro típico	Duração típica	Tensão típica
1. Transitórios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanossegundos	5ns ascensão	< 50ns	
1.1.2 Microssegundos	1µs ascensão	50ns – 1ms	
1.1.3 Milissegundos	0,1ms ascensão	> 1ms	
1.2 Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 p.u.
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20µs	0 – 8 p.u.
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5µs	0 – 4 p.u.
2. Variações de Tensão de Curta Duração			
2.1 Instantâneas			
2.1.1 Sag (Afundamento)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
2.1.2 Swell (Elevação)		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
2.2 Momentâneas			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3s	< 0,1 p.u.
2.2.2 Sag (Afundamento)		30 ciclos – 3s	0,1 – 0,9 p.u.
2.2.3 Swell (Elevação)		30 ciclos – 3s	1,1 – 1,4 p.u.
2.3 Temporárias			
2.3.1 Interrupção		3s – 1 min	< 0,1 p.u.
2.3.2 Sag (Afundamento)		3s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u.
2.3.3 Swell (Elevação)		3s – 1 min	1,1 – 1,2 p.u.
3. Variações de Tensão de Longa Duração			
3.1 Interrupção Sustentada		> 1 min	0,0 p.u.
3.2 Subtensão		> 1 min	0,8 – 0,9 p.u.
3.3 Sobretensão		> 1 min	1,1 – 1,2 p.u.
4. Desequilíbrio de Tensão		Estado Estacionário	0,5 – 2%
5. Distorção da Forma de Onda			
5.1 DC Offset		Estado Estacionário	0 – 0,1%
5.2 Harmônicas		Estado Estacionário	0 – 20%
5.3 Interharmônicas		Estado Estacionário	0 – 2%
5.4 Notching (Corte de Tensão)		Estado Estacionário	
5.5 Ruído		Estado Estacionário	0 – 1%
6. Flutuação de Tensão		Intermitente	0,1 – 7%
7. Variação de Frequência		< 10s	

Fonte: IEEE Std 1159-2019

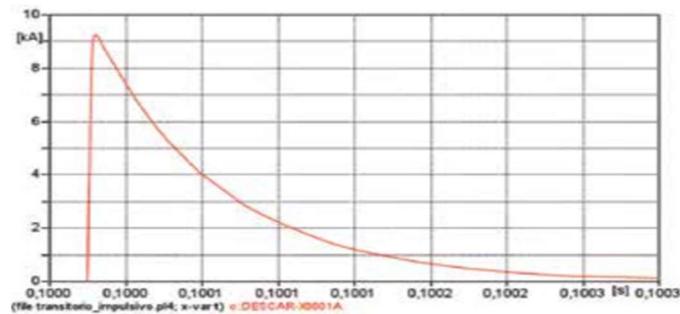
2.1.1 Transitórios ou transientes

Transitórios elétricos são fenômenos temporários de curta duração, na casa de nanossegundos, que ocorrem quando um sistema elétrico passa de um estado de equilíbrio para outro. Geralmente, estes fenômenos alteram a tensão e a corrente de uma rede elétrica.

Segundo Matana (2008), o aumento da tensão ou da corrente acontece de forma repentina, tem duração finita, e tem a característica de se dissipar muito rápido. São fenômenos de suma importância na engenharia elétrica, especialmente quando se trata de sistemas de alta potência, como os encontrados em navios de guerra. A análise de transitórios é crucial para o projeto de sistemas de proteção e controle.

Pimentel (2010) divide os eventos transitórios em impulsivos e oscilatórios. Os efeitos impulsivos tem polaridade unidirecional, sem alteração na frequência elétrica da rede e possui um tempo de subida e um tempo de decaimento. O evento mais característico desse tipo de evento são as descargas atmosféricas, conforme observado na figura 01.

FIGURA 01 - COMPORTAMENTO DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA

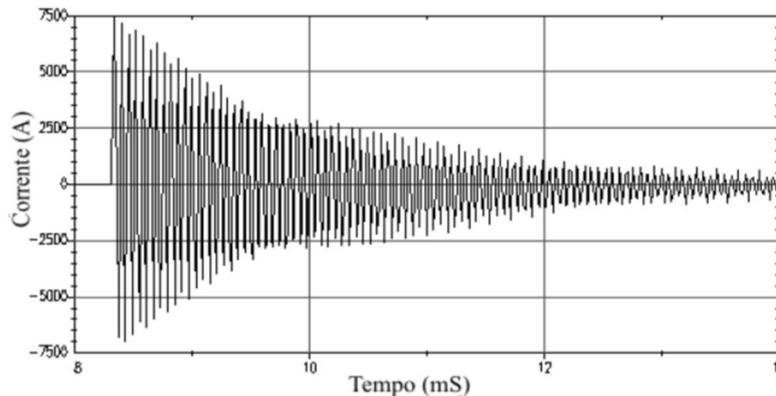


Fonte: BACCA, (2013).

Os fenômenos elétricos conhecidos como eventos transientes oscilatórios são particularmente intrigantes e merecem uma análise aprofundada. Estes eventos são distintos por não induzirem uma mudança na frequência da rede elétrica onde se manifestam. Uma característica marcante desses eventos é a sua polaridade bidirecional. Isso significa que, durante o evento, há uma alternância rápida na amplitude da onda elétrica, oscilando entre valores positivos e negativos. Esta peculiaridade é fundamental para entender o comportamento e os efeitos potenciais desses transientes.

A origem mais comum desses eventos oscilatórios pode ser atribuída ao uso de bancos de capacitores. Estes dispositivos são frequentemente empregados para corrigir o fator de potência em sistemas elétricos, conforme ilustrado na figura 02. Quando esses capacitores são acionados ou "chaveados", eles podem gerar picos de corrente significativos. Isso ocorre porque, inicialmente, os capacitores apresentam uma impedância muito baixa, o que facilita a passagem de corrente. Esta súbita e intensa passagem de corrente pode ter consequências adversas para o sistema elétrico. Em particular, pode resultar na quebra da isolação de equipamentos elétricos, como máquinas rotativas e transformadores, comprometendo sua integridade e funcionalidade.

FIGURA 02 - EFEITO DE UM TRANSIENTE OSCILATÓRIO DEVIDO AO CHAVEAMENTO DE UM BANCO DE CAPACITORES



Fonte: PIMENTEL, 2010

É importante mencionar a classificação apresentada no quadro 2.1. Este quadro categoriza os efeitos transitórios com base em sua frequência, dividindo-os em baixa, média e alta frequência. Esta classificação é crucial para entender os impactos potenciais desses eventos em diferentes componentes do sistema elétrico. Pailillo et al., em seu estudo de 2013, destacaram que os transientes de média e alta frequência têm a capacidade de interferir adversamente na operação de cargas eletrônicas. Além disso, esses transientes podem afetar negativamente filtros de alta frequência e transformadores isoladores, comprometendo sua eficiência e durabilidade.

2.1.2 Variações de tensão de curta duração (VTCD)

Variações de tensão de curta duração são flutuações que ocorrem em um intervalo de tempo muito curto e podem ser causadas por eventos como curtos-circuitos ou a operação de dispositivos de grande potência. Essas variações são críticas em sistemas embarcados em navios de guerra, onde a estabilidade do sistema é crucial para operações táticas.

Martinho (2013), descreveu fenômenos elétricos específicos que são marcados por mínúsculas flutuações na magnitude da tensão elétrica. Estas flutuações ocorrem em intervalos de tempo muito curtos, variando entre meio ciclo e um minuto completo. Martinho categorizou esses fenômenos em dois grupos distintos: aqueles que têm uma duração de até três segundos, que ele denominou como "variação momentânea de tensão", e aqueles que persistem por um período superior a três segundos, referidos como "variação temporária de tensão".

Por outro lado, os fenômenos conhecidos como "Voltage swells" ou "Voltage surges" são caracterizados por um aumento abrupto na tensão. Esta elevação é frequentemente observada quando grandes cargas são desconectadas da rede elétrica. Apesar de serem eventos comuns em sistemas elétricos, eles têm o potencial de interferir adversamente no desempenho de dispositivos eletrônicos sensíveis. Estas elevações de tensão podem alterar a operação de motores, sobrecarregar controladores de tensão e até mesmo reduzir a expectativa de vida de alguns equipamentos. Além disso, eles podem resultar em desperdício de energia, sobreaquecimento e ativação indesejada de dispositivos de proteção.

Em contraste, o fenômeno "Voltage Sag" ou "Voltage Dip" é caracterizado por uma queda na onda de tensão. Esta queda é frequentemente causada pela ativação de cargas elétricas de alta potência, falhas na geração de energia ou no sistema de controle de tensão, distância significativa entre a fonte de energia e a carga, e ao ligar transformadores e bancos de capacitores. Estes eventos podem gerar correntes de alta magnitude, conhecidas como "correntes de inrush". Alam & Gain, em 2014, associaram este fenômeno a problemas de desempenho e sobrecarga em motores, uma vez que estes dispositivos precisam manter seu torque mesmo quando alimentados com baixa tensão.

Martinho (2013) propôs que uma abordagem eficaz para mitigar os efeitos do "Voltage Sag" seria empregar métodos alternativos de partida, como a partida Y- Δ , soft-starter ou inversores de frequência. Estes métodos têm o potencial de reduzir picos de corrente durante transientes. No entanto, é crucial observar que os dois últimos métodos, que utilizam eletrônica de potência, podem introduzir harmônicas na rede elétrica, comprometendo a Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

A partida direta é um método que envolve a alimentação direta do equipamento através de um comutador. Este método pode resultar em uma corrente de partida elevada e uma queda significativa na tensão, especialmente se o equipamento em questão for de alta potência. Tal situação pode ser prejudicial para o sistema elétrico como um todo.

Conforme as diretrizes da Engenlmarinst 30-11, os motores instalados em embarcações devem ser inicializados diretamente sob sua tensão nominal. No entanto, se a

corrente de partida exceder os limites estabelecidos pelas normas, métodos alternativos de partida devem ser empregados.

A partida Y- Δ envolve a mudança na configuração de ligação do motor durante a partida, de triângulo para estrela, através da ativação de dois contatores. Este processo permite que o motor comece a operar sem atingir altos valores de corrente e evita quedas de tensão. Uma vez que o motor alcança uma velocidade de rotação específica, os contatores são desativados, permitindo que o motor opere em sua velocidade nominal.

Por outro lado, a partida por soft-starter se destaca pelo controle preciso da tensão de partida. Isso é alcançado através do uso de pares de tiristores em paralelo, que são conectados em série ao circuito de saída do estator do motor. Estes tiristores são controlados por um dispositivo que ajusta seu ângulo de disparo, permitindo que a amplitude da onda de tensão aumente gradualmente até atingir seu valor nominal.

2.1.3 Variações de tensão em estado permanente (VTLD)

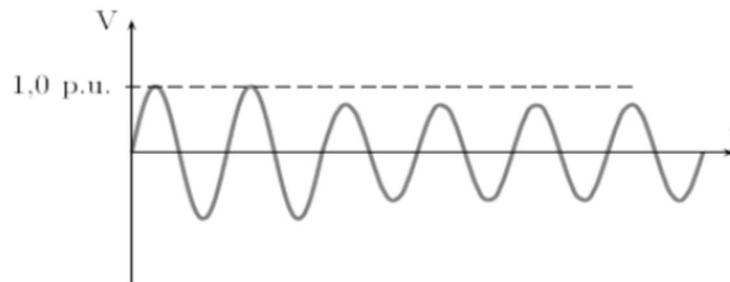
As variações de tensão em estado permanente são flutuações que ocorrem durante um período prolongado e são geralmente causadas por mudanças na carga ou na geração de energia. São frequentemente referidas como VTLD, se resumem a fenômenos elétricos que se manifestam como perturbações em regime permanente nos parâmetros fundamentais de corrente e tensão em sistemas elétricos. Estas variações são distintas das variações de curta duração (VTCD) em vários aspectos, sendo os mais notáveis a duração e a amplitude. De acordo com a classificação apresentada no quadro 2.1, as VTLD têm uma duração que excede um minuto.

Kagan et al. (2009), descreveu algumas das causas subjacentes às VTLD. Em sua pesquisa foi sugerido que essas variações prolongadas podem ser o resultado de erros no dimensionamento do sistema elétrico. Tais erros podem levar o sistema a operar com valores de corrente e tensão que estão abaixo dos limites aceitáveis, comprometendo a eficiência e a segurança do sistema.

Dentro da categoria de VTLD, existem várias subcategorias, incluindo sobretensão, subtensão e interrupções sustentadas. A tabela 2.1 especifica que as sobretensões são caracterizadas por uma variação na amplitude de 1,10 a 1,20 volt pu. Estas sobretensões são

frequentemente observadas quando grandes cargas são adicionadas à rede elétrica ou quando bancos de capacitores são energizados. Em contraste, as subtensões, exemplificadas pelo fenômeno conhecido como "Brownout" (ilustrado na Figura 03), apresentam amplitudes que variam entre 0,80 e 0,90 volt pu. Estas subtensões são geralmente causadas pelo desligamento de bancos de capacitores ou pela desconexão de grandes cargas do sistema.

FIGURA 03 – FORMA DE ONDA COM EFEITO “BROWNOUT”



Fonte: PIMENTEL, 2010.

As interrupções sustentadas representam uma categoria distinta de VTLD, onde a tensão no sistema cai para zero. Nestes casos, é necessária uma intervenção humana para reativar o sistema e restaurar o fornecimento de energia elétrica. Estas interrupções podem ser categorizadas em dois tipos: planejadas e repentinas.

As interrupções repentinas são particularmente problemáticas, pois resultam em cortes inesperados no fornecimento de energia devido a eventos imprevistos. Tais interrupções podem causar danos a equipamentos conectados à rede.

Por outro lado, as interrupções sustentadas planejadas são vistas de forma mais positiva. Monteiro (2018), destacou que estas interrupções são geralmente associadas a procedimentos de manutenção programada, garantindo a longevidade e a eficiência dos equipamentos.

2.1.4 Interrupções

Interrupções de tensão são eventos onde a tensão cai para um valor muito baixo ou mesmo zero, geralmente devido a falhas no sistema. São fenômenos que podem ter implicações significativas para a operação e integridade de equipamentos e redes. Martinho (2013), fornece uma definição clara de interrupção, descrevendo-a como uma situação em que a tensão fornecida é inferior a 10% da tensão nominal da rede, podendo chegar até à ausência total de tensão no barramento. Este fenômeno pode ser categorizado e analisado de três maneiras distintas: interrupção momentânea, temporária e de longa duração.

A interrupção momentânea é caracterizada por uma breve ausência de tensão ou por valores que são inferiores a 10% da tensão nominal, e essa condição persiste por um período de até três segundos. Em contraste, a interrupção temporária se estende por um período mais longo, durando até um minuto. A interrupção de longa duração, como o nome sugere, persiste por períodos que excedem um minuto. Esta última categoria é particularmente preocupante, pois geralmente requer intervenção humana para restaurar o fornecimento de energia e corrigir o problema.

Embora as manifestações dessas interrupções variem em duração, as causas subjacentes são consistentes entre as categorias. Estas causas podem variar em termos de gravidade e impacto, mas as principais incluem descargas atmosféricas, problemas na rede de alimentação externa ou na geração de energia, erros humanos, ausência de uma das fases de alimentação ou ativação de dispositivos de proteção. Estes dispositivos são projetados para proteger componentes críticos do sistema, como geradores, disjuntores e redes de distribuição, de danos ou falhas.

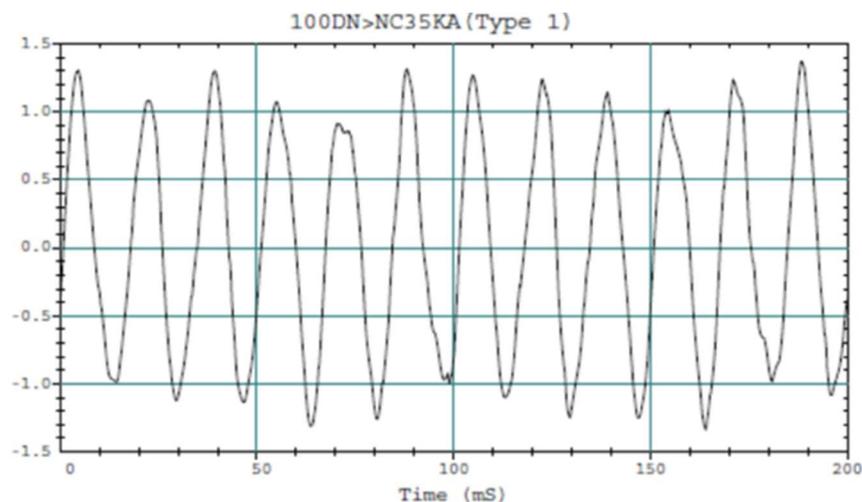
Alam & Gain (2014), enfatizaram a gravidade das interrupções indesejadas em sistemas elétricos. Eles argumentaram que tais interrupções podem ter consequências devastadoras para a vida útil e operação de sistemas e equipamentos. Interrupções não planejadas podem resultar em danos irreversíveis aos equipamentos, perda de dados valiosos e, em casos extremos, podem até mesmo causar incêndios, comprometendo a segurança e a integridade de instalações e pessoas.

2.1.5 Flutuações de tensão

Flutuações de tensão são variações menores na tensão que podem ser causadas por cargas flutuantes ou instabilidades no sistema. Essas flutuações podem afetar o desempenho de equipamentos sensíveis e são de particular interesse em sistemas navais, onde a confiabilidade é crucial. A flutuação luminosa é um fenômeno que tem sido observado e estudado ao longo dos anos, principalmente devido ao desconforto que provoca nas pessoas ao perceberem variações na intensidade luminosa de uma lâmpada. Este fenômeno não é apenas uma simples variação de luz, mas tem raízes profundas na teoria da flutuação de tensão. Deckman e Pomilio (2020), destacam que a cintilação luminosa, também conhecida como "efeito flicker", está intrinsecamente ligada à flutuação de tensão. Este efeito é particularmente perceptível aos olhos humanos, tornando-se uma fonte de desconforto visual.

A ANEEL, através do PRODIST, fornece uma definição técnica para a flutuação de tensão. Ela é descrita como uma variação que pode ser aleatória, repetitiva ou esporádica, seja no valor eficaz ou no pico de tensão, e que ocorre de forma quase instantânea. Pimentel (2010), identificou várias causas para este fenômeno. Equipamentos como motores elétricos são notórios por causar flutuações de tensão, especialmente devido à alta corrente necessária durante a partida e durante o funcionamento em regime permanente. Além disso, máquinas de solda, fornos a arco e bombas d'água são outros equipamentos que podem induzir flutuações significativas na tensão.

FIGURA 04 – FLUTUAÇÃO DE TENSÃO TÍPICA DEVIDO AO USO FORNO A ARCO



Fonte: IEEE Std 1159-2019.

Além da já mencionada cintilação luminosa, a flutuação de tensão pode ter outras consequências. Uma delas, como apontado por Pimentel (2010), é a variação na velocidade de máquinas rotativas comerciais. Esta variação pode afetar a eficiência e a operação dessas máquinas.

Em um contexto marítimo, especialmente a bordo de navios, seja na Marinha do Brasil ou na Marinha Mercante, a flutuação de tensão é um fenômeno bastante comum. Isso se deve à presença de várias máquinas elétricas rotativas a bordo. Estas máquinas desempenham funções vitais, como acionar bombas que pressurizam sistemas de óleo e água ou fornecer ventilação e extração para compartimentos internos, como as praças de máquinas. A operação contínua e simultânea desses equipamentos em um ambiente confinado, como um navio, torna o gerenciamento e a mitigação das flutuações de tensão essenciais para a segurança e eficiência operacional.

2.1.6 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão ocorre quando as fases de um sistema trifásico não são iguais em magnitude ou deslocadas por um ângulo de 120 graus. Isso pode levar a uma operação ineficiente e até mesmo a falhas de equipamentos.

De acordo com o PRODIST, um documento técnico regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), é fundamental que as tensões em sistemas elétricos mantenham um equilíbrio adequado. No entanto, quando se observa uma discrepância entre um ou ambos os requisitos de tensão, é evidente a presença de um desequilíbrio nessas tensões. Este desequilíbrio pode ser atribuído a várias causas, e uma delas foi especificamente discutida por Ferreira (2008).

O autor explicitou que quando cargas monofásicas não são distribuídas de maneira uniforme em uma rede elétrica trifásica, a probabilidade de ocorrer um sequenciamento negativo das correntes aumenta significativamente. Tal sequenciamento pode levar a uma sobrecarga em uma das fases, resultando em consequências adversas, como a queima de fusíveis de uma fase específica. Quando isso ocorre, a fase torna-se inoperante, levando a um desequilíbrio de tensão mais acentuado.

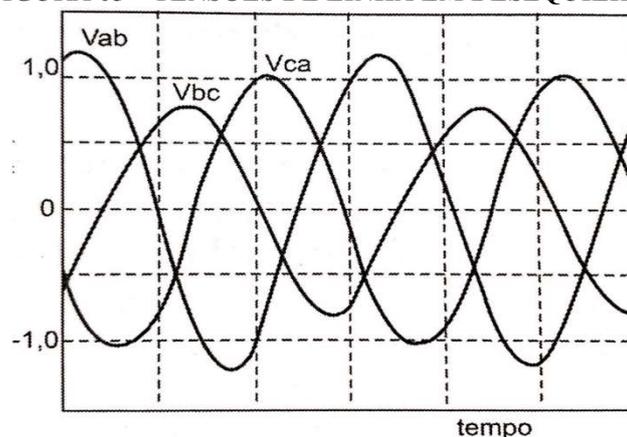
Além disso, é importante compreender as ramificações do sequenciamento negativo de fases em equipamentos elétricos. Em particular, motores síncronos e de indução são diretamente afetados por esse fenômeno. A razão para isso é a emergência de campos pulsantes, que induzem vibrações nesses motores. Essas vibrações não apenas têm o potencial de reduzir a vida útil dos motores, mas também podem causar falhas complexas e imediatas.

Em um estudo mais recente, Monteiro (2018), afirma sobre outras consequências do desequilíbrio de fases. Este autor destacou que as perdas ôhmicas e as interferências eletromagnéticas são efeitos colaterais diretos de fases desequilibradas.

Adicionalmente, Martinho (2013) confirma que, embora desequilíbrios sejam comuns em sistemas elétricos de distribuição, eles podem se intensificar e causar danos, especialmente devido à introdução de cargas monofásicas. Essas cargas podem perturbar as fases, levando à formação de tensões e correntes indesejadas, afetando adversamente máquinas síncronas e dispositivos de proteção. Além disso, consequências como sobreaquecimento, desequilíbrios de carga e geração de harmônicas são observadas, com o desperdício de energia sendo uma das principais preocupações.

Para ilustrar esse ponto, a Figura 05 apresenta uma representação gráfica de uma rede trifásica que possui uma distribuição monofásica desigual.

FIGURA 05 – TENSÕES DE LINHA EM DESEQUILÍBRIO



Fonte: Martinho, 2013.

O cálculo do desequilíbrio, de acordo com a forma preconizada pelo IEEE, descrita no método IEEE-1, dito a “verdadeira definição” por Garcia (2007), é exposto na equação que se segue:

$$K(\%) = 3 \times \frac{(V_{max} - V_{min})}{V_a + V_b + V_c} \times 100$$

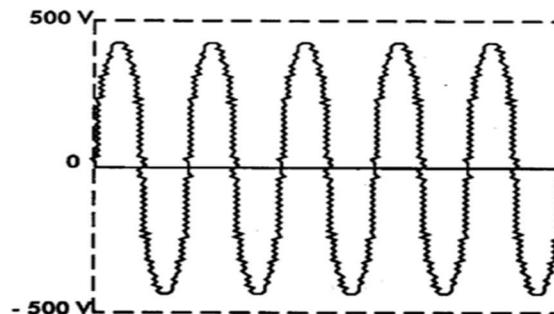
Onde,

$K\%$	Porcentagem de desequilíbrio de tensão
V_{min}	Valor e mínimo de tensão entre as fases
$V_{máx}$	Valor máximo de tensão entre as fases
$V_{a,b,c}$	Módulo das tensões das fases (onde n= a, b ou c)

2.1.7 Ruídos ou Noise

Ruídos elétricos são sinais indesejados que podem interferir no desempenho de sistemas elétricos e eletrônicos. De acordo com Arruda (2003), o ruído pode ser definido como um sinal elétrico indesejado, que, como ilustrado na figura 06, possui uma ampla faixa espectral com frequências abaixo de 200 kHz. Estes ruídos são superpostos às tensões ou correntes de fase e podem também ser encontrados em condutores de neutro.

FIGURA 06 – TENSÃO ALTERNADA SENOIDAL COM PRESENÇA DE RUÍDO



Fonte: MEHL, 2002.

Monteiro (2018), ressaltou a inevitabilidade dos ruídos em sistemas elétricos. Mesmo que se busque a perfeição na transmissão e recepção de sinais, os ruídos sempre estarão presentes devido às limitações dos equipamentos e das técnicas de medição. Portanto, ao monitorar parâmetros em redes elétricas, é essencial observar os limites estabelecidos pelas normas pertinentes. Por exemplo, a norma IEEE, no quadro 2.1, estabelece um limite de 1% para os valores de tensão e corrente.

Alam & Gain (2014) descreveram os ruídos como a "superposição de sinais de alta frequência (200 kHz) à onda característica do sistema de potência", resultando na formação de sinais espúrios. Estes ruídos estão intrinsecamente ligados ao conceito de compatibilidade eletromagnética entre os equipamentos. Suas origens são diversas, variando desde a proximidade de fontes de ondas eletromagnéticas, que interferem em meios condutores mal aterrados ou blindados, até a indução de fluxos residuais de motores, chaveamentos de cargas, arcos elétricos e outros equipamentos.

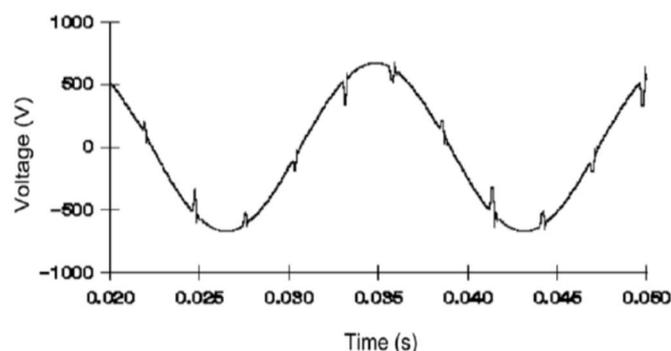
De forma a complementar o assunto, Cavalcanti (2021) enfatizou que os ruídos não afetam apenas a integridade dos sistemas elétricos. Eles também têm um impacto significativo nas comunicações, comprometendo a integridade e a confiabilidade dos sinais. Isso ocorre devido à capacidade de interferência das ondas eletromagnéticas em equipamentos elétricos e sistemas de comunicação.

2.1.8 Notching

Notching é um fenômeno que ocorre quando há uma distorção temporária na forma de onda da tensão, geralmente causada por dispositivos eletrônicos de comutação.

Correa (2007), descreveu o *notching* como um distúrbio causado pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência, especificamente durante o processo de comutação de corrente de uma fase para outra. Durante essa comutação, devido à indutância inerente dos cabos, ocorre um desfasamento entre a corrente e a tensão. Isso resulta em uma corrente de curto-circuito entre as fases em comutação, levando a uma queda na tensão de saída. Visualmente, essa queda na tensão pode ser percebida como um "corte" ou interrupção na forma de onda senoidal. Tal como ocorre na Figura 07.

FIGURA 07 – “NOTCHING”



Fonte: IEEE Std 1159-2019.

A origem desse problema pode ser rastreada até os conversores eletrônicos. A indutância da fonte desempenha um papel crucial, pois determina a profundidade desse "corte" na onda senoidal. Embora o *notching* possa não resultar em variações drásticas na amplitude da onda, suas implicações são mais sutis e potencialmente prejudiciais. Equipamentos elétricos sensíveis podem ser adversamente afetados pelo *notching*, especialmente porque as componentes harmônicas associadas a esse fenômeno são de alta frequência. Portanto, é essencial estar ciente desse distúrbio e tomar medidas adequadas para mitigar seus efeitos em sistemas elétricos.

2.1.9 Deformações de frequência

Deformações ou variações de frequência, por assim dizer, podem ocorrer devido a desequilíbrios na carga e geração de energia. A variação de frequência da rede elétrica, um fenômeno que tem implicações significativas no desempenho e na estabilidade dos sistemas de potência.

As variações de frequência em uma rede elétrica são resultado de um desequilíbrio entre a energia elétrica produzida e o consumo no sistema (Dungan, 2002). Complementando essa visão, Alam & Gain (2014) observaram que a frequência padrão de uma rede elétrica é determinada geograficamente, sendo comum encontrar frequências de 50 ou 60 Hz, sendo esta última a adotada no Brasil. É com base nessa frequência que os equipamentos elétricos brasileiros são projetados e dimensionados.

Em instalações terrestres, a frequência da rede elétrica tende a ser estável, uma vez que o sistema elétrico nacional opera como um barramento infinito, garantindo uma frequência quase constante. No entanto, em geradores síncronos, que são projetados para aplicações específicas, as variações de frequência podem ser mais pronunciadas. Pimentel (2010) aponta que essas variações podem ser causadas por interrupções no sistema de transmissão, desconexões de grandes cargas ou fontes de geração, ou falhas nos sistemas de controle dos geradores.

Chapman (2013) nos oferece uma visão mais aprofundada sobre a relação entre a velocidade de rotação das máquinas síncronas e a frequência da rede elétrica. Ele destaca que a

frequência de operação da rede está intrinsecamente ligada à velocidade de rotação dessas máquinas. Portanto, qualquer alteração na carga pode perturbar o equilíbrio dinâmico entre esses dois parâmetros.

Sendo assim, a estabilidade da frequência da rede elétrica é de suma importância. A manutenção de uma velocidade de rotação constante pelo equipamento gerador é crucial para garantir essa estabilidade. Dessa forma, qualquer fator que interfira na velocidade do gerador, seja devido a falhas, perdas de regulação ou outros problemas, pode comprometer a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), especialmente considerando que a frequência pode variar significativamente com a entrada e saída de cargas no sistema.

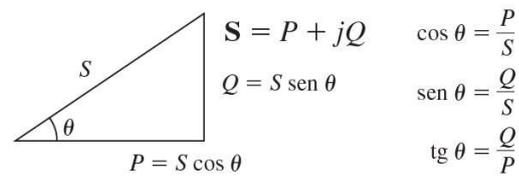
2.1.10 Conceito sobre o Fator de Potência

O fator de potência (FP) é uma medida da eficiência com que a energia elétrica é convertida em trabalho. Em sistemas navais, um fator de potência inadequado pode levar a uma operação ineficiente e a maiores custos de energia.

O FP, embora não esteja diretamente relacionado a alterações na forma de onda senoidal, é uma métrica que indica a eficiência de uma rede elétrica. Ele representa a relação entre as potências ativa (P) e aparente (S). A potência ativa, medida em Watts (W), é a energia efetivamente consumida pelas cargas do sistema. Em contraste, a potência aparente, medida em volt-ampère (VA), é a energia total fornecida pela fonte geradora. Há também a potência reativa (Q), medida em volt-ampère-reactivo (VAR), que representa a energia armazenada e trocada pelos componentes elétricos, como capacitores e indutores, para formar seus campos elétricos e magnéticos.

A inter-relação entre P, Q e S é melhor visualizada através da representação retangular de um número complexo, frequentemente referido como potência complexa. Esta relação é ilustrada no triângulo de potências, como mostrado na Figura 08. A partir desta figura, podemos inferir que o FP é a razão entre P e S, sendo equivalente ao cosseno do ângulo θ . Portanto, quanto maior a potência reativa (Q), menor será o cosseno de θ , indicando uma maior proporção de energia usada para manter campos elétricos e magnéticos em relação à energia efetivamente utilizada.

FIGURA 08 – TRIÂNGULO DE POTÊNCIAS



Fonte: Chapman, 2013. Editada pelo autor.

A gestão adequada do FP é vital para otimizar a eficiência da rede elétrica. Um FP bem controlado evita o sobreaquecimento de cabos e equipamentos, reduz os custos de manutenção, economiza combustível em motores e geradores, permite o subdimensionamento de componentes e prolonga a vida útil dos equipamentos. No entanto, é importante notar que, embora a potência reativa não seja convertida em trabalho útil, ela é essencial para o funcionamento de componentes da rede, especialmente aqueles de natureza indutiva.

Marinho (2013) destaca que o FP de uma rede é fortemente influenciado pelas cargas que ela alimenta. Equipamentos mal dimensionados ou que não atendem às normas de qualidade podem degradar o FP e levar ao desperdício de energia. A solução mais comum para corrigir o FP é a instalação de bancos de capacitores.

No Navio Patrulha Gurupi, o FP fornecido na saída do gerador 1 é de 0,78 e na saída do gerador 2 é de 0,87, devido à presença de motores, máquinas de potência e transformadores, e principalmente, à falta de bancos de capacitores. Este valor é considerado baixo pelo PRODIST, que estabelece um FP de 0,92 para a rede nacional.

2.1.11 Harmônicas

A presença de harmônicas em sistemas elétricos, é um fenômeno que tem implicações significativas no desempenho e na estabilidade dos sistemas de potência.

A norma IEEE 519-2014, uma referência padrão no campo da engenharia elétrica, define harmônica como uma componente da série de Fourier de uma onda periódica distorcida, cuja ordem é diferente de um. Leão (2014), complementa essa definição, descrevendo as

harmônicas como ondas senoidais de diferentes frequências que se sobrepõem a uma onda fundamental, resultando em uma onda distorcida não-senoidal.

A Série de Fourier é uma ferramenta matemática essencial para entender e estudar as harmônicas. Ela permite decompor um sinal contínuo e periódico em uma série infinita de sinais discretos no domínio da frequência. Como Leão (2014) destaca, essa decomposição pode ser interpretada como uma combinação de componentes senoidais de diferentes frequências.

Matematicamente, a série de Fourier é representada pela seguinte equação:

$$X(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_{max,n} \cos(n\omega t - \phi_n)$$

Onde,

$X(t)$	Sinal distorcido analisado
X_0	Componente DC
$X_{max,n}$	Amplitude máxima da componente harmônica n
ω	Frequência angular
ϕ_n	Deslocamento inicial de fase inicial da componente harmônica em $t=0$

A equação apresentada ilustra a decomposição de um sinal em suas componentes fundamentais: um sinal contínuo, uma componente alternada fundamental e um conjunto de harmônicas. Cada harmônica contribui de maneira única para a forma final do sinal, e a Série de Fourier permite analisar a contribuição individual de cada uma.

No entanto, a análise analítica de cada componente pode ser desafiadora, especialmente quando se lida com sinais complexos e sistemas com comportamentos indefinidos. Nesse contexto, a Transformada de Fourier surge como uma ferramenta valiosa, permitindo analisar o espectro de frequência de um sinal no domínio da frequência.

Quando se trata de medições reais realizadas por equipamentos digitais, os sinais não são contínuos. Eles são representados por magnitudes discretas em intervalos de tempo fixos. Para analisar esses sinais no domínio do tempo e da frequência, é necessário utilizar a

Transformada Discreta de Fourier. Esta transformada permite a reconstrução e análise de sinais digitais em ambos os domínios.

Dessa forma, em aplicações práticas, especialmente em sistemas digitais, a FFT (Transformada Rápida de Fourier) é frequentemente empregada. Trata-se de um algoritmo especializado da transformada discreta que facilita a manipulação e análise rápida de matrizes computacionais, sendo uma ferramenta indispensável para engenheiros e especialistas em tecnologia.

2.1.11.1 Harmônicas – Causas e efeitos

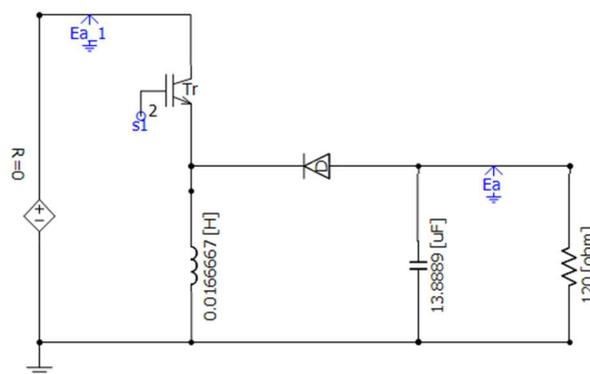
G. Chicco e A. Mazza (2019) discute a importância dos componentes simétricos na engenharia elétrica, especialmente em relação às harmônicas e inter-harmônicas em várias aplicações. Este conceito de componentes simétricos foi introduzido por Charles LeGeyt Fortescue (2018) e tem sido uma ferramenta útil na teoria de circuitos elétricos. Além disso, é particularmente relevante para a operação de máquinas de indução sob condições desequilibradas, como as encontradas em aplicações de eletrificação ferroviária. G. Chicco e A. Mazza (2019) também destacaram desenvolvimentos recentes em estudos sobre máquinas elétricas, harmônicas e a operação de sistemas de energia e distribuição com recursos energéticos distribuídos.

Martinho (2013) destaca que as correntes harmônicas são predominantemente originadas pela presença de cargas não lineares na rede. Estas cargas, conforme elucidado por Leão (2014), são caracterizadas por produzir correntes distorcidas, mesmo quando alimentadas por uma fonte de tensão pura e não distorcida. Em contrapartida, as tensões harmônicas surgem devido à circulação dessas correntes harmônicas nas impedâncias inerentes do sistema elétrico.

Com a revolução da eletrônica de potência e a crescente automação industrial, houve uma proliferação no uso de componentes eletrônicos, como diodos e tiristores. Estes componentes, embora essenciais para a modernização e eficiência dos processos industriais, introduzem distorções significativas na rede elétrica, manifestando-se como correntes harmônicas. Essas distorções são consequência direta dos ciclos de chaveamento desses componentes, que operam alternando entre estados de condução e interrupção.

Um exemplo de carga não-linear são os componentes que funcionam sob o regime de chaveamento, ora impedindo a passagem de corrente, ora permitindo, ocorrendo numa frequência considerável, tal como ocorre nos conversores do tipo buck-boost (Figura 09) que possibilita a mudança da polaridade das tensões de saída e o aumento ou diminuição da magnitude do sinal através da utilização do chaveamento de transistores bipolar de porta isolada (IGBT). A consequência disso na tensão de saída é uma onda distorcida.

FIGURA 09 – CIRCUITO DO CONVERSOR BUCK-BOOST SIMULADO NO PSCAD

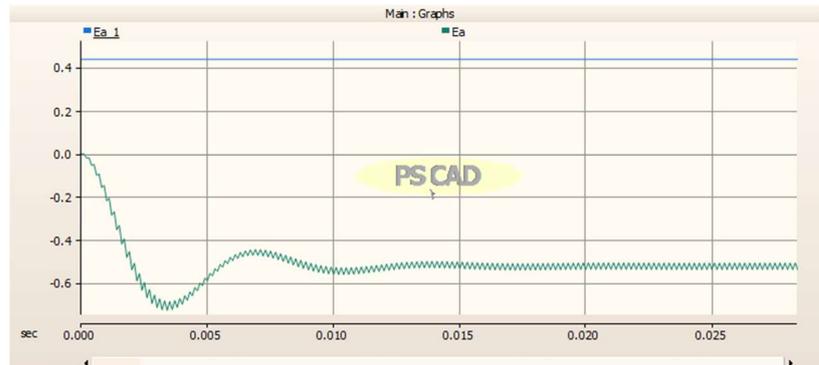


Fonte: O autor.

A Figura 09, por exemplo, apresenta um esquema didático de um conversor "Buck-Boost". Este conversor é projetado para converter uma corrente alternada em uma corrente contínua. No diagrama, uma fonte de tensão ideal fornece 440V, que é posteriormente convertido em uma onda senoidal. O processo de inversão envolve o uso de chaves controladas do tipo IGBT, que "cortam" a onda contínua, resultando em uma onda quadrada. Posteriormente, essa onda quadrada é filtrada por um filtro LC, que elimina as harmônicas indesejadas, resultando em uma onda senoidal pura na saída.

Leão (2014) ressalta que, em sistemas de potência e cargas não lineares, não há componentes contínuos presentes. Além disso, a maioria desses sistemas apresenta apenas harmônicas ímpares. A onda distorcida denota a "inserção" de frequências harmônicas na rede elétrica, considerando uma rede CC. Através de uma simulação no programa PSCAD é possível observar, com o auxílio de um gráfico gerado pelo próprio programa, o comportamento da tensão de saída, em torno de -0.440 kvolts (gráfico em formato de dente de serra na cor verde), através da Figura 10:

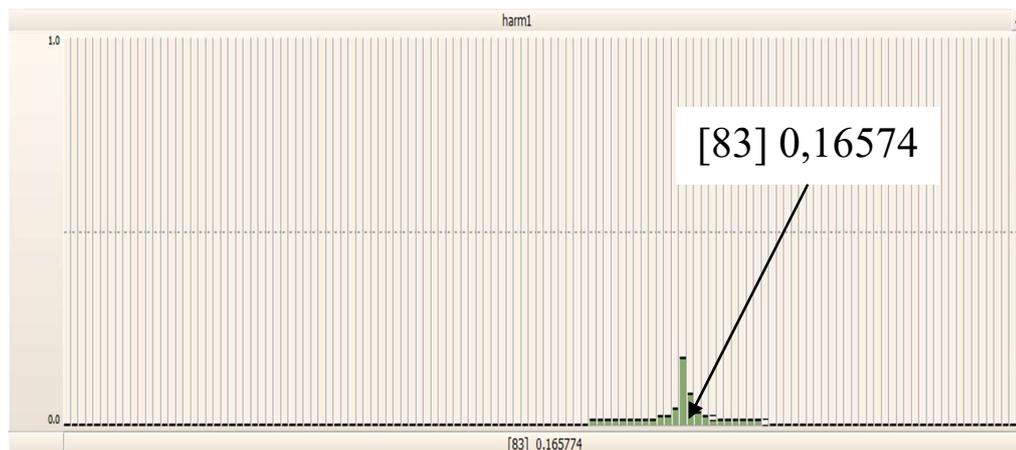
FIGURA 10 – GRÁFICO DO CONVERSOR BUCK-BOOST SIMULADO NO PSCAD



Fonte: O autor.

É possível observar que a tensão de saída não é, necessariamente, contínua. Há uma pequena distorção. Através de uma ferramenta do próprio programa é possível observar a banda de harmônicos (Figura 11) que se forma, em torno da ordem 83 com magnitude de 0,16574.

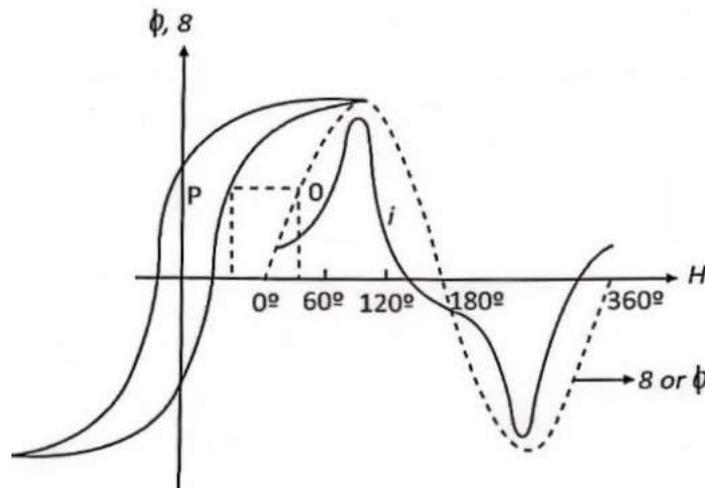
FIGURA 11 – HARMÔNICOS NA TENSÃO DE SAÍDA DE UM CONVERSOR CC “BUCK-BOOST”



Fonte: O autor.

No caso específico de transformadores, Chapman (2013) afirma que a distorção da terceira harmônica de tensão se destaca das demais, podendo atingir magnitudes muito maiores que a própria fundamental. A Figura 12 ilustra como o comportamento não linear da magnetização pode deformar a onda de corrente em comparação a uma puramente senoidal.

FIGURA 12 – CICLO DE HISTERESE E A VARIAÇÃO DO FLUXO MAGNÉTICO EM RELAÇÃO A CORRENTE EM UMA BOBINA



Fonte: Leão, 2014.

Para que uma máquina rotativa CA possa gerar uma tensão perfeitamente senoidal, é imperativo que a força magnetomotriz, gerada pela corrente nos enrolamentos de campo, também seja senoidal. Isso implica que os rotores dessas máquinas devem ser projetados com ranhuras próximas e uniformemente espaçadas, garantindo que os enrolamentos se ajustem de forma ideal, variando senoidalmente em cada ranhura. No entanto, como Chapman (2013) observou, alcançar essa configuração espacial ideal é uma tarefa quase impossível. Isso significa que sempre haverá alguma distorção na forma de onda da tensão induzida, levando à presença de harmônicas, especialmente aquelas de ordem ímpar, devido à simetria ímpar da onda.

Além das máquinas rotativas, os dispositivos a arco são notórios por introduzir flutuações de tensão na rede. Estes dispositivos, que são eletrointensivos, causam perturbações significativas, inserindo harmônicas de forma aleatória durante o ciclo de onda, devido à natureza imprevisível do arco elétrico. No entanto, é relevante mencionar que, a bordo do Navio Patrulha Gurupi, tais dispositivos são praticamente inexistentes, exceto em situações específicas como soldagem ou reparos.

A presença de correntes e tensões harmônicas em um sistema elétrico pode ter uma série de efeitos adversos, que vão desde o sobreaquecimento de componentes até a interferência eletromagnética em equipamentos eletrônicos. Em transformadores, por exemplo, as tensões harmônicas podem causar distorções no ciclo de histerese, afetando a eficiência durante a magnetização do núcleo. As máquinas rotativas, por outro lado, além de enfrentar o

aquecimento devido às perdas ôhmicas, também podem sofrer de torques pulsantes devido à interação dos campos magnéticos gerados pelas harmônicas. Este fenômeno, altamente prejudicial, ocorre porque cada harmônica pode ser representada por uma componente de sequência específica, seja ela positiva, negativa ou zero.

Leão (2014), destacou que as harmônicas em um sistema trifásico podem ser decompostas em componentes de sequência através da teoria das componentes simétricas. Esta análise revela que os campos girantes induzidos por correntes harmônicas de diferentes ordens podem ter direções opostas, resultando em torques opostos no rotor da máquina.

2.1.11.2 Parâmetros mais importantes de medição das harmônicas

A interação entre componentes harmônicas senoidais e a onda de frequência fundamental é um fenômeno complexo que resulta em deformações significativas da forma de onda elétrica. As harmônicas de ordem inferior são particularmente notórias por impor um grau elevado de distorção, enquanto as de ordem superior, situadas entre a 25ª e a 50ª ordem, embora capazes de interferir em sistemas eletrônicos de baixa tensão, são frequentemente desconsideradas em análises convencionais de sistemas elétricos devido ao seu impacto reduzido.

Segundo Dugan (2002), a avaliação precisa da distorção imposta por essas harmônicas é facilitada pelo emprego de indicadores específicos, como a taxa de distorção harmônica individual e total. Estes indicadores, que expressam a distorção em termos percentuais, são fundamentais para avaliar a proporção de tensão de cada componente harmônica, e do conjunto total de harmônicas, em relação à tensão da componente fundamental.

A Distorção Harmônica Total (DHT) é um indicador crítico que revela a extensão da deformação sofrida por uma onda elétrica, expressando essa deformação como uma porcentagem em relação à onda fundamental. O aumento no valor da DHT é indicativo de uma elevação nas magnitudes das componentes harmônicas. Esta elevação, por sua vez, sinaliza uma distorção amplificada da onda elétrica, um fenômeno que requer atenção e análise detalhada. Outra observação importante é que as equações que governam a DHT intencionalmente omitem

o valor de corrente contínua (CC) da onda e qualquer desequilíbrio entre as fases, focando exclusivamente na distorção introduzida pelas componentes harmônicas.

Segundo a norma IEEE Std 519™-2014 define a Distorção Harmônica Total (DHT) de acordo com a equação abaixo:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1}$$

Onde:

DHT_V → Distorção harmônica total para tensão

V_h → Valor de pico ou eficaz da componente de ordem h

V_1 → Valor de pico ou eficaz da componente fundamental

Expressão análoga pode ser escrita para a corrente:

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}}{I_1}$$

Onde:

DHT_I → Distorção harmônica total para corrente

I_h → Valor de pico ou eficaz da componente de ordem h

I_1 → Valor de pico ou eficaz da componente fundamental

Distorção Harmônica Individual (DHI), por outro lado, permite avaliar a contribuição específica de uma única componente harmônica à distorção total da onda. O emprego do DHI pode orientar intervenções corretivas eficazes. Esta pode ser expressa pela equação abaixo:

$$DHI = \frac{C_h}{C_1} \cdot 100\%$$

Onde:

DHI → Distorção harmônica individual

C_h → Componente harmônica de ordem h

C_1 → Componente fundamental

A precisão e especificidade do DHI o tornam uma ferramenta indispensável na busca pela excelência na Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Há também a Taxa de Distorção da Demanda, que indica a taxa percentual da distorção harmônica da corrente em função da máxima demanda de corrente da carga (pico de corrente de demanda, recomendável de um período de pelo menos 12 meses) (IEEE 519-1992, 1992).

$$TDD\% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_L} * 100$$

Onde $I_n = 1, 2, \dots$ é o valor RMS total de todos os componentes harmônicos presentes na onda, e I_L o valor RMS da máxima demanda de corrente da carga.

2.1.11.3 Soluções para as harmônicas

A atenuação dos efeitos das componentes harmônicas é uma questão que pode ser realizada de diversas formas, cuja abordagem exige uma análise criteriosa e adaptativa. Martinho (2013) enfatiza que a estratégia de atenuação é intrinsecamente dependente da natureza específica da instalação, do tipo de interferência em questão e das implicações financeiras associadas à implementação de soluções corretivas. Neste contexto, faz-se necessário uma avaliação rigorosa e meticulosa da influência individual de cada componente harmônica, bem como de sua proveniência dentro do sistema.

Leão (2014), destaca que as estratégias de mitigação mais prevalentes visam reduzir ou erradicar diretamente a influência da componente harmônica, alterar a resposta em frequência do sistema, ou instalar filtros de frequência específicos. Cada abordagem requer um diagnóstico detalhado e uma compreensão profunda da origem e do impacto da harmônica em questão.

No contexto de motores de indução, por exemplo, a distribuição dos enrolamentos de armadura e a fracionamento das bobinas são projetados, de forma, a atenuar os efeitos das harmônicas ímpares, especialmente aquelas de ordem inferior. Esta prática, que tem implicações diretas na qualidade da tensão induzida, é um testemunho da importância da engenharia elétrica sofisticada na otimização da performance do sistema. Além disso, para

Chapman (2013), as estratégias como o agrupamento de conversores e a implementação de conexões otimizadas de transformadores e máquinas síncronas, complementadas por um aterramento sólido eficaz, são opções válidas no processo de atenuação das harmônicas.

A resposta em frequência, conforme descrito por Leão (2014), é uma função de transferência no domínio da frequência. A ressonância, resultante do alinhamento de uma frequência harmônica com uma frequência natural do sistema, é identificada como um catalisador de distorções harmônicas elevadas. A manipulação da resposta em frequência, influenciada pela impedância indutiva equivalente do sistema, os cabos, a carga da rede e a presença de bancos de capacitores, são estratégias que contribuem na mitigação harmônica.

Os filtros, sejam eles passivos, ativos ou híbridos, são instrumentos essenciais na seleção e permissão da passagem de frequências específicas, atuando como barreiras para outras. Os filtros passivos são caracterizados pela combinação de capacitores, indutores e resistências e permitem a manipulação da faixa de frequência do sistema. Já os filtros ativos, são mais onerosos e complexos por possuírem em sua estrutura elementos de eletrônica de potência, no entanto, por possuírem estas características podem oferecer seletividade na frequência de corte. Os filtros híbridos possuem características dos filtros passivo e ativos.

3 NORMAS REGULAMENTARES RELACIONADAS A QEE

A qualidade da energia elétrica é de suma importância para garantir a operação segura e eficiente de sistemas elétricos e eletrônicos. Para assegurar que os parâmetros elétricos permaneçam dentro de limites aceitáveis, diversas normas foram estabelecidas tanto em nível nacional quanto internacional. Estas normas servem como diretrizes para a operação, manutenção e design de sistemas elétricos.

Internacionalmente, das instituições no campo da engenharia elétrica e eletrônica são a IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e a IEC (International Electrotechnical Commission). Ambas as instituições conduzem pesquisas extensivas e colaboram com engenheiros e cientistas de todo o mundo para desenvolver padrões que abordam diversos aspectos da engenharia elétrica. Por exemplo, a norma IEEE Std 519-2014 é um padrão que fornece definições e diretrizes sobre qualidade de energia. Já a IEC 61010-1 é

um padrão que estabelece requisitos de segurança para equipamentos de medição de parâmetros elétricos, garantindo que tais dispositivos operem de maneira segura e confiável.

No contexto nacional, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desempenha um papel fundamental na regulamentação da qualidade da energia elétrica. Através do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), especificamente em seu capítulo 8, a ANEEL define limites para instalações de terra e destaca a necessidade de manter a qualidade do serviço elétrico. Um dos critérios estabelecidos é que as instalações elétricas devem operar com um fator de potência de no mínimo 0,92, garantindo assim a eficiência e segurança do sistema.

No entanto, quando se trata da Marinha de Guerra do Brasil, as normas estabelecidas pela ANEEL não são diretamente aplicáveis. Isso se deve ao fato de que os navios de guerra possuem características e necessidades únicas, incluindo sistemas de armamentos avançados e equipamentos de combate especializados. De acordo com Reis (2020), a norma que rege a qualidade da energia elétrica em navios de guerra é a Engenalmarinst 30-08A. Esta norma foi emitida pela Diretoria de Engenharia Naval (DEN) e foi desenvolvida especificamente para abordar as peculiaridades e requisitos dos navios de guerra brasileiros.

Dentre as normas regulamentares que abordam o conceito de harmônicos em instalações elétricas as principais a serem consideradas num estudo de uma planta industrial advêm da principal comissão mundial de normas regulamentares IEC (International Electrotechnical Commission) e da principal organização voltada ao aperfeiçoamento da tecnologia relacionada à eletricidade IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) (SANTOS, 2007).

Para a realização do estudo de caso e análise dos dados obtidos do Navio Patrulha Gurupi, as seguintes normas, serão utilizadas como referências:

- a) ENGENALMARINST 30-08A – Qualidade da Energia Elétrica em Corrente Alternada (CA) e Corrente Contínua (CC) para os utilizadores em navios de superfície da Marinha do Brasil;
- b) IEC 61000; e

- c) IEEE Std 519™-2014 – *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*;

3.1 Engenalmarinst N°30-08A

A Diretoria de Engenharia Naval (DEN), emitiu a norma Engenalmarinst 30-08A com o objetivo primordial de estabelecer padrões para a qualidade da energia elétrica fornecida, a bordo dos navios da Marinha do Brasil (MB). Esta norma não só define os parâmetros de qualidade da energia, mas também fornece diretrizes claras para adaptar os sistemas de geração de energia dos navios sempre que houver necessidade de realizar modificações ou melhorias nos sistemas existentes.

A elaboração da Engenalmarinst 30-08A foi influenciada por várias normas e padrões reconhecidos internacionalmente. Entre eles, destaca-se a ABNT NBR 5456:2010, que fornece terminologias gerais relacionadas à eletricidade. Além disso, a norma Stanag 1008 N° 9, que detalha as características dos sistemas elétricos de navios de guerra dos países membros da OTAN (Organização do Tratado do Atlântico Norte), e a MIL-STD-1399 (Navy), que é uma norma militar dos Estados Unidos, tiveram um papel significativo na formação da norma brasileira, sendo esta última a mais influente no processo.

A DEN, como órgão técnico especializado da Marinha do Brasil, assume a responsabilidade de estabelecer padrões e diretrizes para o uso seguro e eficiente da eletricidade, tanto em corrente alternada quanto contínua, nos navios de guerra brasileiros. Esta normalização é essencial para garantir a operação segura e eficaz dos sistemas elétricos a bordo, considerando as demandas específicas e desafios enfrentados pelos navios de guerra.

Dentro da norma Engenalmarinst 30-08A, são estabelecidos diferentes categorias de energia. A "Energia tipo I", conforme descrito no quadro 2.2, é identificada como a principal fonte de energia do navio, operando a 440 Volts, 60 Hz, em um sistema trifásico não aterrado. Além disso, a norma também define outras categorias, como "Energia tipo II" e "Energia tipo III", que são especificamente designadas para equipamentos especiais, como conversores e agulhas giroscópicas, que operam a uma frequência de 400 Hz.

QUADRO 2.1 – CARACTERÍSTICAS E LIMITES PARA ALIMENTAÇÃO “TIPO I”

CARACTERÍSTICAS	LIMITES
TENSÃO	
1) Tensão nominal no utilizador	440, 220 ou 115 volts (Eficaz)
2) Desequilíbrio entre tensões de linha (cargas trifásicas)	3%
3) Tolerâncias da tensão no utilizador (em relação a Vnom)	
a) Média das três tensões de linha a partir da nominal	± 5%
b) Valor de qualquer uma das tensões de linha, a partir da tensão nominal, incluindo os itens 2) e 3.a)	± 7%
4) Modulação de tensão	2%
5) Tolerância para transitórios de tensão	± 16%
6) Pior caso de variação da tensão nominal do utilizador, resultante de 2), 3.a), 3.b), 4 e 5 combinados, exceto sob condições de emergência	± 20%
7) Tempo de estabilização referentes aos itens 5) e 6)	2 segundos
8) Valor de pico dos transitórios de tensão de curta duração	2,5kV (440Vrms) 1,0kV (115Vrms)
FORMA DE ONDA DA TENSÃO	
9) Distorção harmônica total	5%
10) Harmônico individual máximo	3%
11) Fator de desvio	5%
FREQUÊNCIA	
12) Frequência nominal	60 hertz
13) Tolerância de frequência	± 3%
14) Modulação de frequência	0,5%
15) Transitório de frequência	± 4%
16) Pior caso de variação da frequência nominal do utilizador, resultante de 13), 14) e 15) combinados, exceto sob condições de emergência	± 5,5%
17) Tempo de estabilização dos transitórios de frequência	2 segundos
CONDIÇÕES DE EMERGÊNCIA	
18) Variação de tensão	-100% à +35%
19) Duração da variação de tensão	2 minutos
20) Variação de frequência	-100% à +12%
21) Duração da variação de frequência	2 minutos

Fonte: Norma Engenalmarinst 30-08A, 2019.

3.2 IEC 61000

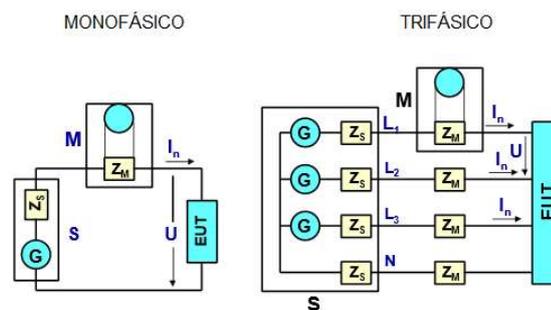
A International Electrotechnical Commission (IEC) é uma comissão mundial fundada em 1906 com o objetivo de preparar e publicar normas regulamentares para todas as tecnologias que estão relacionadas às áreas de elétrica, eletrotécnica e eletrônica. Todas as regulamentações são padronizadas de acordo com consenso realizado pelos membros da comissão para atender aos interesses e desenvolvimento dos profissionais da área (IEC, 2023).

Deve ser considerado que não existem regulamentações envolvendo harmônicos na rede elétrica que podem ser consideradas como permanentes, mas como uma avaliação dos requisitos de uma instalação, levando em conta que técnicas de análise vão sendo aprimoradas e os padrões precisam ser atualizados.

Os documentos referentes à padronização de harmônicos são pertencentes à seção IEC 61000, que especifica detalhadamente todas as informações (ARRILAGA, 2003).

- a. IEC 61000 1-4: Regulamenta a emissão de correntes harmônicas de equipamentos que possuem frequência de operação até 2 kHz;
- b. IEC 61000 2-1: Descreve e divide as principais fontes de harmônicos no sistema em três categorias: Equipamentos de potência, cargas industriais e cargas residenciais;
- c. IEC 61000 2-2: Possui uma seção sobre níveis de compatibilidade de distorções harmônicas de tensão em instalações industriais de baixa tensão;
- d. IEC 61000 2-4: Regulamentação sobre compatibilidade de harmônicos para plantas industriais. Também descreve os principais efeitos e causas;
- e. IEC 61000 3-2: Principais normas que abordam limites para correntes harmônicas na entrada, sendo a corrente de entrada em equipamentos menor ou igual a 16 A por fase. Esses limites são os máximos de harmônicos de corrente produzidos que podem circular, considerando equipamentos elétricos e eletrônicos com alimentação a partir de 220 V, sendo os com tensão menor sem limites definidos.

FIGURA 13 – MEDIÇÃO DE CIRCUITOS MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS PELA NORMA IEC 61000 3-2.



Fonte: Pomilio, 2005.

A Figura 13 ilustra como é feita a medição nos equipamentos pertencentes aos padrões da norma, medindo somente uma fase.

Os equipamentos são classificados em quatro categorias:

- a. Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada; aparelhos de uso doméstico, excluindo os da classe D; ferramentas, exceto as portáteis; “dimmers” para lâmpadas incandescentes; equipamentos de áudio e todos os demais não incluídos nas classes seguintes.
- b. Classe B: Ferramentas portáteis e equipamentos de soldagem de uso não industrial.
- c. Classe C: Dispositivos de iluminação.
- d. Classe D: Computadores pessoais, monitores de vídeo, aparelhos de televisão, refrigeradores e freezers (desde que possuam inversor para acionamento do motor do compressor). A potência ativa de entrada deve ser igual ou inferior a 600 W, medida

feita obedecendo às condições de ensaio estabelecidas na norma (que variam de acordo com o tipo de equipamento).

A inclusão apenas destes aparelhos como classe D deve-se ao fato de seu uso se dar em larga escala e ser difundido por todo sistema. Outros equipamentos poderão ser incluídos nesta categoria caso passem a apresentar tais características. (IEC 61000 3-2, 2014).

3.3 IEEE Std 519™-2014

A IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) é uma renomada organização internacional composta por uma diversidade de profissionais, incluindo engenheiros de várias disciplinas, acadêmicos e representantes de entidades reguladoras. Esta instituição se dedica ao avanço da engenharia elétrica e eletrônica, promovendo a inovação, a pesquisa e o desenvolvimento de normas práticas. Através de grupos de trabalho especializados, a IEEE contribui significativamente para a evolução contínua das práticas e tecnologias, garantindo que sejam não apenas atuais, mas também otimizadas para eficiência e segurança.

A norma específica da IEEE em destaque foi projetada para estabelecer limites claros para a Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_V) e a Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT_I) nas redes elétricas. O objetivo primordial é mitigar os efeitos adversos induzidos por cargas não lineares. A norma enfatiza uma divisão estratégica de responsabilidades, onde a empresa fornecedora de energia é incumbida da manutenção adequada da tensão, enquanto o usuário final é responsável por monitorar e controlar a corrente harmônica injetada no sistema. Esta abordagem colaborativa é essencial para assegurar a integridade, a eficiência e a segurança das redes elétricas.

As medições críticas das grandezas elétricas, conforme estipulado pela norma, são executadas no *Point of Common Coupling* (PCC). Este ponto de medição é estrategicamente selecionado, pois é onde o equipamento ou o usuário está mais intimamente conectado à rede de distribuição. A precisão e a confiabilidade das medições são cruciais para garantir que as operações elétricas sejam conduzidas dentro dos limites estabelecidos, minimizando assim os riscos associados às distorções harmônicas.

A norma fornece metodologias detalhadas para a extração dos valores indicadores de DHT_V e DHT_I . Estas metodologias são divididas em três casos:

1. CASO: as medições devem ocorrer num período de sete dias consecutivos e com o equipamento de medição configurado para um intervalo de integração de dados de dez minutos. Ao final, o percentil de 95% dos valores de DHT_V e DHT_I deverão ser menores que os valores indicados nos Quadros 3.1 e 3.2;
2. CASO: as medições ocorrem num período de 24 horas e com o equipamento de medição configurado para um intervalo de integração de dados de três segundos. Ao final, o percentil de 99% dos valores de DHI_V e DHT_V deverão ser menores que os valores indicados no Quadro 3.1 multiplicados por 1,5, enquanto o percentil de 99% dos valores de DHT_I e DHI_I deverão ser menores que os valores indicados no Quadro 3.2 multiplicados por 2;
3. CASO: as medições devem ocorrer num período de sete dias, para um intervalo de integração de dados de dez minutos, porém os valores de percentil de 99% dos valores de DHT_I e DHI_I deverão ser menores que os valores indicados nas Quadro 3.2 multiplicados por 1,5.

Os Quadros 3.1 e 3.2 mostram os limites de DHT_V , DHT_I , DHI_V e DHI_I estabelecidos pela norma em questão:

QUADRO 3.1 – LIMITES MÁXIMO DE TENSÃO HARMÔNICA INDIVIDUAL E TOTAL

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV $< V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV $< V \leq 161$ kV	1.5	2.5
161 kV $< V$	1.0	1.5

Fonte: IEEE Std 519™-2014.

QUADRO 3.2 – LIMITES PARA DHI_I EM % PARA SISTEMAS DE 120 V A 69 KV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics)						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 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

Fonte: IEEE Std 519™-2014.

Os limites de Distorção Harmônica Individual de Corrente (DHI_I) são estabelecidos considerando a razão I_{SC}/I_L , onde I_{SC} é a corrente de curto-circuito e I_L é a corrente nominal no PCC, determinada ao longo de um ano. A norma especifica que as harmônicas de ordens pares devem ser limitadas a 25% da magnitude das harmônicas de ordem ímpar.

4 DADOS DO NAVIO E PESQUISA DE CAMPO

O conteúdo desta seção visa-se elucidar a metodologia de medição de grandezas elétricas no Navio Patrulha Gurupi (NPa Gurupi), enfatizando seu sistema elétrico e cargas operacionais. A utilização do analisador Fluke 432 série II é discutida em detalhes, assim como sua importância nas medições. A análise da Qualidade da Energia Elétrica é essencial para compreender a energia do navio e otimizar a interpretação dos dados coletados.

4.1 Carga Analisada: NPa Gurupi

O NPa Gurupi foi ordenado em 1994 como parte do quarto lote de duas unidades da sua classe, foi construído no estaleiro Peenewerft GmbH em Wolgast, na Alemanha, o projeto é do estaleiro Vosper-QAF de Singapura. O meio foi lançado ao mar em 6 de setembro de 1995 e incorporado à Armada em 23 de abril de 1996, compondo a flotilha do Comando do Grupamento de Patrulha Naval do Sudeste (ComGptPatNavSE), sediada no 1º Distrito Naval. Esta belonave tem como missão a Inspeção Naval, a Patrulha Naval, a Salvaguarda da Vida Humana no Mar, e a Fiscalização das Águas Territoriais Brasileiras.

O diferencial do navio é sua excelente capacidade de manobra. Sua principal característica é a possibilidade de realizar a inspeção, patrulha naval, e principalmente busca, salvamento e resgate (SAR) de vidas humanas no mar. Atualmente, o navio possui as seguintes características:

- a) Deslocamento: 197 ton (padrão), 217 ton (carregado);
- b) Dimensões (metros): comprimento 46,5 m; largura 7,5m; calado 2,3m;
- c) Velocidade (nós): 26 (máxima) de projeto; 12 (máxima) atual;
- d) Propulsão: 2 motores diesel MTU 16V396TB94 de 2.044 KW cada motor;
- e) Combustível: 25 toneladas de capacidade;
- f) Autonomia: 3.000 milhas náuticas a 12 nós, 5 dias em operação contínua;
- g) Sistema Elétrico: 3 motores de combustão auxiliares (MCAs), MTU 6R095TB52, fornecendo no total de 300 KW, sendo 100 KW por MCA.
- h) Armamento: 1 canhão Bofors L/70 40mm com 12 km de alcance, 2 canhões Oerlikon/BMARC 20mm com 2 km de alcance, em dois reparos simples;
- i) Tripulação: 32 militares, sendo 5 oficiais 27 praças;

- j) Equipamentos: 1 lancha tipo (RHIB), para 10 homens; 1 bote inflável para 6 homens; 1 guindaste para 620 kg; e
- k) Navegação: 1 Radar Furuno, com raio máximo de detecção de 20 milhas náuticas.

Este navio pertence a Classe Grajaú e assim como os outros de sua classe, encontra-se a bastante tempo em operatividade, são cerca de 28 anos de fase operativa, e ao longo destes anos, de acordo com os registros dos livros históricos dos equipamentos a bordo, deixou de realizar ou realizou de forma atrasada os períodos de docagem pré-determinado pelo do ciclo de vida do meio, estes períodos são exclusivos para manutenção específica da estrutura do meio e de seus equipamentos vitais. Este fato gera alguns desafios em termos de manutenção, alguns equipamentos do seu projeto original, precisaram ser substituídos ou modernizados. Tal fato é importante para entender a real situação da QEE a bordo e a dificuldade em analisar, diagnosticar e apresentar soluções para seus problemas.

FIGURA 14 – O NAVIO PATRULHA GURUPI ATRACADO NO CAIS DA PORTUGUESA



Fonte: O autor.

4.1.1 Rede de distribuição elétrica do navio

A rede elétrica do navio pode ser descrita como segregada. O navio possui três geradores idênticos, cada um acionado por um motor de combustão auxiliar (MCA) próprio, sendo dois geradores situados na Praça de Máquinas e o terceiro no compartimento do diesel gerador de emergência. O Quadro 4.1 mostra os dados de placa de cada gerador:

TABELA 4.1 – DADOS DE PLACA DO GERADOR AVK

Informações	Dados
Fabricante	<i>AVK - Equacional</i>
Potência nominal	100 kW
Tensão nominal de linha	450 V
Corrente máxima	160 A
Frequência	60 Hz
Nº de fases	Trifásico e sem neutro
Tipo de fechamento	Y
Temperatura de funcionamento	85° C
Fator de potência	0.8
Quantidade de polos	4
Tipo	<i>Brushless Thyripart</i>

Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados do Livro do navio, 1994.

FIGURA 15 – CONJUNTO MOTOR-GERADOR



Fonte: O autor.

FIGURA 16 – QUADRO ELÉTRICO PRINCIPAL

Fonte: O autor.

FIGURA 17 – QUADRO ELÉTRICO AUXILIAR

Fonte: O autor.

As informações descritas nos tópicos a seguir foram baseadas de trechos traduzidos do (Livro do Navio, 1994. Capítulo. 14) e editadas, com base na experiência de “bordo” adquiridas pelo autor deste trabalho.

O navio possui duas estações geradoras designadas como estações principal e auxiliar. A estação principal possui dois grupos geradores a diesel de 125 kVA localizados na Praça de Máquinas e conectados ao quadro principal. A estação geradora auxiliar possui apenas

um grupo gerador de 125 kVA localizado no Compartimento Gerador Auxiliar, conectado ao quadro auxiliar. Os principais equipamentos relacionados a rede elétrica do navio são distribuídos da seguinte forma:

1. Conversores:

1.1. Transformadores para o sistema de energia e iluminação:

- a) um transformador 440 V/120 V - 20 kVA - trifásico - 60 Hz (para alimentação da seção de distribuição do quadro principal "C" 115 V/60 Hz)
- b) um transformador 440 V/120 V - 15 kVA - trifásico - 60 Hz (para alimentação da seção de distribuição do quadro principal "B" 115 V/60 Hz)

1.2. Dois sistemas retificadores e carregadores de baterias de 24 Vcc, montados em dois racks, constituídos pelos seguintes equipamentos/características:

- a) uma para alimentação elétrica do sistema de uso geral - 440V 60Hz/24Vdc, trifásico, 8kVA, 200A.
- b) um para alimentação elétrica do sistema de comunicação - 440V 60Hz/24Vdc, trifásico, 8kVA, 2,7 kVA.

1.3. Sistema conversor de frequência 120V/400 Hz:

- a) um conversor de frequência bifásico 440V, 60Hz/120V, 400Hz, 1kVA, localizado no CIC.

2. Baterias e retificadores de carregador

Todo o sistema 24 Vcc é alimentado pelo retificador/carregador de baterias de uso geral e comunicação, instalados em dois gabinetes, localizados no compartimento do ar-condicionado. Cada retificador é alimentado pelo sistema 440V/60Hz (3 fases) através da chave elétrica principal. Os retificadores de 24 Vcc alimentam as cargas consumidoras de corrente contínua do navio, mantendo as baterias em carga/carga flutuante. Além disso, mantêm a tensão dos consumidores dentro dos limites especificados, e limitam automaticamente a tensão de saída durante o processo de recarga profunda. Os circuitos normalmente são alimentados eletricamente através dos retificadores 440V/24Vdc, e através de grupos de baterias em caso de alguma falha. Os grupos de baterias dos sistemas de comunicação e uso geral estão localizados no compartimento da bateria.

3. Sistema 440 Vca

Os circuitos de alimentação do navio são de 440V, trifásicos, 60Hz, alimentados por grupos geradores diesel principais, grupos geradores auxiliares diesel e por energia proveniente da alimentação de terra através de caixas de junção de energia. Estas caixas estão localizadas no convés principal e são do tipo: trifásicas, 440V/60Hz, com capacidade dos terminais do bloco de até 150A.

A energia elétrica é distribuída aos circuitos de potência pelos quadros elétricos do navio, que alimentam as seguintes cargas consumidoras, conforme ilustrado nas Figura 18, 19, 20, 21 e 22.

O navio possui dois quadros elétricos sendo eles: o quadro principal (QEP) e o quadro auxiliar (QEA), sendo que o primeiro está localizado no Centro de Controle de Máquinas e o segundo está localizado no Compartimento do Gerador de Emergência.

3.1. Equipamentos alimentados pelo QEP:

O quadro principal tem oito seções: seção de distribuição 440V/60Hz (seção A), seção de distribuição 440V/60 Hz (seção B), seção de distribuição 115 V/60Hz (seção C), seção de conexão do gerador G1, seção de conexão do gerador G2, seção de sincronismo, seção de interconexão de chaves e seção de caixas de conexão de alimentação de cais.

FIGURA 18 – EQUIPAMENTOS ALIMENTADOS SEÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO "A" DO QEP

"A" distribution section - 440 V/60 Hz		
- Fire/bilge pump #1 - motor starter	(Q1)	G1 generator section:
- Steering gear unit #1 - controller	(Q2)	
- Sewage treatment plant - Controller	(Q3)	
- Water heater #1 - Switch gear	(Q4)	-G1 generator circuit breaker (Q21)
- Machine Room VM-04 fan - motor starter	(Q5)	
- Hydrofor pumps #1+2 motor starter	(Q6)	Synchronism section:
- Sewage pump #1 - motor starter	(Q7)	
- Controller fresh water generator #1	(Q8)	-Connection circuit breaker. (Q22)
- Motor starter cooling water pump provision cooling plant	(Q9)	
- Switchboard provision cooling plant	(Q10)	G2 Generator section:
- Controller capstan	(Q11)	
- Electric stove	(Q12)	-G2 generator circuit breaker (Q23)
- Distribution box mixer and bainmarie	(Q13)	
- Two-chamber oven	(Q14)	Interconnection section:
- CB/RSC battery charger communication	(Q15)	
- CB/RUG battery charger general use	(Q16)	-QEP / QEA inter-connection circuit breaker (Q25)
- Coolant preheating unit #1	(Q17)	
- Motor starter fuel feed pumps (pump #1)	(Q18)	Shore electrical power supply section:
- Starter equipment SUE-VSP engine #1(pre-lubrication pump)	(Q19)	- Shore power supply #1 (Q24)
- Transformer 440/115 V-20 kVA	(Q20)	- Shore power supply #2 (Q25)
		- Ships'alongside power supply #1 (Q24A)
		- Ships'alongside power supply #2 (Q24A)

Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados do Livro do Navio, 1994.

FIGURA 19 – EQUIPAMENTOS ALIMENTADOS SEÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO "B" DO QEP

"B" distribution section - 440 V / 60 Hz	
- VM/EM 05 Machine Room fan - electrical motor starter	(Q27)
- Sewage pump #2 - electrical motor starter	(Q28)
- Fresh water generator #2 - Controller	(Q29)
- Air conditioning plant - Controller	(Q30)
- Water heater #2- Switch gear	(Q31)
- Diving air compressor - Controller	(Q32)
- Steering gear unit #2 - Controller	(Q33)
- Fire/bilge pump #2 - electrical motor starter	(Q34)
- Bilge water separator - Power supply circuit	(Q35)
- Portable pumps - QLBS distribution circuit	(Q36)
- QDVE fan distribution circuit	(Q37)
- Derrick hydraulic unit - Controller	(Q38)
- Navigation radar- Distribution box	(Q39)
- Air conditioning cooling water pump- Motor starter	(Q40)
- Coolant preheating unit #2	(Q41)
- Pre-lubrication pump SUE-VSP engine #2- starter	(Q42)
- Fuel oil pump (pump #2)- Motor starter	(Q43)
- Air conditioning plant - Controller	(Q44)

Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados do LIVRO DO NAVIO, 1994.

A seção de distribuição QEP 115V/60Hz (secção C) é alimentada por um transformador ligado à seção de distribuição 440V/60Hz (secção B).

FIGURA 20 – EQUIPAMENTOS ALIMENTADOS SEÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO "C" DO QEP

"C" distribution section - 115 V / 60 Hz:	
- 20 kVA 440V/115V Transformer	(Q45)
- Lighting distribution panel #1-QDL 1	(Q46)
- Socket distribution panel -QDT	(Q47)
- Opendeck lighting distribution panel - QLE	(Q48)
- Communication distribution panel - QDC	(Q49)
- Battery charger - general(fault relay)CB/RUG	(Q50)
- Spare	(Q51)
- Spare	(Q52)

Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados do Livro do Navio, 1994.

3.2. Equipamentos alimentados pelo QEA:

O quadro auxiliar possui quatro seções: seção de distribuição 440V/60Hz (seção A), seção de distribuição 115V/60 Hz, seção de carga (seção B), seção de conexão do gerador auxiliar e seção de interconexão de chaves.

FIGURA 21 – EQUIPAMENOS ALIMENTADOS SEÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO "A" DO QEA

"A" 440 V /60 Hz distribution section:	
- Fire/bilge pump #1 - Motorstarter	(Q3)
- Motorstarter Fire/bilge pump #2 - Motorstarter	(Q4)
- Steering gear unit #1 - Controller	(Q5)
- Steering gear unit #2 -Controller	(Q6)
- 400Hz Static converter - distribution panel	(Q7)
- Bofors'40 mm gun - panel	(Q8)
- Air conditioning plant - Controller	(Q29)
- Compressor pressure switch	(Q10)
- 15kVA 440/115V Transformer	(Q11)
- Distribution box- CTOC	(Q11A)
- Water pump #1+2 auxiliary generator - Motor starter	(Q11B)
- Spare	(Q11C)
Interconnection section:	
-QEA/QEP interconnection circuit breaker	(Q2)
Auxiliary generator section:	
-Auxiliary generator circuit breaker	(Q1)

Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados do Livro do navio, 1994.

A seção de distribuição QEA 115V/60Hz (seção B) é alimentada por um transformador conectado à seção de distribuição 440V/60Hz (seção A).

FIGURA 22 – EQUIPAMENOS ALIMENTADOS SEÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO "B" DO QEA

"B" distribution section - 115 V/ 60 Hz	
- 15kVA 440/115V - Transformer	(Q12)
- QDL 2 lighting distribution panel #2	(Q13)
- QDN navigation distribution panel	(Q14)
- Transformer rectifier unit(nav/sign light distr board PLN)	(Q15)
- QDC communication distribution panel	(Q16)
- QTC galley distribution panel	(Q17)
- CB/RUG battery charger general (fault relay)	(Q18)
- Spare	(Q19)
- Spare	(Q19A)

Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados do Livro do Navio, 1994.

4. Sistema 115 Vca

A distribuição de 115V/60Hz as diversas cargas consumidoras e aos quadros de distribuição é efetuada diretamente a partir da seção de 115 V do quadro principal (QEP) e do quadro auxiliar (QEA). Cada seção do quadro elétrico é alimentada por um transformador trifásico.

5. Sistema de distribuição 115V/400 Hz

O sistema de distribuição 115V/400 Hz é alimentado eletricamente pelo conversor de frequência estático que efetua diretamente o fornecimento de energia para as respectivas cargas consumidoras desta energia.

6. Sistema 24 Vcc

O navio possui cinco unidades retificadoras rotativas "brushless" de 24 Vcc, sendo três unidades compostas por retificadores rotativos "brushless", duas destas unidades são acionadas cada uma pelo respectivo MCP e a terceira acionada pelo MCA de emergência. As outras duas unidades são compostas por retificadores/carregadores estáticos, que são utilizados para uso geral e sistemas de comunicação.

Os retificadores/carregadores do sistema de uso geral e comunicação alimentam as cargas as consumidoras de 24 Vdc, incluindo uma potência de reserva de 15%, e, ao mesmo tempo, possuem capacidade para carregar o sistema de baterias, em um período máximo de 10 horas, considerando o sistema de baterias totalmente descarregado.

Os retificadores/carregadores de baterias estáticas de uso geral e dos sistemas de comunicação são instalados no compartimento de ar-condicionado e são alimentados pelo quadro elétrico principal - 440 V/ 60 Hz seção "A".

O sistema é controlado e operado remotamente pelo Console Primário de Controle, localizado no CCM. Sua operação permite que sejam realizadas manobras com os geradores e disjuntores, partida dos MCA. Nas condições originais de projeto dos equipamentos, era possível realizar: ajustes de frequência, paralelismo entre geradores e procedimentos operativos, como a redução de carga em emergência. No entanto, devido ao desgaste e falta de alguns componentes do QEP, como disjuntores automáticos, contadoras e outros relacionados a seção de sincronismo, atualmente, não é possível realizar o sincronismo e paralelismo entre os geradores, estes equipamentos estão operando, apenas, individualmente. O navio possui duplicidade em praticamente todos os equipamentos vitais e iluminação.

Este tópico, as características abordadas e em que condições são empregadas as cargas referentes a rede elétrica do navio, é fundamental e possibilita, do ponto de vista da carga, ter uma melhor análise das medições, contribuindo na compreensão dos possíveis efeitos que podem estar influenciando na QEE.

4.1.2 Condições de operação e equipamentos de bordo

A carga de projeto do navio para cada condição operativa pode ser vista na Tabela 4.2:

TABELA 4.2 – DEMANDA DE CARGA DE PROJETO DO NAVIO

Condição de operação	Carga em kW
Regime de Porto – Rotina Normal	78,27
Fundeado	81,04
Cruzeiro Normal	84,3
Cruzeiro Patrulha	85,4

Fonte: O autor.

Apesar dos dados indicados em manual, o histórico recente do navio, apresentado na Tabela 4.3, mostra as seguintes configurações de carga durante as diferentes condições operativas:

TABELA 4.3 – DEMANDA DE CARGA ATUAL DO NAVIO

Condição de operação	Carga em kW
Regime de Porto – Rotina Normal	70
Fundeado	75
Cruzeiro Normal	80
Cruzeiro Patrulha	83

Fonte: O autor.

A doutrina operacional do navio, conforme as publicações internas, estabelece diferentes modos de geração de energia baseados nas condições operacionais. Quando atracado, o navio utiliza energia terrestre, seja durante o dia ou à noite. Durante a navegação em mar aberto em condição de cruzeiro, um gerador é utilizado, enquanto dois geradores são necessários em situações táticas específicas.

A distribuição de energia aos equipamentos a bordo é determinada pela prioridade estabelecida pelo Comandante. Atracado, a prioridade é dada ao Controle de Avarias (CAV), segurança do material e pessoal, e manutenção da flutuabilidade e estanqueidade do navio, sendo estas responsabilidades do pessoal de serviço. Geralmente, a energia do cais é utilizada, mas a energia de bordo pode ser empregada para manutenção ou em situações de emergência.

Em situações de cruzeiro de guerra ou postos de combate, as prioridades se expandem para incluir operações de combate e navegação segura, além da segurança do pessoal e material. O Quadro 4.1 detalha os principais equipamentos, suas tensões nominais e as condições operacionais específicas em que estão em operação.

QUADRO 4.1 – CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS

Equipamento	Tensão nominal	Navio no porto	Navio no mar
Compressor Ar Respirável¹	220V (Trifásico)	Sim ¹	Sim ¹
Bomba de esgoto e incêndio	440V	Sim	Sim
Frigorífica	440V	Sim	Sim
Bombas Aguada	440V	Sim	Sim
Sistema de Governo	24V	Não	Sim
Bomba da UTAS¹	440V	Sim ¹	Sim ¹
Equipamento de Comunicação	115V/24V	Não	Sim
Bombas Submersíveis¹	440V/220V	Sim	Sim ¹
Equipamento de Conforto e Administração	220V/115V	Sim	Sim
Motores de Ventilação e Extração Praça de Máquinas	440V	Não	Sim
Ventilação Geral do navio	440V	Sim	Sim
Ventilação do Compartimento DGE¹	440V	Não	Sim ¹
Ventilação e Extração da Cozinha¹	440V	Sim ¹	Sim ¹
Compressores do Ar-Condicionado	440V	Sim	Sim
Compressor de Ar	220V	Não	Sim ¹
Iluminação	115V	Sim	Sim
Radar	115V	Não	Sim
Bombas Sistema de Governo (Máq. Leme)	440V	Não	Sim
Compressor Ar de Comando	115V	Não	Sim
Bomba Hidráulica Guindaste¹	440V	Não	Sim ¹
Motor elétrico Cabrestante¹	440V	Não	Sim ¹

Fonte: O autor.

¹ Seu uso varia de acordo com necessidade operativa. Não permanecem o tempo todo na linha.

Dessa forma, considerando as características de cada um desses equipamentos, o livro histórico da Incumbência de Geração e Distribuição e os problemas relacionados à QEE abordados durante o referencial teórico, pode-se montar a Quadro 4.2, que relaciona as principais fontes e problemas de QEE que podem ser encontrados a bordo ou que já possuem um histórico ou registro de ocorrência a bordo:

QUADRO 4.2 – PRINCIPAIS PROBLEMAS DE QEE OBSERVADOS A BORDO

Equipamentos / Sistema	Problema de QEE	Condição de Operação mais preocupante	Comentários
BEIS N° 1, 2 e 4 com partida direta, compressor do ar-condicionado, ventilação e extração da praça de máquinas.	Variações de tensão de curta duração, variações de frequência e transitórios oscilatórios	Navio no porto e navio no mar	A partida direta desses equipamentos pode causar redução em até 18% da tensão nominal do navio, além de uma variação de frequência de 3 Hz, em regime transiente.
MCA	Interrupções, alterações de FP e variações de frequência	Navio no mar	Problemas relacionados ao controlador de velocidade do equipamento e à filtragem de óleo combustível são as principais causas. É possível realizar um ajuste fino da frequência, por meio do controlador (WOODWARD) do atuador do motor.
Ar-condicionado do tipo <i>split</i>	Fator de potência e variações de curta duração	Navio no porto e no mar	Os problemas ocorrem devido à natureza indutiva destes equipamentos.
Sistema de energia do cais	Interrupções e variação de tensão em estado permanente	Navio no porto	Problemas ocasionados principalmente por instabilidades no fornecimento da energia de terra.
Sistema de aterramento	Transitórios de curta duração	Navio no porto e no mar	Não há histórico a bordo relacionado a problemas de aterramento ou danos por descargas elétricas.
AVR	Interrupções, variações de tensão em estado permanente e em curta duração	Navio no mar	Embora tenha como principal função a regulação de tensão, inclusive com dispositivos de proteção para sobretensão e falhas de diodo, avarias nos AVR são um problema no navio, o que resulta na pouca confiabilidade da tensão, principalmente quando o gerador n°1 encontra-se com mais de 50% da carga.
Painéis, quadros elétricos e disjuntores	Interrupções, variações em estado permanente e transitórios de curta duração	Navio no porto e no mar	Geralmente, ocorrem em virtude de curtos-circuitos de equipamentos que demandem elevado nível de corrente e tensão de 440V.

Máquinas rotativas e transformadores	Alterações de FP e harmônicas	Navio no porto e no mar	O navio praticamente não possui cargas capacitivas, sendo a compensação por banco de capacitores realizada pelas bases de apoio. Já as harmônicas estão relacionadas ao comportamento não linear da magnetização.
--------------------------------------	-------------------------------	-------------------------	---

Fonte: O autor.

Conforme indicado no quadro 4.3, os desafios predominantes relacionados à qualidade da energia a bordo estão associados às flutuações de tensão, alterações de frequência, presença de harmônicos, interrupções e variações no fator de potência. Essas questões são resultantes das mudanças de carga, da utilização de equipamentos de eletrônica de potência, como conversores, e da partida direta da maioria dos motores de indução. Além da ausência de sistemas de proteção que incorporam filtros passivos ou ativos, ou bancos de capacitores para auxiliar na correção do fator de potência, exacerbam esses problemas.

4.2 Processo Metodológico da Medição

Este tópico visa dar maiores detalhes sobre o processo de medição, desde o local onde será instalado o analisador de potências até a forma como serão tratados os dados de medição.

4.2.1 Considerações iniciais

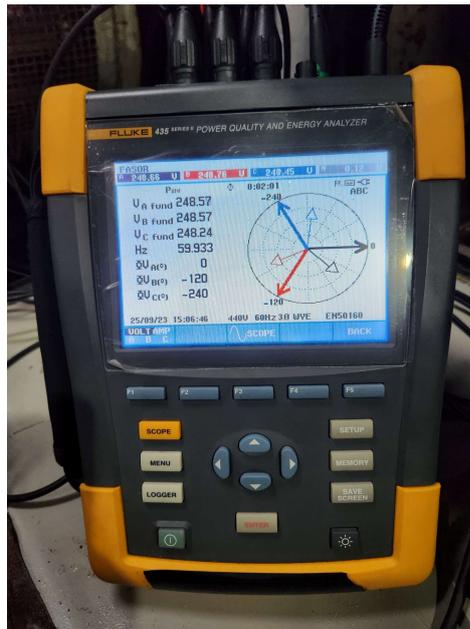
As medições realizadas no Navio Patrulha Gurupi visaram analisar a qualidade da energia elétrica dos geradores, focando em parâmetros elétricos como tensão de fase, nível de corrente, frequência, distorção harmônica total e individual de corrente e tensão, e fator de potência. A ENGENALMARINST N° 30-08A prevê o cálculo de modulação de tensão e frequência, tolerância e desequilíbrio de carga, mas esses itens não foram avaliados durante a campanha de medição. O analisador de qualidade de energia Fluke 435 Série II foi utilizado para as medições e instalado no barramento de saída de cada gerador, com a assistência dos militares da divisão de eletricidade.

A escolha do período para as medições foi bem restrita, por conta da proximidade de outras avaliações do curso, pelo período de comissões operativas do meio e pelo período de

disponibilidade do equipamento de medição pela UFRJ. Foram selecionados e disponibilizados os geradores nº1 e nº2 do navio.

4.2.2 Analisador de qualidade de energia FLUKE 435-II

FIGURA 23: ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA FLUKE 435 SÉRIE II



Fonte: O Autor

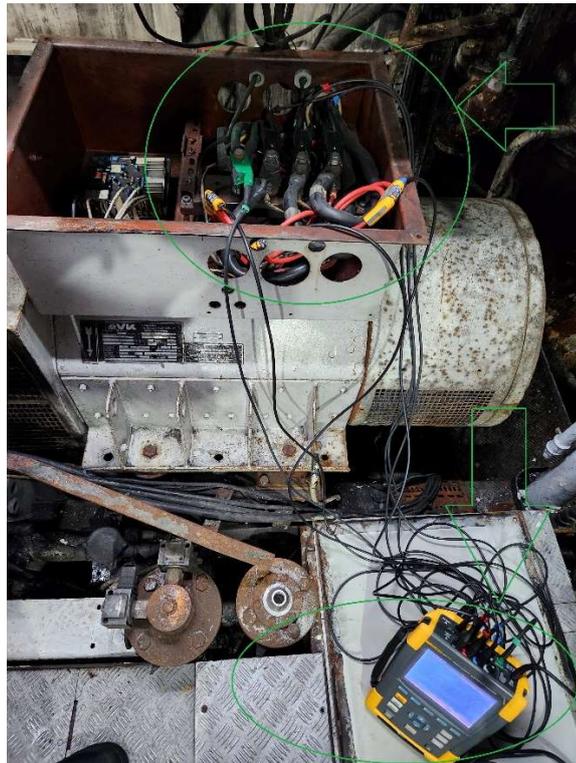
O Fluke-435 Serie II é um analisador de qualidade de energia que permite monitorar e armazenar parâmetros elétricos para análises futuras. Ele é equipado com garras do tipo "jacaré" para medição de tensão e sondas de corrente flexíveis que envolvem os condutores, garantindo precisão nas medições. O modo de monitoramento do dispositivo permite a seleção de intervalos e quantidade de parâmetros, com capacidade de armazenamento para até 30 dias de dados, limitado apenas pela capacidade de armazenamento do equipamento.

Os dados são armazenados em um cartão SD e podem ser acessados via computador utilizando o aplicativo Powerlog da Fluke. O aplicativo oferece recursos para manipulação dos dados, incluindo a construção de gráficos para avaliar tendências e variações dos parâmetros elétricos.

Os dados coletados com o Fluke-435 Serie II são essenciais para comparar os resultados com os limites estabelecidos pelas normas brasileiras. O analisador é aplicável em ambientes específicos, como navios militares, que possuem características únicas, incluindo sistemas de combate, armamentos e equipamentos de navegação.

4.2.3 Jornada de medição

FIGURA 24: LOCAL DE INSTALAÇÃO DO ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA



Fonte: O autor.

Na primeira visita ao navio em 25 de setembro de 2023, decidiu-se posicionar os PCCs para ambo o medidor na saída dos geradores. Eles foram instalados no barramento de saída dos geradores. Os medidores, configurados para intervalos de integração de trinta segundos, iniciaram as medições no mesmo dia, coletando dados referente a primeira medição, de 17h43m30s de funcionamento do gerador n°2.

A segunda etapa de medições começou em 27 de setembro de 2023, com o navio atracado, e terminou em 28 de setembro, foram coletados 21h 51min de funcionamento do gerador n°1.

Os dados coletados durante todas as etapas de medição foram selecionados e tratados conforme detalhado no Quadro 4.3.

QUADRO 4.3 – INFORMAÇÕES E DADOS COLETADOS DURANTE OS PERÍODOS DE MEDIÇÃO

Gerador	Horas medidas	Condição de Operação	Parâmetros medidos
Nº 1	21h51m	Navio no porto	Tensões de fase, corrente, frequência, DHT _v , DHT _i , e FP
Nº 2	17h43m30s	Navio no porto	Tensões de fase, corrente, frequência, DHT _v e DHT _i

Fonte: O autor.

5 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Tratamento de dados

A fase de exame dos registros em outubro de 2023, empregando o aplicativo PowerLog 430-II. Através desta ferramenta foi possível gerar relatórios com os gráficos dos parâmetros medidos, nas opções de impressão dos relatórios foi adotado o intervalo gráfico de 12h, de modo a facilitar a visualização dos dados coletados.

O instrumento de medição captura e exibe os picos e vales, além dos valores médios para variáveis como tensão, corrente e frequência. Ele também computa outros parâmetros associados, permitindo uma análise detalhada e adaptável. Esta flexibilidade foi crucial para uma inspeção de cada variável.

A avaliação dos níveis de tensão e corrente foi realizada sob três perspectivas distintas, visando identificar sobretensões, subtensões e picos anormais. A inspeção integrada dessas variáveis elétricas é importante para detecção de transientes.

Os dados de tensão foram expressos em unidades V, facilitando a interpretação rápida e eficiente dos resultados. As flutuações de tensão em estado estacionário, transientes e desequilíbrios entre as fases foram comparadas, dentro dos limites de 5%, 16% e 3%, conforme estabelecidos pela Engenalmarinst 30-08A. Com relação a corrente, os dados foram expressos em Amperes.

A frequência foi analisada, com foco na variação em relação ao valor padrão de 60 Hz. Os resultados foram então comparados com os limites estabelecidos pela Engenalmarinst 30-08A, ou seja, abaixo dos valores de 3% e 4% para o regime permanente ($\pm 1,8$ Hz) e o transiente ($\pm 2,4$ Hz), respectivamente. Os valores de DHT_V e DHT_I foram representados graficamente em termos percentuais de distorção em relação à onda senoidal pura e comparados com os padrões da Engenalmarinst 30-08A.

A análise gráfica focou nas 3°, 5° e 7° harmônicas ímpares, devido à sua influência mínima e à simetria ímpar da onda, e terem sido os melhores dados dentre os obtidos para análise.

O fator de potência (FP) da instalação também foi medido para fornecer uma avaliação quantitativa inicial do fluxo de potência no barramento. Os dados para gerar o gráfico de FP do gerador nº2 não foram registrados pelo equipamento, dessa forma só foi possível gerar este gráfico na análise do gerador nº1. Os dados obtidos foram apresentados cronologicamente, comparando os resultados obtidos com os limites estabelecidos nas normas mencionadas, proporcionando uma visão abrangente da Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

5.2 Primeiro Período de Medições

5.2.1 Medição – 25/09/23 a 26/09/23 – Gerador nº2 (navio atracado)

5.2.1.1 Níveis de tensão e corrente

Os Gráficos 1 e 2, a seguir, mostram o nível médio, máximo e mínimo da tensão eficaz durante o dia, respectivamente:

GRÁFICO 1 – NÍVEL MÁXIMO DAS TENSÕES EM V NO PERÍODO

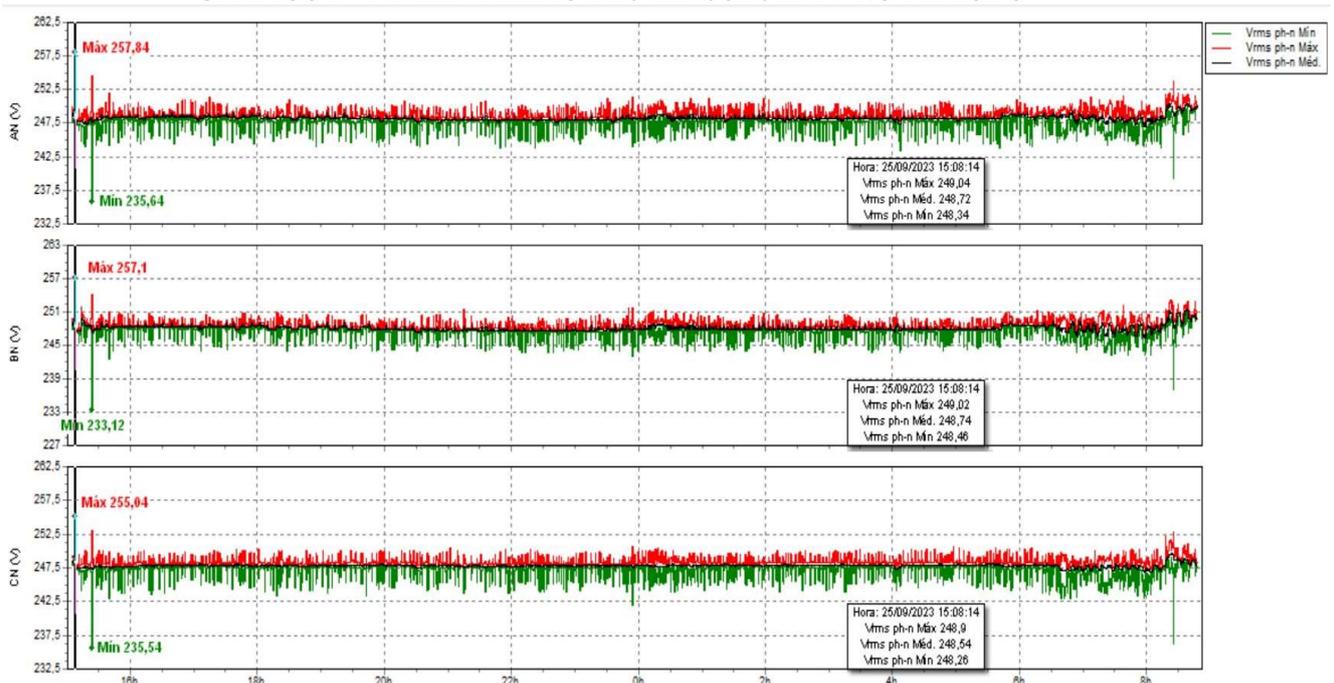
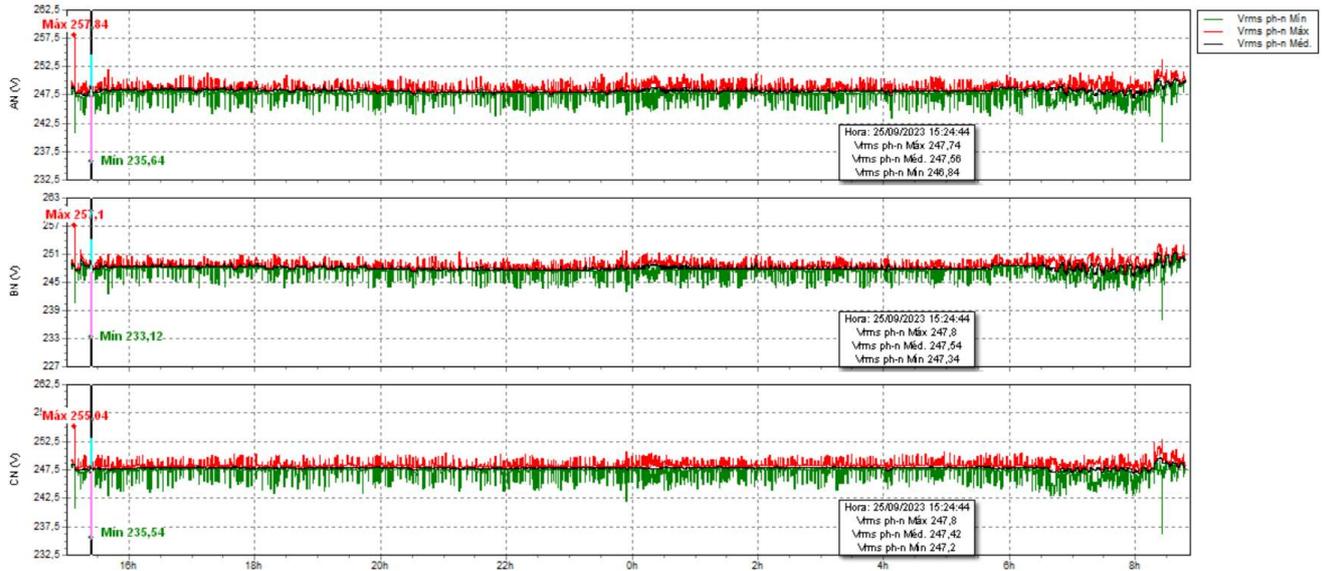


GRÁFICO 2 – NÍVEL MÍNIMO DAS TENSÕES EM V NO PERÍODO



Os Gráficos 3 e 4, a seguir, mostram as medições do nível médio e máximo de corrente no período e podem auxiliar na interpretação do comportamento do nível de tensão:

GRÁFICO 3 – NÍVEL MÁXIMO DAS CORRENTES DE PICO NO PERÍODO

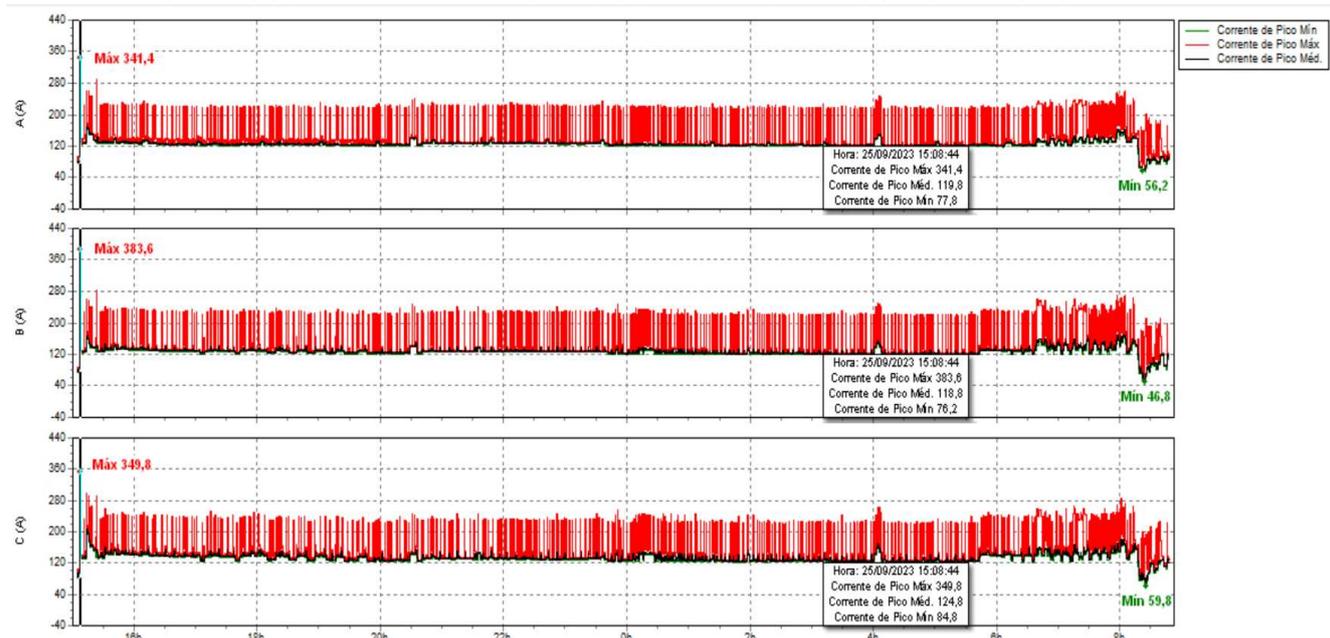
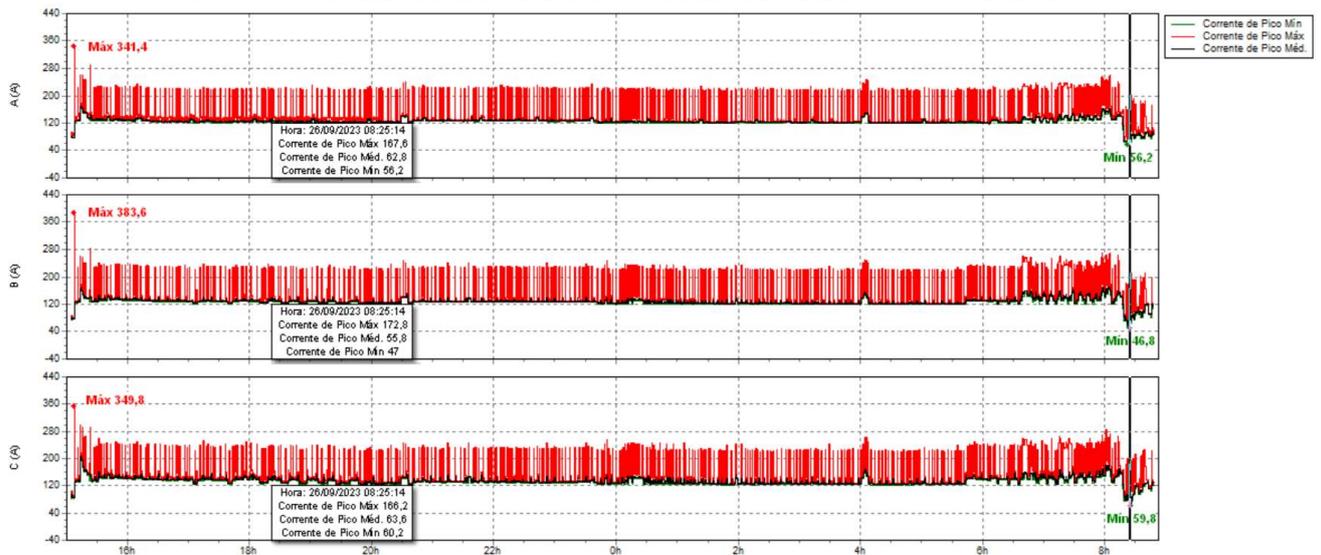


GRÁFICO 4 – NÍVEL MÍNIMO DE DAS CORRENTES DE PICO NO PERÍODO



Fonte: O autor.

O Gráfico 1 mostra que o nível tensão sofreu pouca variação em seu nível RMS, mantendo-se dentro de valores entre 1,5 e 3,5%, portanto dentro do valor previsto de 5% da Engenalmarinst 30-08A. Além disso, não há um desequilíbrio de tensão entre as magnitudes das fases.

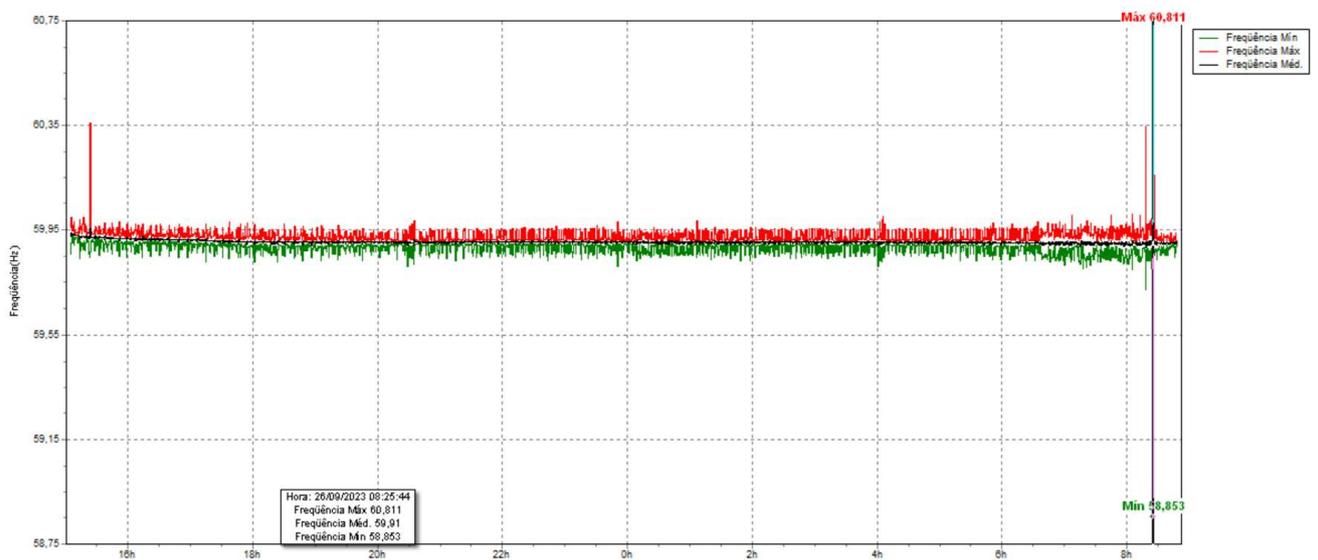
Ao analisar os Gráficos 1 e 3, concomitantemente, observamos os picos de tensão e corrente às 15h08min, aproximadamente, logo após a passagem de energia para o gerador nº2 e partida dos equipamentos vitais de bordo, com isso indicando o momento de partida da bomba de esgoto e incêndio do navio (BEI). Entretanto, nenhum transitório ultrapassa o valor de 16%.

Ao analisar os Gráficos 2 e 4, concomitantemente, observamos os picos mínimo de tensão e corrente às 08h25min, aproximadamente, indicando interrupção em algum equipamento, pelo horário, sendo início de expediente, provavelmente, estavam realizando a parada de algum equipamento para manutenção ou revezamento com outro. Entretanto, nenhum transitório ultrapassa o valor de 16%.

5.2.1.2 Variação de frequência

O Gráfico 5 abaixo ilustra a variação dos valores médios, máximos e mínimos registrados. O quantitativo de cargas ao serem adicionadas ou retiradas da rede afetam o parâmetro, que acaba apresentando sensíveis transitórios, em particular, o que ocorre às 08h25min44seg. No entanto, os valores de frequência permanecem abaixo dos limites estabelecido em regime permanente e transitórios. A máxima ocorrida atinge um valor de 60,811 Hz, um valor de cerca de 1,1% da frequência nominal, o mínimo é de 58,853 Hz, enquanto a média é de 59,91 Hz.

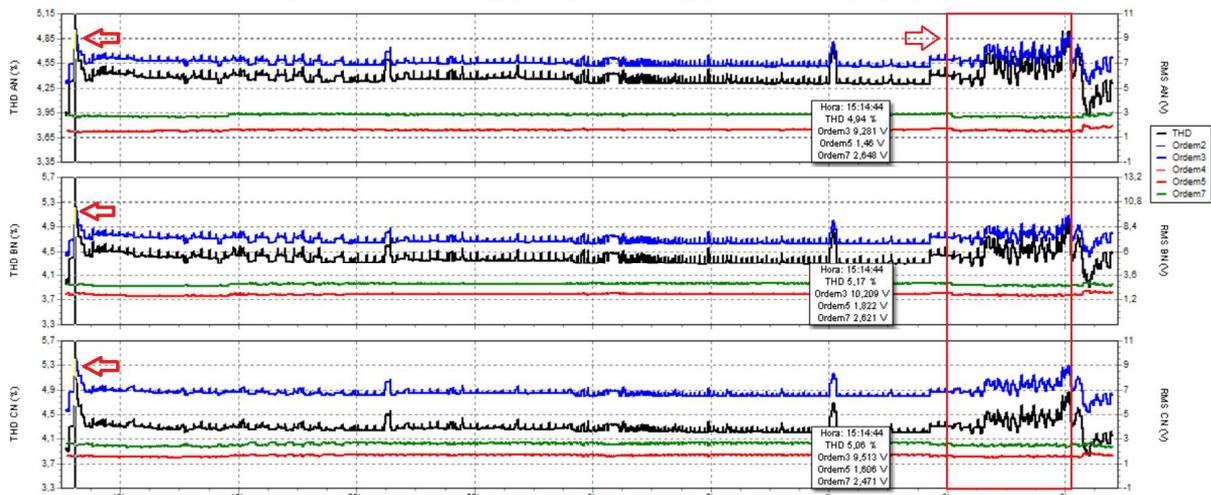
GRÁFICO 5 – VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA NO PERÍODO



5.2.1.3 DHT_V e DHT_I

O Gráfico 6 mostra os valores máximo de DHT_V :

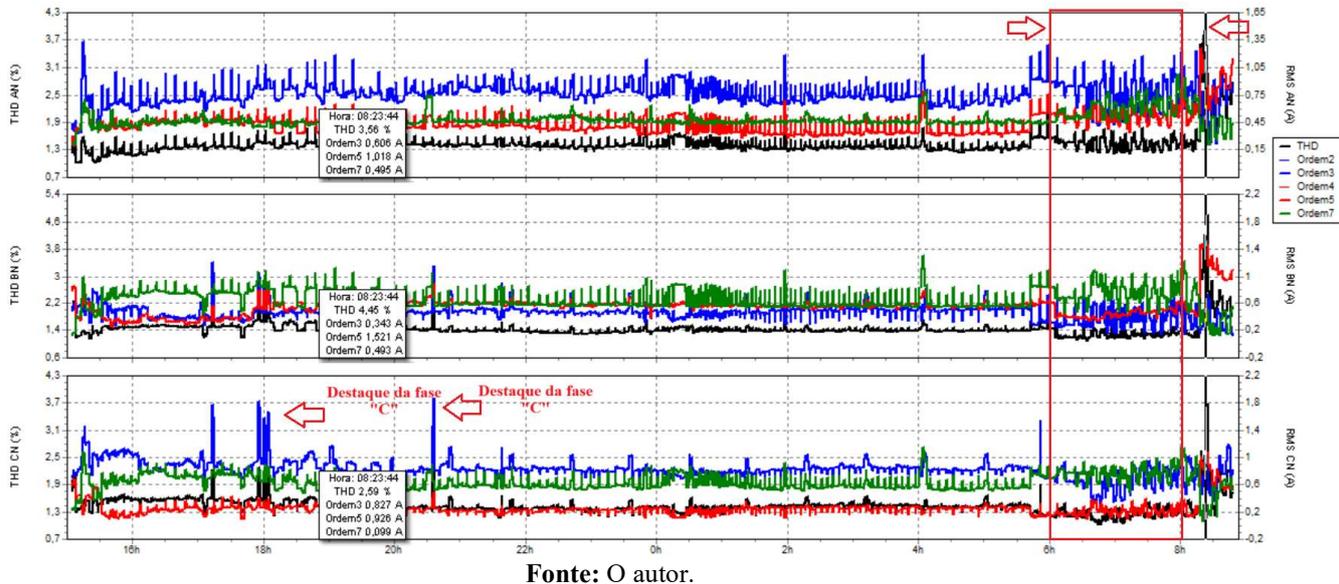
GRÁFICO 6 – NÍVEL MÁXIMO DE DHT_V NO PERÍODO



Pode-se observar, conforme destacado nos gráficos, que os valores de DHT_V se encontram próximos do valor de 5% previsto pela Engenlmarinst 30-08A. Além disso, observa-se que na fase B e C, este limite é ultrapassado em 0,17% e 0,06%. Também é possível notar que os valores de pico acompanham os momentos de partida de equipamentos e transientes de tensão. Vale destacar, ainda, o aumento na variação do nível do DHT_V a partir das 06h00min até às 08h00min, possivelmente relacionado à alimentação de equipamentos como bombas de esgoto e aguada do navio, o que provocou um aumento no nível médio e sua variação, de harmônicas na rede.

O DHT_I pode ser observado no Gráfico 7:

GRÁFICO 7 – NÍVEL MÁXIMO DE DHT_I NO PERÍODO

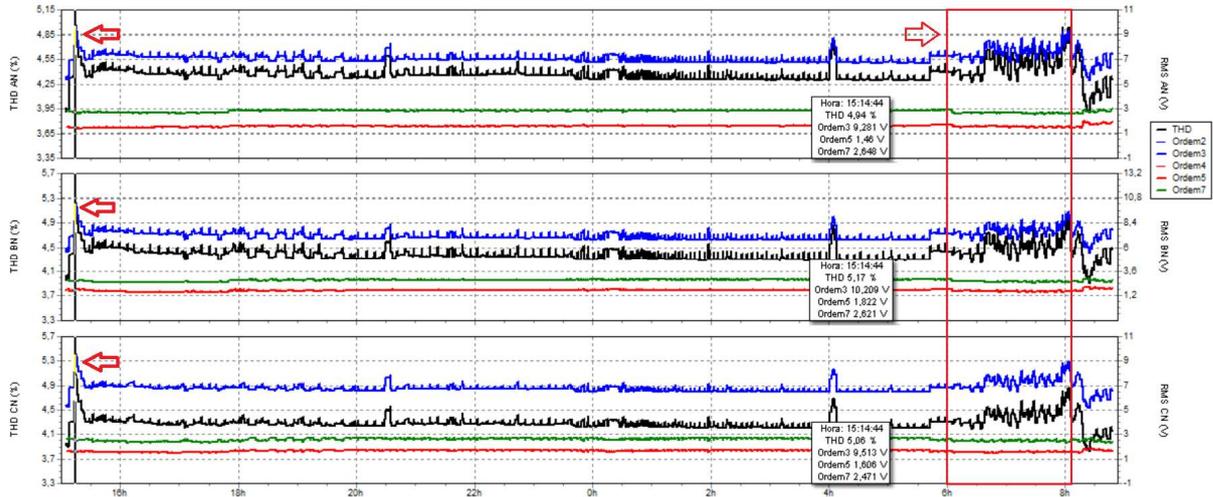


Foi observado que no DHT_I , também há um aumento sensível no nível de harmônicas na rede, no período entre às 06h00min e 08h00min. Além disso, nota-se que há uma diferença sensível de distorção entre as fases, com a fase C destacando-se das demais.

5.2.1.4 DHT_V e DHT_I das harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem

O Gráfico 8 mostra os valores máximo de DHT_V :

GRÁFICO 8 – NÍVEL MÁXIMO DE DHT_V DA 3ª, 5ª e 7ª HARMÔNICA NO PERÍODO

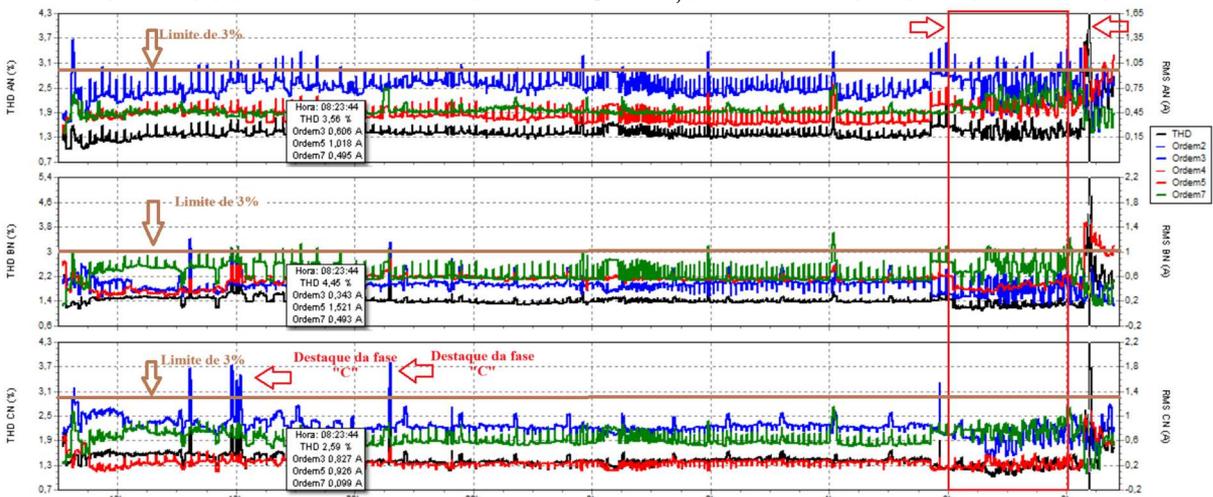


Fonte: O autor.

No Gráfico 8, conforme a legenda, destacam-se os gráfico: azul escuro “Ordem 3”, vermelho escuro “Ordem 5”, verde escuro “Ordem 7”. Observa-se que nas três fases os gráficos mostram o comportamento individual harmônicas de tensão acima do valor de 5%, na 3ª harmônica, durante os transitórios. Já em regime permanente, de maneira geral os índices de DHT_V das harmônicas, permanecem abaixo de 5%, dentro do limite estabelecido pela Engenalmarinst 30-08A. Além disso, com relação a distorção entre as fases pode-se destacar a fase C.

O DHT_I pode ser observado no Gráfico 9:

GRÁFICO 9 – NÍVEL MÁXIMO DE DHT_I DA 3ª, 5ª e 7ª HARMÔNICA NO PERÍODO



Fonte: O autor.

No Gráfico 9, conforme a legenda, destacam-se os gráfico: azul escuro “Ordem 3”, vermelho escuro “Ordem 5”, verde escuro “Ordem 7”, e a régua limite traçada na cor marrom.

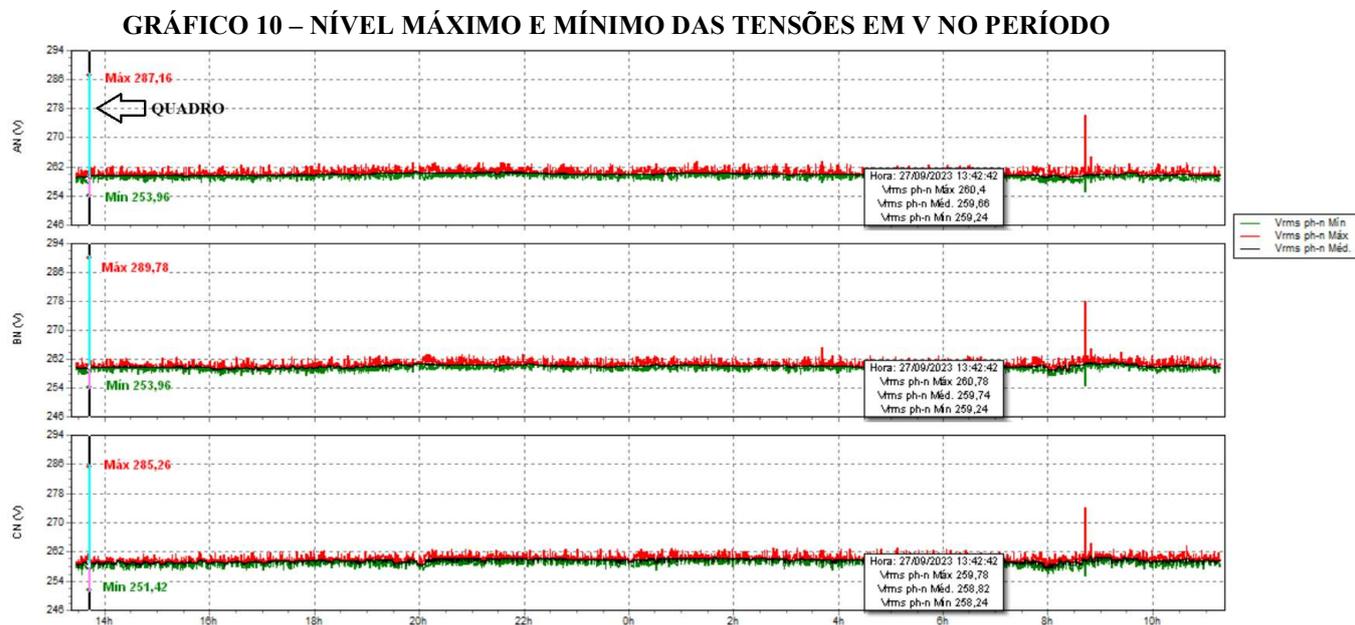
Observa-se que apenas o azul escuro e vermelho escuro, ou seja, gráficos da 3ª harmônica e 5ª harmônica, respectivamente, mostram o comportamento individual de suas harmônicas de corrente acima do valor de 3%, principalmente nos momentos de transitórios. Em desacordo com a Engenalmarinst 30-08A. Além disso, com relação a distorção entre as fases pode-se destacar a fase C.

5.2.2 Medição – 27/09/23 a 28/09/23 – Gerador nº1 (navio atracado)

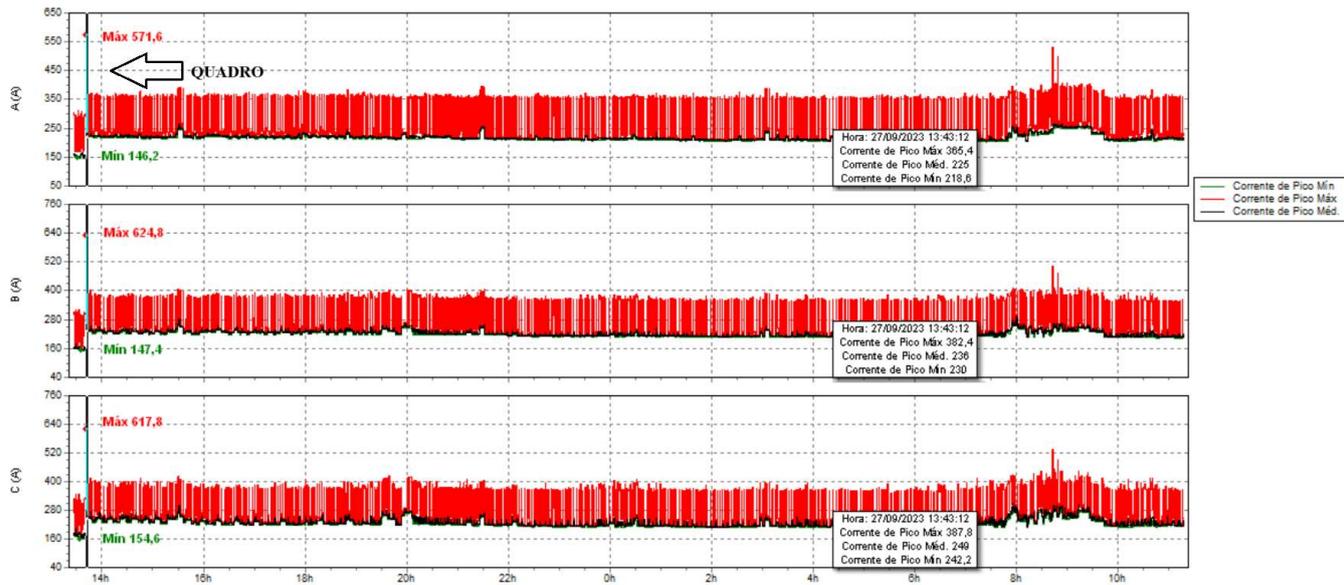
5.2.2.1 Níveis de tensão e corrente

Ao realizar a análise do gráfico a seguir, observa-se que o nível tensão sofreu pouca variação em seu nível RMS, mantendo-se dentro de valores entre, 252 V e 262 V, entre 1,0 e 2,0%, respectivamente. Portanto dentro do valor previsto de 5% da Engenalmarinst 30-08A. Além disso, não há um desequilíbrio de tensão entre as magnitudes das fases.

O Gráfico 10, a seguir, mostra o nível médio, máximo e mínimo da tensão eficaz durante o dia, respectivamente:



O Gráfico 11, a seguir, mostram as medições do nível médio e máximo de corrente no período e podem auxiliar na interpretação do comportamento do nível de tensão:

GRÁFICO 11 – NÍVEL MÁXIMO E MÍNIMO DAS CORRENTES DE PICO NO PERÍODO

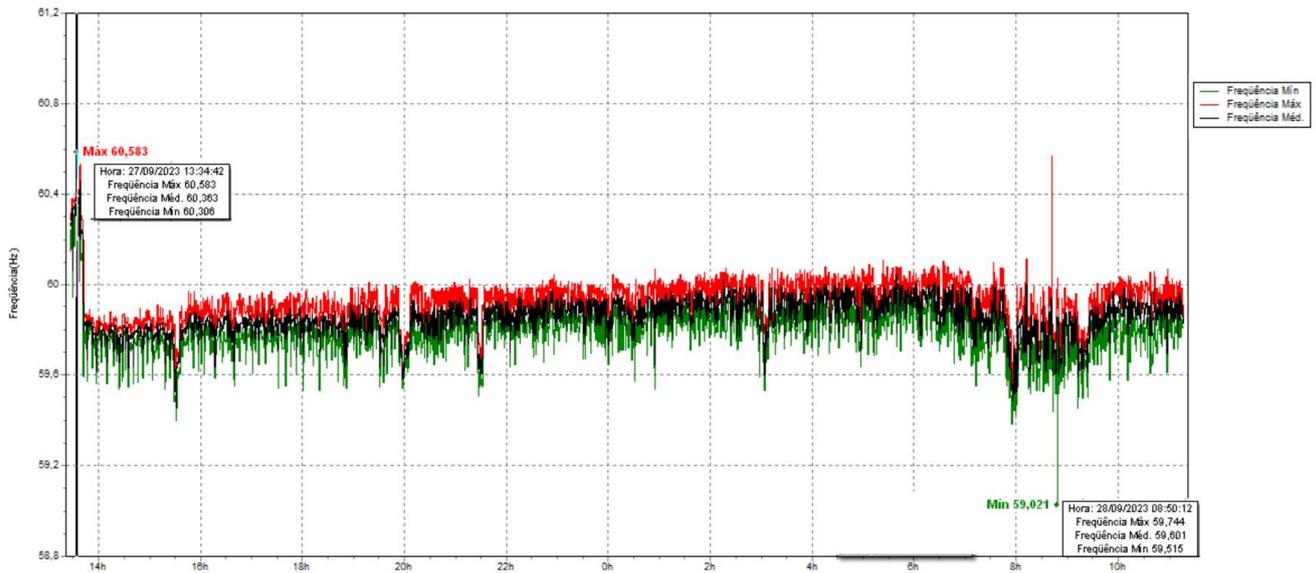
Ao analisar os Gráficos 10 e 11, concomitantemente, observamos os picos de tensão e corrente às 13h43min, aproximadamente, logo após a passagem de energia para o gerador nº1 indicando a partida dos principais equipamentos de bordo, gerando transitórios. Entretanto, nenhum transitório ultrapassa o valor de 16%.

Ainda com relação aos Gráficos 10 e 11, podemos observar os picos mínimo de tensão e corrente às 13h44min, aproximadamente, o que como ocorre logo após ao pico máximo de corrente, indicando que houve alguma falha durante a partida dos equipamentos, ou que após terem atingido o regime permanente, foi retirada alguma carga da rede.

5.2.2.2 Variação de frequência

O Gráfico 12 abaixo ilustra a variação dos valores médios, máximos e mínimos registrados da frequência total. O quantitativo de cargas ao serem adicionadas ou retiradas da rede afetam este parâmetro, que acaba apresentando sensíveis transitórios, em particular, o que ocorrem às 13h34min42seg e 08h50min12seg. No entanto, os valores de frequência permanecem abaixo dos limites estabelecido em regime permanente e transitórios. A máxima ocorrida atinge um valor de 60,583 Hz, um valor de cerca de 0,9% da frequência nominal, o mínimo é de 59,021 Hz, um valor de cerca de 1,5% da frequência nominal.

GRÁFICO 12 – VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA NO PERÍODO



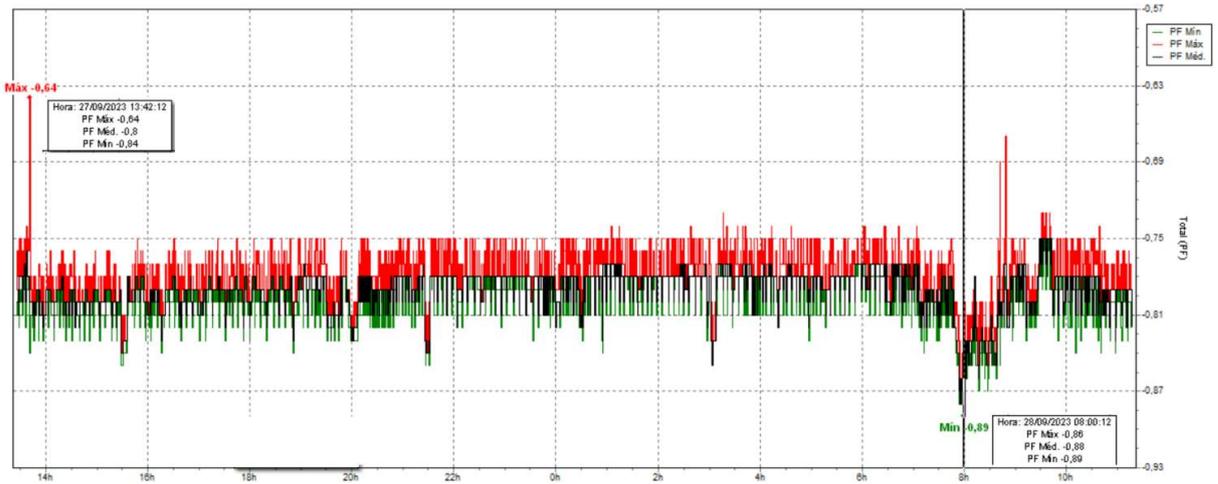
5.2.2.3 Fator de potência

O Gráfico 13 apresenta o comportamento do FP ao longo do período de medição do gerador nº1. Pode-se observar que o gráfico encontra-se invertido, o valor máximo, na verdade é o mínimo e o mesmo ocorre ao contrário. Este fato foi observado durante o manuseio dos gráficos no aplicativo PowerLog, foram realizadas tentativas de modificar e resolver o problema, porém todas falharam. No entanto, o fato ocorrido não impede a análise dos dados, apenas exige esta observação de forma que haja a correta interpretação. Além disso, com o intuito de complementar a análise deste parâmetro, foi adicionado o Gráfico 13, um histograma do FP, como outra forma de visualização.

Através da medição do FP é possível identificar mais facilmente os momentos em que ocorrem entradas ou saídas de cargas, principalmente motores elétricos, em virtude da variação de potência reativa.

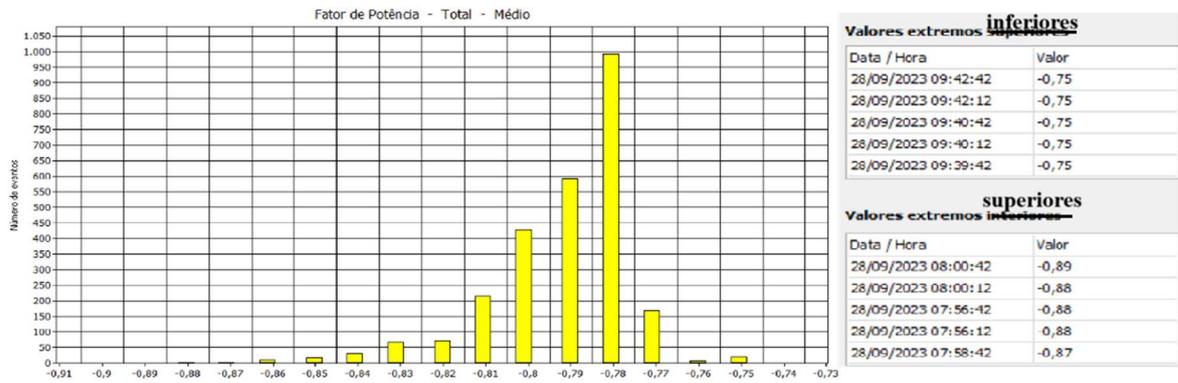
Há instantes em que o valor permanece abaixo do limite estabelecido, porém muito próximo do valor de 0,8, que é o FP esperado devido ao projeto do gerador. No entanto, estes instantes estão relacionados aos transitórios de equipamentos bastante indutivos (Ventilação da praça de máquinas e compressor do ar condicionado, e ar condicionado tipo *split*), no qual há inserção de potência reativa e redução de FP. Além do mais, esta sensível redução não se estabelecem em regime permanente.

GRÁFICO 13 – FP DURANTE O PERÍODO DO GERADOR 1



Fonte: O autor.

GRÁFICO 14 – HISTOGRAMA DO FP DURANTE O PERÍODO DO GERADOR 1

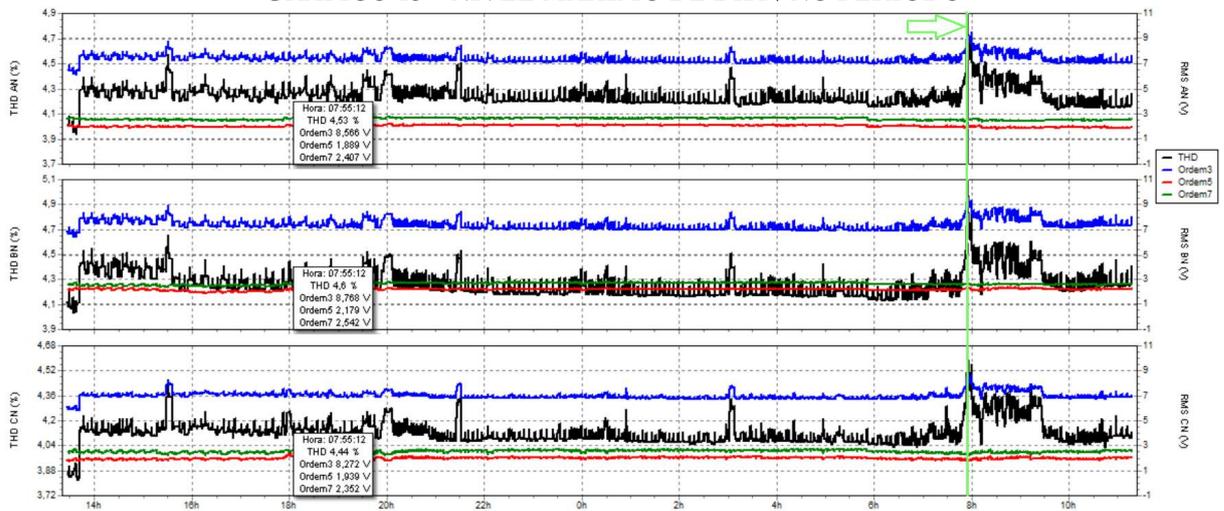


Fonte: O autor.

5.2.2.4 DHT_V e DHT_I

O Gráfico 15 mostra os valores máximo de DHT_V no período:

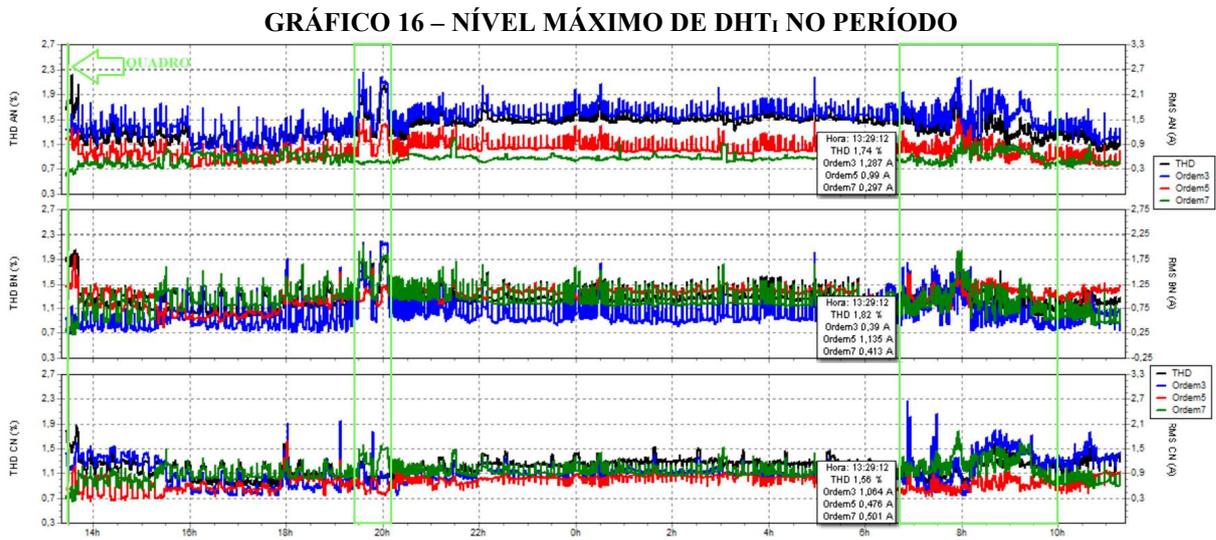
GRÁFICO 15 – NÍVEL MÁXIMO DE DHT_V NO PERÍODO



Fonte: O autor.

Pode-se observar, conforme destacado nos gráficos, que os valores de DHT_V se encontram abaixo do valor de 5% previsto pela Engenalmarinst 30-08A. É possível notar que os valores de pico acompanham os momentos de partida de equipamentos e transientes de tensão. Vale destacar, ainda, o aumento na variação do nível do DHT_V a partir das 07h55min12seg, assim como observado por volta do mesmo horário na análise de medição do gerador n°2, possivelmente relacionado à alimentação de equipamentos como bombas de esgoto e aguada do navio, o que provocou um aumento no nível médio e sua variação, de harmônicas na rede a partir deste horário.

O DHT_I pode ser observado no Gráfico 16:



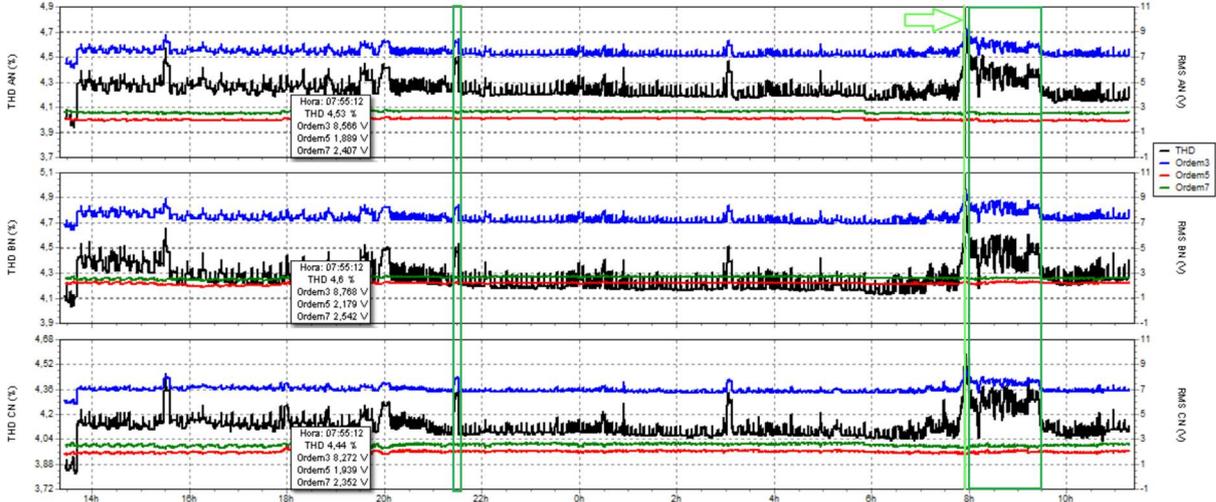
Fonte: O autor.

No gráfico cima, observado que o DHT_I , há um aumento sensível no nível de harmônicas na rede, no período entre às 07h00min e 09h00min. Os valores de DHT_I estão abaixo do valor de 5% previsto pela Engenalmarinst 30-08A. Além disso, nota-se que há uma diferença sensível de distorção entre as fases, com a fase A destacando-se das demais.

5.2.2.5 DHI_V e DHI_I das harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem

O Gráfico 17 mostra os valores máximo de DHT_V :

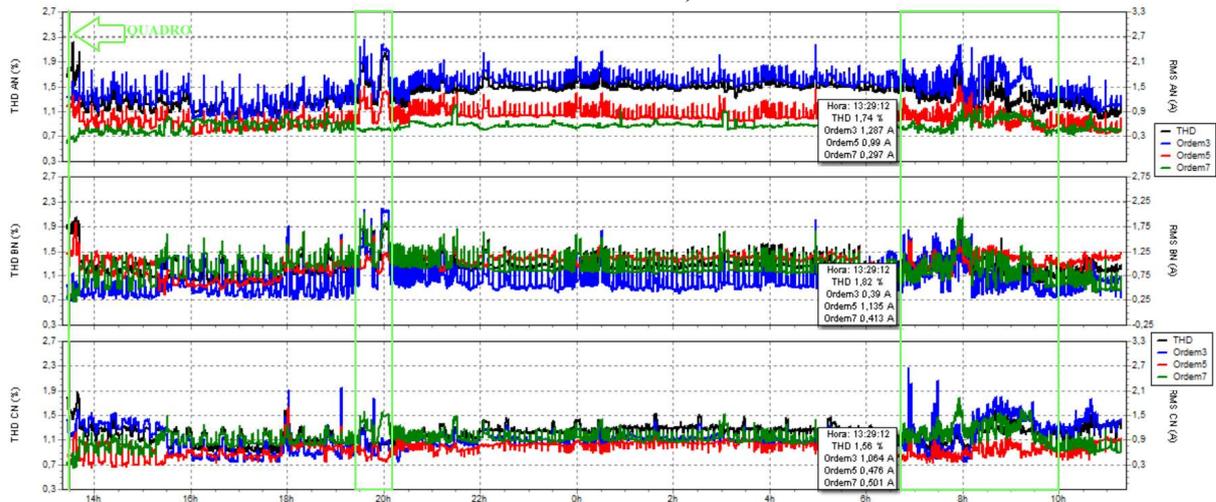
GRÁFICO 17 – NÍVEL MÁXIMO DE DHT_V DA 3ª, 5ª e 7ª HARMÔNICA NO PERÍODO



Fonte: O autor.

No Gráfico 17, conforme a legenda, destacam-se os gráfico: azul escuro “Ordem 3”, vermelho escuro “Ordem 5”, verde escuro “Ordem 7”. Observa-se que todos os gráficos mostram o comportamento individual de suas harmônicas de tensão acima do valor de 3%. Dessa forma, distorção harmônica individual das harmônicas ímpares, ultrapassam o limite estabelecido pela Engenalmarinst 30-08A. Pode-se observar também que ocorreu distorção harmônica entre as fases, fato em que a fase B se destaca.

GRÁFICO 18 – NÍVEL MÁXIMO DE DHT_I DA 3ª, 5ª e 7ª HARMÔNICA NO PERÍODO



Fonte: O autor.

No Gráfico 18, conforme a legenda, destacam-se os gráfico: azul escuro “Ordem 3”, vermelho escuro “Ordem 5”, verde escuro “Ordem 7”. Observa-se que todos os gráficos

mostram o comportamento individual de suas harmônicas de tensão abaixo do valor de 3%. Dessa forma, não ultrapassa o limite estabelecido pela Engenalmarinst 30-08^a. No entanto, ocorre distorção harmônica entre as fases, fato em que a fase B se destaca.

6 CONCLUSÃO

A importância de entender os parâmetros e medidas elétricas que influenciam a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é fundamental para garantir a operacionalidade e manutenção eficiente das embarcações navais, bem como para a gestão otimizada da energia e equipamentos instalados. Neste estudo, a QEE de uma embarcação da Marinha do Brasil (MB) foi analisada, com foco na medição e análise de variáveis como tensão de fase, corrente, frequência, Fator de Potência (FP), e distorções harmônicas totais de tensão e corrente (DHTV e DHTI), distorções harmônicas individuais de terceira, quinta e sétima ordem.

6.1 Considerações Finais

O estudo se aprofunda na exploração de conceitos e desafios associados à QEE, respaldado por uma extensa bibliografia composta por livros, artigos científicos e monografias. Discute-se as origens, impactos e remediações potenciais para problemas comuns de QEE, com ênfase nas harmônicas. Normativas específicas, como a Engenalmarinst 30-08A, IEEE Std 519TM-2014, IEC 61000, foram exploradas e abordadas suas bibliografias buscando a entender como os critérios de QEE são definidos e regulamentados, facilitando a identificação e diagnóstico de problemas em sistemas elétricos embarcados.

O Navio Patrulha Gurupi, atracado no Cais da Portuguesa, mas ainda operacional, serviu como o campo de estudo para medições e análises. O estado operacional da embarcação proporcionou uma oportunidade para avaliar a energia produzida pelos seus geradores. A pesquisa foi ampliada para incluir uma análise detalhada do sistema de geração e distribuição de energia do navio, e como suas cargas impactam a QEE.

Os dados foram coletados dos geradores nº 1 e nº 2 do navio, com aproximadamente 24 horas de dados coletados para cada gerador enquanto a embarcação estava atracada. A

análise dos dados foi minuciosa, com a apresentação visual facilitada por gráficos e tabelas, ilustrando as variações e comportamentos dos parâmetros elétricos ao longo do tempo. As análises transitórias e as alterações de carga em regime permanente foram cruciais para entender o impacto dos equipamentos do navio na rede elétrica.

A análise revelou consistência na tensão e corrente entre os dois geradores enquanto a embarcação estava atracada. A tensão permaneceu estável, com sobretensões observadas, mas não excedendo 3% da tensão nominal. Desbalanceamentos entre as fases foram notados, as variações na tensão e corrente, durante transitórios, por vezes não se mantiveram dentro dos limites aceitáveis, entretanto, se mantiveram em regime permanente. A frequência também se manteve estável, sem anormalidades notáveis.

Com relação ao FP, que só foi medido para o gerador nº 1, permaneceu na maior parte do tempo abaixo do valor de 0,8, porém muito próximo dele. Dessa forma, pode-se verificar o impacto que o acionamento de cargas indutivas tem no FP.

As distorções harmônicas, um foco central do estudo, foram analisadas em detalhe. As distorções totais permaneceram abaixo dos limites estabelecidos pela Engenalmarinst 30-08A. No entanto, distorções individuais de harmônicas, especialmente para o gerador nº2, excederam os limites, indicando a necessidade de uma investigação mais aprofundada. A terceira harmônica do gerador 2, em particular, é de interesse porque pode levar a uma série de problemas. Como causar o superaquecimento dos cabos e transformadores, reduzir a eficiência dos motores e outros equipamentos e, em casos extremos, levar a falhas prematuras dos equipamentos.

Em paralelo a análise dos dados medidos, foi observado durante a verificação de demanda da carga do meio, que o navio possui muitos equipamentos com carga indutiva, que a maioria de seus equipamentos vitais e motores elétricos mais robustos, como o motor da ventilação geral, ventilação e extração da praça de máquinas, compressor do ar condicionado, bomba de transferência da UTAS, BEIS N°1, 2 e 4, motores elétricos do cabrestante e guindaste, todos estes equipamentos, devido ao navio ter 28 anos, são de partida direta e o efeito disso na rede elétrica gera picos de corrente e tensão, transitórios e outros efeitos como os descritos nos 12 subtópicos da seção 2 (desenvolvimento e referencial teórico).

Como forma de tentar reduzir as distorções harmônicas individuais apresentadas, poderiam ser adotadas medidas como a instalação de um banco de capacitores na rede, dimensionar filtros ativos, passivos ou híbridos junto a rede de alguns equipamentos como os inversores e principais transformadores. Adicionalmente, para partida dos motores elétricos mais robustos, recomenda-se o dimensionamento de *soft-starters* de forma que seja possível eles realizarem uma partida mais suave, evitando a geração de efeitos prejudiciais a eficiência elétrica na rede.

A análise conclui que a QEE, para os parâmetros avaliados, de maneira geral, está dentro dos padrões normativos. Apesar disso, é sugerido que sejam realizadas coleta de dados mais aprofundadas, por períodos maiores e com o navio no mar durante as medições, pois neste cenário ocorrerá o aumento da demanda de carga, levando a variações maiores em tensão e frequência, em operações com carga máxima. Com isso, será possível uma avaliação mais abrangente das distorções harmônicas e seus impactos potenciais a longo prazo na integridade dos sistemas elétricos e equipamentos a bordo.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Para futuras investigações, é sugerido expandir o escopo da análise para incluir a avaliação de outros geradores à medida que se tornam operacionais. A ênfase deve ser colocada na avaliação sob condições de carga elevada, proporcionando uma visão abrangente do desempenho e da resiliência dos sistemas elétricos sob condição operacional intensificada.

Além disso, o desequilíbrio entre os fasores de tensão e corrente em sistemas trifásicos é uma área que não foi completamente explorada no estudo anterior. Uma investigação aprofundada nessa área pode revelar insights críticos sobre a estabilidade e a eficiência do sistema elétrico, especialmente sob condições operacionais variáveis com o navio no mar.

REFERÊNCIAS

- ARRILAGA, J. W. **Power System Harmonics 2ª Edição**. John Wiley & Sons, 2004.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist**. Módulo 8, 12ª rev., 2020. Disponível em: www.aneel.gov.br/modulo-8. Acesso em: 10/09/23.
- ARRUDA, E.F. Analysis of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform. São Carlos, 2003. 114p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ALAM, Meheeb; GAIN, Mandela. Power Quality Problems and Solutions: An Overview. **International Journal of Science and Research (IJSR)**. Raipur, Índia. v. 3, n. 10, pp. 1024-1030, out. 2014. Disponível em: https://www.ijsr.net/search_index_results_paperid.php?id=OCT14300. Acesso em: 02/08/2023.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. *E-book*.
- CAVALCANTI, Rafael Reis. Qualidade de Energia da Fragata Liberal: Análise e problemas observados a bordo. Monografia (Curso de aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Controle e Eletricidade de Navios) – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk. Rio de Janeiro, 2021.
- DECKMANN, Sigmar M., POMILIO, José .A., Avaliação da qualidade da energia elétrica. Universidade de Campinas. UNICAMP/FEEX/DSCE. Campinas, 2010.
- DUGAN, R. *Electrical power systems quality*. [S.l.]: McGraw–Hill, 2002. 28, 29, 35, 36.
- EVANS, I. C.; HOEVENAARS, A. H.; ENG, P. Meeting Harmonic Limits on Marine Vessels. In: *2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*. 2007. Arlington, EUA. **Proceedings** [...]. IEEE, 2007. pp. 115-121. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4233809>. Acesso em: 12/09/23.
- ESTUDO TÉCNICO DA ANÁLISE DE CARGA ELÉTRICA - **CCN-EST-NPA02-300-001C**, 1988, Diretoria de Engenharia Naval, Rio de Janeiro
- FERREIRA, Leandro A., Qualidade de energia elétrica – Caracterização e Simulação. Campinas, 2008. 59pgs., Universidade São Francisco, Campinas, 2008.
- FLUKE. **Manual do Usuário**. Fluke 434-II/435-II/437-II: Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos. 2012. Disponível em: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umpor0100.pdf. Acesso em: 15/09/2023.
- GARCIA, D.C. Avaliação e Minimização Numérica do Desequilíbrio de Tensão: Estimativa por Análise de Sensibilidade Incremental e Soluções Analíticas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM – 319/07, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 82p., 2007.

HANZELKA, Zbigniew & BIEN, Andrzej. **Harmônicas e Inter-harmônicas**. AGH University of Science and Technology, 2004.

HELMAN, H. & ANDERY, P. R. P. **Análise de falhas (Aplicação do Método FMEA e FTA)**, Fundação Cristiano Ottoni, MG, Belo Horizonte, 1995.

HOLMES, John. *Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures*. 1º ed., Morgan & Claypool, 2006. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6813557>. Acesso em: 15/09/23.

IEC. **IEC - Global Reach, 2023**. Disponível em IEC: <<https://webstore.iec.ch/home>>. Acesso em: 05/10/2023.

IEC. **IEC - 61000-3-2 Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16A per phase)**, 2014. Disponível em IEC: <<https://webstore.iec.ch/home>>. Acesso em: 05/10/2023.

IEEE. **IEEE Std 519-2014: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems**, pp.1-29, Jun. 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459>. Acesso em: 10/07/2023.

IRESON, W. G. & COOMBS, C. F., **Handbook of Reliability and Management**, 1988.

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. *Estimação de Indicadores de Qualidade de energia*. [S.l.]: Edgard Blucher, 2009. 14, 15, 22, 28, 32, 33, 34.

LEÃO, Ruth. **Harmônicos em sistemas elétricos**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

_____. Diretoria de Engenharia Naval. **Engenalmarinst nº 30-08A**. Qualidade da Energia Elétrica em Corrente Alternada (CA) e Corrente Contínua (CC) para os Utilizadores dos Navios de Superfície da Marinha do Brasil. Rio de Janeiro, RJ: Diretoria de Engenharia Naval, 2019.

_____. Navio Patrulha Gurupi. **Livro de Papeletas do Console Elétrico**. Rio de Janeiro, RJ, 2023.

_____. Navio Patrulha Gurupi. **Livro de registro histórico de avarias da Incumbência E-1 – Geração e Distribuição**. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

_____. Navio Patrulha Gurupi. **Livro do navio**. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica**. 3ª Ed. São Paulo: Érica, 2013.

MEHL, Edvaldo Luis de Matos. **Qualidade de Energia Elétrica**. Curitiba: UFPR (2002). Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>. Acesso em: 22/08/2023.

MARTZLOFF, F. **Power Quality Work at the International Electrotechnical Commission. National Institute of Standards and Technology.** Reprinted from Proceedings, PQA'97 Europe, Stockholm, 1997.

MARZ, Michael B. **Interharmonics: What They Are, Where They Come From and What They Do.** American Transmission Company. Waukesha, WI, 2016.

MATANA, G. M. **Proposta de equipamento para medição dos fenômenos relativos à qualidade da energia elétrica utilizando conceitos de instrumentos virtuais, dissertação de mestrado.** Universidade de São Paulo, São Carlos, dezembro de 2008.

MOURA, Fabrício Augusto Matheus. **Geração distribuída - impactos e contribuições para a qualidade da energia elétrica e dinâmica dos sistemas elétricos - uma análise através do ATP-EMTP.** 2011. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2011.22>

POMILIO, J.A. **Eletrônica de Potência – Introdução à Disciplina.** Unicamp. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/hist.pdf> . Acesso em: 10/09/2023.

PAILILLO, Gilson. TEIXEIRA, Matheus Duarte. BECCA, Ivandro. **Qualidade de Energia, Capítulo XI, Transitórios.** Megabarre Brasil; Clamper, 2013. Disponível em: ed-94_Fasciculo_Cap-XI-Qualidade-de-energia.pdf (osetoreletrico.com.br). Acesso em: 10/09/2023.

PIMENTEL, Priscila Maciel. **Estudo da Importância da Monitoração da Qualidade de Energia Elétrica nos Sistemas de Distribuição. Monografia (Graduação).** UFPA, 2010.

PAREDES, Helmo K Morales, et al. **Caracterização de Cargas Lineares e Não Lineares em Condições de Tensões Não Senoidais.** *Eletrônica de Potência*, v.22, n.1, p. 50-62. 2017.

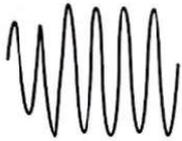
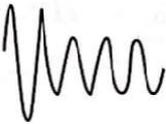
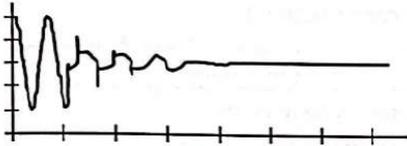
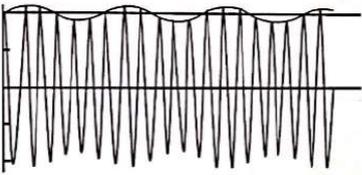
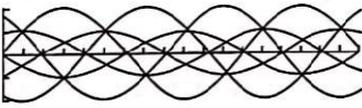
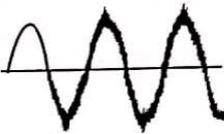
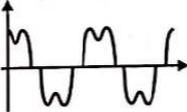
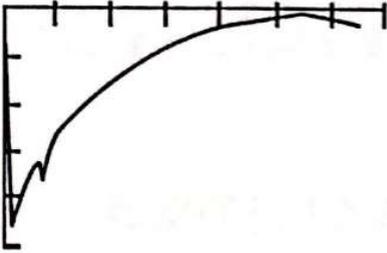
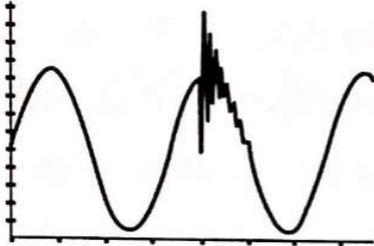
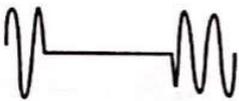
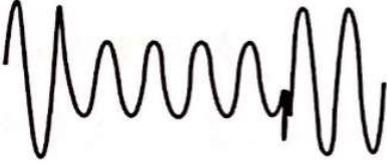
PERRUT, Luiz Felipe. **Um Estudo sobre indícios de confiabilidade do contêiner diesel-gerador nº 1 do NDCC “Mattoso Maia” com base avaliação da qualidade de energia fornecida.** Monografia (Curso de aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Controle e Eletricidade de Navios) – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk. Rio de Janeiro, 2021.

SAITO, Yan Fonseca. **Simulações de variações de tensão de curta duração para estudos de qualidade de energia/Yan Fonseca Saito.** Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2020.

SANTOS, F. M. **QUALIDADE DE ENERGIA - COMPARAÇÃO DAS NORMAS IEC 61000-3-2 E IEEE 519, 2007.** Disponível em

<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000459.pdf>>. Acesso em: 05/10/23.

ANEXO A – PRINCIPAIS DE DISTÚRBIOS DE QEE

Distúrbios em Estado Permanente	Distúrbios de Curta Duração
<p>Sobretensão</p>  <p>Subtensão</p>  <p>Interrupção</p>  <p>Flutuação de tensão</p>  <p>Desequilíbrio de tensão</p>  <p>Ruídos</p>  <p>Notches ou Cortes</p>  <p>Harmônicos</p> 	<p>Transitório impulsivo</p>  <p>Transitório oscilatório</p>  <p>Interrupção</p>  <p>Afundamento de tensão</p>  <p>Elevação de tensão</p> 