

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

EFEITO DA INSERÇÃO DE PROPULSÃO ELÉTRICA NA QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA EM NAVIOS

Thiago Almeida Rodrigues

Niterói
Agosto de 2018

UFF - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

EFEITO DA INSERÇÃO DE PROPULSÃO ELÉTRICA NA QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA EM NAVIOS

Thiago Almeida Rodrigues

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof: Sergio Gomes Junior, D.Sc.
Coorientador: Prof. Márcio Zamboti Fortes, D.r.

Niterói

Agosto de 2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE

R696e Rodrigues, Thiago Almeida
Efeito da Inserção de Propulsão Elétrica na Qualidade de
Energia Elétrica em Navios / Thiago Almeida Rodrigues ;
Sérgio Gomes Júnior, orientador ; Márcio Zamboti Fortes,
coorientador. Niterói, 2018.
115 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2018.m.09907269670>

1. Qualidade de energia. 2. Harmônicos. 3. Navios. 4.
ATPDraw. 5. Produção intelectual. I. Título II. Gomes
Júnior, Sérgio, orientador. III. Fortes, Márcio Zamboti ,
coorientador. IV. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia.

CDD -

THIAGO ALMEIDA RODRIGUES

EFEITO DA INSERÇÃO DE PROPULSÃO ELÉTRICA NA QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA EM NAVIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Sergio Gomes Junior, D.Sc.
UFF / CEPEL

Prof. Marcio Zamboti Fortes, Dr.
UFF

Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D.Sc.
UFF

Prof. Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura, D.Sc.
UFSJ

Niterói

Agosto de 2018

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha vó Geni, que nos deixou não faz muito tempo, mas tenho certeza que continua a iluminar meus caminhos.

Agradecimentos

A Deus, que me dá forças em todos os momentos.

Aos meus pais e irmãos, sem o apoio sempre incondicional de vocês eu jamais teria conseguido concluir mais essa etapa em minha vida. Um agradecimento especial também a toda minha família, sempre muito presente.

A Marina, sempre muito paciente e me dando forças, especialmente nos momentos em que eu mesmo duvidava que fosse possível. Muito obrigado pelo carinho e por entender a necessidade, por vezes, de minha ausência.

A todos os professores em que tive a oportunidade de aprender um pouco neste período de UFF, especialmente aos meus orientadores Sérgio e Marcio Zamboti, exemplos de dedicação e paciência, muito obrigado por todo o ensinamento ao longo desses anos.

Aos meus amigos de mestrado da UFF e de trabalho na Marinha do Brasil, sem dúvidas, me levantarem por diversas vezes.

A todos que participaram e torceram por mim de alguma forma para a realização deste trabalho. Muito obrigado!

Resumo

O sistema elétrico é, sem dúvidas, um dos pontos sensíveis em projetos de navios, seja para fins comerciais ou militares, e possuem a peculiaridade de serem sistemas isolados, ou seja, geração dedicada a suprir a demanda de energia elétrica da embarcação. Nos últimos anos a tecnologia de propulsão naval vem cada vez mais utilizando motores elétricos para fins de propulsão em detrimento da propulsão mecânica convencional, seja por meio da propulsão elétrica integrada ou da propulsão híbrida. Uma das consequências associadas ao uso da propulsão elétrica na embarcação é o aumento significativo de cargas não lineares presentes no sistema elétrico de bordo, devido ao uso de conversores de frequência para acionamento e controle de velocidade do navio, que pode comprometer a qualidade da energia elétrica de bordo e fazer o sistema operar de maneira inadequada, a depender das características do acionamento. As cargas não lineares geram harmônicos de corrente que interagem com o sistema elétrico de tal forma que podem ocasionar altos valores de distorções na tensão de alimentação dos equipamentos. Este fato torna-se mais evidente em sistemas isolados, devido a fragilidade no que diz respeito às variações que podem ocorrer na rede elétrica. Este estudo tem como objetivo avaliar a qualidade da energia em uma embarcação militar, com a proposição de diferentes metodologias para acionamento dos motores elétricos da propulsão. As simulações serão realizadas com o auxílio da interface gráfica ATPDraw, onde serão implementados os equipamentos conectados à rede elétrica do navio com propulsão convencional somado ao acionamento dos motores elétricos da propulsão. A partir da planta elétrica do navio modelada no ATPDraw, serão verificados os índices de qualidade de energia, especialmente as distorções harmônicas de tensão e corrente, para avaliar a implementação do referido sistema de propulsão na embarcação e, para os casos necessários, propor a utilização de filtros que mitiguem as distorções causadas pelas cargas não lineares viabilizando tecnicamente a utilização da propulsão elétrica.

Palavras-chave: Propulsão elétrica, navio, cargas não lineares, qualidade de energia, distorções harmônicas, ATPDraw.

Abstract

The electrical system is one of the most sensitive points in ship projects, whether for commercial or military purposes, and they have the peculiarity of being isolated systems, that is, a generation dedicated to supplying the electrical demand of the vessel. In recent years, naval propulsion technology has increasingly been using electric motors for propulsion rather than conventional mechanical propulsion, either through integrated electric propulsion or hybrid propulsion. One of the consequences associated with the use of electric propulsion in the vessel is the significant increase of nonlinear loads present in the onboard electrical system, due to the use of variable frequency drive to control the speed of the ship, which can compromise the power quality and the operation the system, depending on the characteristics of the drive. Nonlinear loads generate current harmonics that interact with the electrical system in such a way that they can cause high values of distortions in the voltage of the grid. This fact becomes more evident in isolated systems, due to the fragility in what concerns the variations that can occur in the electrical network. This study aims to evaluate the power quality in a military vessel, with the proposition of different methodologies to drive the electric motors of the propulsion. The simulations will be carried out with the aid of the ATPDraw graphical interface, where the equipment connected to the electric grid of the vessel with conventional propulsion will be implemented added to the drive of the electric motors of the propulsion. From the electric plant of the ship modeled in the ATPDraw, the power quality indexes, especially the harmonic distortions of voltage and current, will be verified to evaluate the implementation of electric propulsion system in the vessel and, if necessary, propose the use of filters that mitigate the distortions cused by nonlinear loads, making the use of electric propulsion technically feasible.

Keywords: Electric propulsion, vessel, nonlinear load, power quality, harmonic distortions, ATPDraw

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Motivação	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Principais Contribuições	6
1.4 Estrutura do Documento	6
Capítulo 2 - Propulsão Elétrica	8
2.1 Histórico da Propulsão Elétrica	8
2.2 Propulsão Elétrica de Navios Nos Dias Atual	9
2.2.1 Visão Geral da Propulsão Elétrica de Navios	9
2.2.2 A Propulsão Elétrica na Marinha Americana.....	12
2.2.3 <i>O Electric Ship Technology Demonstrator (ESTD)</i>	13
2.2.4 A Propulsão Elétrica nas Demais Marinhas	15
2.3 Vantagens da Utilização da Propulsão Elétrica	17
2.4 Desvantagens e Riscos da Utilização da Propulsão Elétrica	17
2.5 Motores Elétricos Aplicados a Propulsão de Navios.....	18
2.5.1 Motores de Indução	19
2.5.2 Motores Síncronos.....	20
2.5.3 Motor Síncrono HTS	20
2.5.4 Motor Homopolar CC Supercondutor	21
2.6 Conversores de Frequência Aplicados a Propulsão de Navios.....	22
2.6.1 Retificadores <i>Direct Front End</i> (DFE).....	23
2.6.2 Retificadores <i>Active Front End</i> (AFE).....	23
2.6.3 Inversor de Corrente Imposta (<i>Current Source Inverter</i>)	24
2.6.4 Inversor de Tensão Imposta (<i>Voltage Source InverterVSI</i>)	25
2.6.5 Cicloconversores	26
Capítulo 3 - Qualidade de Energia	27
3.1 Harmônicos	29
3.2 Principais Indicadores de Distorção Harmônica.....	31

3.2.1	Distorção Harmônica Total (THD)	31
3.2.2	Distorção de Demanda Total (TDD).....	32
3.2.3	Componente Harmônico Individual (IHC)	32
3.3	Efeitos Dos Harmônicos Para os Equipamentos e no Sistema Elétrico do Navio.....	32
3.3.1	Ressonância	32
3.3.2	Gerador.....	33
3.3.3	Transformador.....	33
3.3.4	Motores de Indução.....	33
3.3.5	Lâmpadas Elétricas	34
3.3.6	<i>Uninterruptible Power Supply (UPS)</i>	34
3.3.7	Cabos Elétricos.....	34
3.3.8	Equipamentos de Medição	35
3.3.9	Disjuntores	35
3.4	Normas Técnicas e Recomendações de Harmônicos	35
3.4.1	IEEE	36
3.4.2	<i>International Electrotechnical Commission(IEC)</i>	37
3.4.3	Sociedade Classificadora de Navios	39
Capítulo 4 - Modelagem Computacional		41
4.1	Modelo dos Componentes do Navio no ATPDraw	44
4.1.1	Gerador.....	44
4.1.2	Transformador.....	44
4.1.3	Cabos.....	45
4.1.4	Cargas Lineares e Não Lineares.....	45
4.1.5	Motores Elétricos de Propulsão.....	45
4.2	Simulações de QEE	47
Capítulo 5 - Resultados		53
5.1	Configuração 1.....	53
5.2	Configuração 2.....	56
5.2.1	Operação com Velocidade Máxima	56
5.2.2	Operação com Velocidade de Cruzeiro.....	59
5.3	Configuração 3.....	60
5.3.1	Operação com Velocidade Máxima	60
5.3.2	Operação com Velocidade de Cruzeiro.....	63
5.4	Configuração 4.....	64
5.4.1	Operação com Velocidade Máxima	64
5.4.2	Operação com Velocidade de Cruzeiro.....	66

5.5	Configuração 5.....	68
5.5.1	Operação com Velocidade Máxima	68
5.5.2	Operação com Velocidade de Cruzeiro.....	71
5.6	Configuração 6.....	72
5.6.1	Operação com Velocidade Máxima	72
5.6.2	Operação com velocidade de Cruzeiro.....	74
5.7	Configuração 7.....	75
5.7.1	Operação com Velocidade Máxima	75
5.7.2	Operação com Velocidade de Cruzeiro.....	77
Capítulo 6 - Mitigação dos Harmônicos.....		81
6.1	Configuração 3.....	83
Capítulo 7 - Conclusões e Trabalhos futuros		85
7.1	Conclusões	85
7.2	Trabalhos Futuros	86
Referências Bibliográficas.....		88
Anexo A –Parâmetros de Entrada no ATPDraw Para a Configuração 2		93
A.1	Transformadores Abaixadores	93
A.2	Geradores	93
A.3	Cabos Elétricos	93
A.4	Injeção de Fontes de Corrente para Retificador de 12 pulsos.....	94
A.5	Injeção de Fontes de Corrente para Retificador de 24 pulsos.....	94
A.6	Transformadores Defasadores de 12 pulsos	94
A.7	Transformadores Defasadores de 24 pulsos	95
A.8	Representação da Carga por Fonte de Corrente para 12 Pulsos	95
Anexo B –Implementação do Sistema Elétrico no ATPDraw		97
B.1	Modelo da Injeção de Fontes de correntes no ATPDraw	97
B.2	Modelo do retificador alimentando fonte de corrente representando a carga no ATPDraw.....	98
B.4	Modelo do Sistema de Baixa Tensão Implementado no ATPDraw	99

Lista de Figuras

Figura 1 - Primeiro navio com rede e lâmpada elétrica: SS Columbia.	2
Figura 2 - Vandal: primeiro navio dotado de propulsão elétrica.	9
Figura 3 - Configuração de propulsão Diesel-Elétrica.	10
Figura 4 - Configuração de Propulsão Elétrica Integrada	11
Figura 5 - Configuração de Propulsão Híbrida.....	12
Figura 6 - Zumwalt, contratorpedeiro da U.S Navy	13
Figura 7 - Queen Elizabeth Porta aviões da Royal Navy	14
Figura 8 - Mistral da marinha francesa.....	15
Figura 9 - Motor de indução avançado de 15 fases	19
Figura 10 - Motor Síncrono HTS	21
Figura 11 - – Motor CC homopolar.....	22
Figura 12 - Formas de onda de uma carga linear	30
Figura 13 - Formas de onda de uma carga não linear.....	30
Figura 14 - Acionamento do Motor Elétrico de Propulsão	42
Figura 15 - Acionamento do Motor Elétrico de Propulsão	43
Figura 16 - Representação de uma carga não linear para análise harmônica	43
Figura 17 - Modelo do gerador e sua respectiva reatância sub-transitória.....	44
Figura 18 - Modelo do transformador utilizado nas simulações	44
Figura 19 - Modelo dos cabos utilizados nas simulações.....	45
Figura 20 - Modelo das cargas não lineares utilizadas nas simulações.....	45
Figura 21 - Modelo do motor na metodologia de injeção de correntes harmônicas	46
Figura 22 - Modelo do motor com a modelagem de retificadores multipulsos alimentando fonte de corrente	47
Figura 23 - Modelo do motor com a modelagem de retificadores multipulsos alimentando resistência	47
Figura 24 - Configuração 1: planta elétrica com propulsão convencional	48
Figura 25 - Sistema elétrico do navio com propulsão elétrica	49
Figura 26 - Configuração da planta com propulsão elétrica operando na velocidade máxima	50
Figura 27 - Configuração da planta com propulsão elétrica operando na velocidade de cruzeiro	51
Figura 28 - Forma de onda da tensão no QE1	54

Figura 29 - Espectro harmônico da tensão no QE1	54
Figura 30 - Espectro harmônico da tensão no QE1	55
Figura 31 - Espectro harmônico da tensão no QE1	55
Figura 32 - Forma de onda da corrente no QE-AT.....	57
Figura 33 - Forma de onda da tensão no QE-AT	57
Figura 34 - Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT.....	58
Figura 35 - Forma de onda da tensão no QE-1-BT	58
Figura 36 - Forma de onda da tensão no QE-2-BT	59
Figura 37 - Forma de onda da tensão no QE-AT	60
Figura 38 - Forma de onda de corrente no QE-AT.....	61
Figura 39 - Forma de onda da tensão no QE-AT	61
Figura 40 - Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT.....	62
Figura 41 - Forma de onda da tensão no QE-1-BT	62
Figura 42 - Forma de onda da tensão no QE-2-BT	63
Figura 43 - Forma de onda da tensão no QE-AT	63
Figura 44 - Forma de onda da corrente no QE-AT.....	64
Figura 45 - Forma de onda da tensão no QE-AT	65
Figura 46 - Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT.....	65
Figura 47 - Forma de onda da tensão no QE-1-BT	66
Figura 48 - Forma de onda da tensão no QE-2-BT	66
Figura 49 - Forma de onda da tensão no QE-AT	67
Figura 50 - Comparativo dos principais harmônicos de corrente para as três configurações dos retificadores de 12 pulsos	67
Figura 51 - Comparativo dos principais harmônicos de tensão para as três configurações dos retificadores de 12 pulsos	68
Figura 52 - Forma de onda da corrente no QE-AT.....	69
Figura 53 - Forma de onda da tensão no QE-AT	69
Figura 54 - Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT.....	70
Figura 55 - Forma de onda da corrente no QE-1-BT	70
Figura 56 - Forma de onda da corrente no QE-2-BT	71
Figura 57 - Forma de onda da tensão no QE-AT	71
Figura 58 - Forma de onda da corrente no QE-AT.....	72
Figura 59 - Forma de onda da tensão no QE-AT	73

Figura 60 - Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT	73
Figura 61 - Forma de onda da tensão no QE-1-BT	74
Figura 62 - Forma de onda da tensão no QE-2-BT	74
Figura 63 - Forma de onda da tensão no QE--AT	75
Figura 64 - Forma de onda da corrente no QE--AT	76
Figura 65 - Forma de onda da tensão no QE—AT.....	76
Figura 66 - Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT	76
Figura 67 - Forma de onda da tensão no QE-1-BT	77
Figura 68 - Forma de onda da tensão no QE-1-BT	77
Figura 69 - Forma de onda da tensão no QE-AT	78
Figura 70 - Comparativo dos principais harmônicos de corrente para as três configurações dos retificadores de 24 pulsos	79
Figura 71 - Comparativo dos principais harmônicos de corrente para as três configurações dos retificadores de 24 pulsos	79
Figura 72 - Sistema elétrico do navio com filtros passivos.....	81
Figura 73 - Forma de onda da tensão no QE-AT	84

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre os resultados com passo de integração fixo e variável.....	15
Tabela 2 - Distúrbios elétricos na categoria de eventos.	28
Tabela 3 - Distúrbios elétricos sustentáveis.	29
Tabela 4 - Limites de distorção de tensão	36
Tabela 5 - Limites de distorção de corrente para sistemas entre 120 V e 69 kV	37
Tabela 6 - Limites de distorção de tensão individual para baixa tensão	38
Tabela 7 - Limites de harmônico de corrente em relação a fundamental.....	39
Tabela 8 - Limites de harmônicos de tensão das sociedades classificadoras	40
Tabela 9 - Configurações utilizadas nas simulações	52
Tabela 10 - Valores de THD de tensão e corrente nos principais pontos do sistema.....	80
Tabela 11 - Valores do filtro para a configuração 3	83
Tabela 12 - Valores de THD após a inserção do filtro para a configuração 3.....	83

Lista de Abreviaturas

AFE	<i>Active Front End</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CSI	<i>Current Source Inverter</i>
DFE	<i>Direct Front End</i>
DGA	<i>Direction générale de l'armement</i>
DPA	<i>Defence Procurement Agency</i>
ESTD	<i>Electric Ship Technology Demonstrator</i>
HTS	<i>High-Temperature Superconductors</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEP	<i>Integrated Electric Propulsion</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHC	<i>Individual Harmonic Component</i>
LCI	<i>Load commutated inverter</i>
LTS	<i>Low Temperature Superconductors</i>
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>
PMSM	<i>Permanent-Magnet Synchronous Motor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QE1	Quadro Elétrico 1
QE2	Quadro Elétrico 2
QE-1-BT	Quadro Elétrico 1 de Baixa Tensão
QE-2-BT	Quadro Elétrico 2 de Baixa Tensão
QE-AT	Quadro Elétrico de Alta Tensão

TDD	<i>Total Demand Distortion</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UK	<i>United Kingdom</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
US	<i>United States</i>
USS	<i>Unisted States Ship</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

Lista de Símbolos

- ϕ_1 - Ângulo do fator de potência 1
- ϕ_2 - Ângulo do fator de potência 2

Capítulo 1 - Introdução

A utilização de redes elétricas em navios nos remete ao fim do século XIX, mais especificamente aos anos 1880, onde foi realizada a primeira instalação de uma rede elétrica em um navio, tratava-se de uma rede elétrica de corrente contínua (CC) no navio cargueiro e de passageiro americano SS Columbia, em destaque na Figura 1, movido a carvão, sendo a primeira aplicação comercial de lâmpadas elétricas fora do laboratório de Thomas Edison [1]. A partir do início do século XX houve uma intensa e contínua revolução dos sistemas e equipamentos elétricos. A evolução da eletrônica de potência, que proporciona o fácil controle dos mais diversos equipamentos elétricos, fizeram aumentar significativamente os dispositivos eletrônicos em navios e instalações *offshore* nas últimas décadas [2] e, como consequência, as discussões sobre problemas de qualidade de energia são destacadas em publicações recentes como Mindykowski e Tarasiuk [3] e Tara-siuk [4]. A propulsão elétrica vem ganhando cada vez mais espaço em aplicações navais recentes, inclusive militares que é foco deste trabalho, devido a simplicidade e eficiência no controle de velocidade proporcionado pelos conversores de frequência (*drives*), bem como a redução no consumo de combustível, número de membros da tripulação, emissões de poluentes e custos de manutenção. Aliado às vantagens proporcionadas pela utilização da propulsão elétrica, estão o aumento da demanda elétrica nas embarcações, devido a utilização de radares de alta potência e, no futuro próximo, armas elétricas [5], fazendo a propulsão elétrica padrão para determinadas embarcações.

Os *drives* são comumente utilizados em embarcações, tal como apontados em Schoyen e Sow [6]. Uma vez que é possível o motor e seu controle estarem localizados em compartimentos distintos, há maior flexibilidade para o arranjo dos equipamentos, além disso, há ausência de engrenagens redutoras e a utilização de geradores com maior capacidade de potência aumentam a vida útil do navio, sendo que os geradores alimentam propulsão e auxiliares, possibilitando de forma relativamente simples o aumento da demanda de energia elétrica necessária na medida em que equipamentos que consomem mais energia sejam instalados a bordo. É estimado para um navio de propulsão elétrica uma vida útil de aproximadamente 50 anos, enquanto os de propulsão convencional variam entre 25 e 40 anos [7]. A introdução de motores elétricos para o sistema de propulsão principal do navio traz consigo mudanças importantes na rede elétrica do navio, a esta filosofia dá-se o nome de "Navios elétricos" [8]. Em "Navios elétricos", o sistema de propulsão elétrica representa a

maior carga conectada à rede elétrica, sendo assim, seu comportamento afeta toda a filosofia de distribuição de energia elétrica da embarcação. As correntes harmônicas, geradas por *drives* e cargas não lineares de uma maneira geral, influenciam a rede, podendo causar distorção significativa na tensão. Quando a distorção de tensão interage com outros equipamentos conectados à rede, distúrbios indesejados podem ocorrer [9]. Assim, quando da utilização do sistema de propulsão elétrica para embarcação, torna-se necessário avaliar os índices de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) da rede elétrica de bordo. Essa necessidade cresce em importância uma vez que os navios possuem como característica serem sistemas isolados e, portanto, são mais sensíveis às variações que podem ocorrer no sistema elétrico.

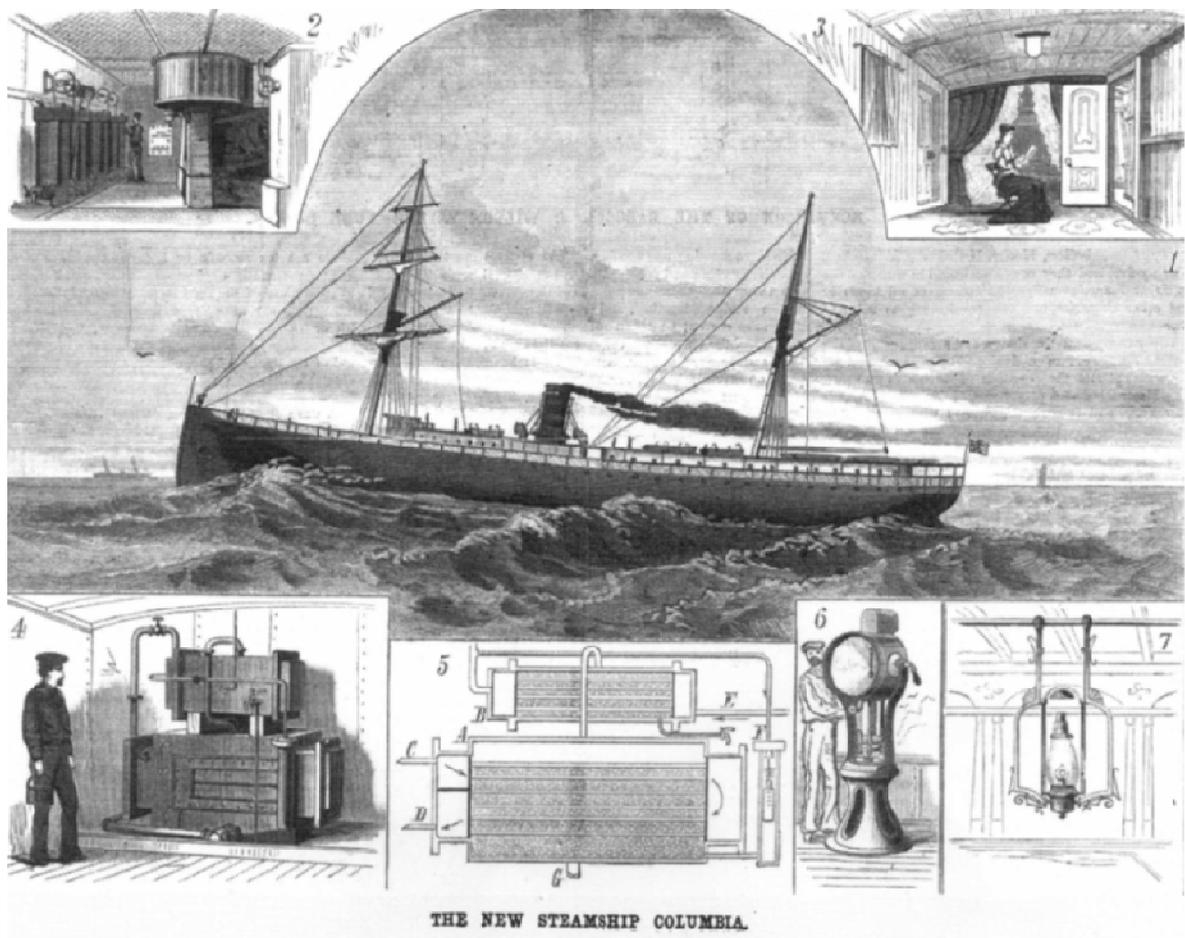


Figura 1-Primeiro navio com rede e lâmpada elétrica: SS Columbia.

Adaptado de [1].

De acordo com Moya et al. [10] o fenômeno de distorção de corrente e tensão relacionado a componentes harmônicos são inconvenientes para fornecedores e consumidores

de energia. Este fenômeno é relativamente novo, pois as fontes e equipamentos eletrônicos, como lâmpadas fluorescentes compactas, controladores de velocidade do motor, retificadores e fontes de energia ininterruptas são possíveis graças ao advento da eletrônica de potência. A eficiência da energia é um dos principais temas discutidos em projetos de navios, mais focados em aspectos ambientais e redução de combustível, especialmente redução da emissão de CO₂ como discutido em [11,12] e aumento da eficiência energética em navios [13]. Um parâmetro comum usado para quantificar esta é a Distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion* - THD), cujo monitoramento é uma medida importante para a preservação da QEE e a operação do sistema elétrico.

Uma definição de QEE é descrita no IEEE 1159-2009 [14]: o termo qualidade de energia refere-se a uma ampla gama de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e a corrente em um tempo e localização determinados no sistema elétrico. De acordo com esta definição, QEE não é apenas um grupo de parâmetros técnicos, mas o resultado da interação de diferentes elementos. Neste contexto, a QEE em um navio pode ser descrita pelo conjunto de parâmetros que envolvem os processos de geração, distribuição e uso da energia elétrica em cada um dos estados operacionais do navio (isto é, ancorado, manobra, cruzeiro ou combate), bem como, o seu impacto no funcionamento e segurança do navio como um todo. Devido a importância do tema, várias publicações foram realizadas recentemente acerca de tecnologias aplicadas à propulsão elétrica e QEE. Harmônicos são citados como um dos principais desafios a serem sobrepostos pela propulsão elétrica em [15], uma revisão sobre medição e análise de QEE é discutido em [16], Giannoutsos e Manias apresentam uma metodologia de filtros para aplicações de drives em embarcações [17], QEE em sistemas elétricos com armazenamento de energia através de baterias é tratado em [18], assim como eficiência energética utilizando sistemas CC em embarcações [19], além de tecnologias de motores e acionamentos elétricos [20, 21 e 22].

Os principais padrões existentes estão relacionados e baseados na avaliação da qualidade da energia elétrica em redes industriais conectadas a um sistema maior de fornecimento de energia com diversas fontes geradoras, sistemas de redução/elevação da tensão, sistemas de compensação entre outros serviços de suporte e auxiliares. Pode-se então dizer que corresponde ao estado da arte nos que diz respeito a índices de qualidade de energia das redes elétricas. Os valores adotados nas normas e recomendações de QEE, de uma forma geral, são a base para os documentos que abordam a qualidade da energia em sistemas de energia a bordo de navios. Algumas semelhanças entre as normas relativas aos sistemas

terrestres e marítimos são bastante claras, como observado quando comparamos as normas relativas a QEE, terrestres ou para aplicações navais, da *International Electrotechnical Commission* (IEC) [23-28] e *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [14, 29 e 30], com as recomendações das sociedades classificadoras de navios [31-34] quando se supõe que o padrão de qualidade de energia se baseia em dois aspectos principais: (i) definição de benchmarks técnicos e seus limites permitidos e (ii) determinação de métodos para tomar suas medidas. Além disso, algumas regras de sociedades classificadoras de navios, como nas referências [31-34], são resultado das normas anteriormente mencionadas [23-30].

1.1 Motivação

A necessidade de patrulhar e proteger a Amazônia azul aumenta a importância estratégica da Marinha do Brasil no cenário internacional, sendo assim, se faz necessário uma marinha forte e atualizada. A indústria naval está em constante evolução no que diz respeito a abertura para novas tecnologias, devido a importância dos mares para o transporte de cargas de grande valor agregado, e do petróleo, uma das principais fontes de energia utilizadas há algumas décadas.

Os recentes sucessos obtidos pelas principais marinhas do mundo, especialmente a *UK Royal Navy* [35] e *US Navy* [5], em grandes projetos de navios movidos a propulsão elétrica, evidenciam a necessidade desta tecnologia ser dominada pela Marinha do Brasil, de forma a manter-se atualizada com as tecnologias utilizadas ao redor mundo. Entretanto, a aplicação de motores elétricos de propulsão instalados a bordo dos navios requer cuidados e estudos criteriosos, especialmente do sistema de distribuição, uma vez que uma usina, a depender da potência demandada, de média tensão pode ser adotada para ser instalada a bordo do navio.

Estudos sobre propulsão elétrica já foram conduzidos na Marinha do Brasil, com destaque para Alves [7], que trata da modelagem de diferentes tipos de motores elétricos para aplicação em propulsão de navios. O navio de socorro submarino Felinto Perry, pertencente a Marinha do Brasil, tem como acionamento do sistema de propulsão motores elétricos, porém trata-se de um sistema arcaico e já em desuso, uma vez que a variação de velocidade do navio não é realizada através de conversores de frequência e sim pelo passo da hélice, portanto, não

se aplica a tecnologia utilizada para os modernos navios movidos por motores elétricos projetados e utilizados atualmente.

O aumento massivo dos dispositivos eletrônicos nas embarcações fez aumentar, de forma significativa, as cargas não lineares presentes nas embarcações, além disso, para navios dotados de propulsão elétrica, a maior carga conectada ao sistema são os *drives*, responsáveis pela partida e controle de velocidade dos motores, ou seja, a grande maioria das cargas conectadas a rede elétrica do navio são compostas por cargas não lineares. Este contexto, somado às características da rede da embarcação, evidenciam a necessidade de se realizar estudos de QEE para a implementação de projetos que envolvam motores elétricos para propulsão de navios na Marinha do Brasil.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é realizar um estudo de caso da implementação de motores elétricos para propulsão de um navio de médio porte da Marinha do Brasil, em detrimento da propulsão mecânica convencional utilizada atualmente, e então verificar os efeitos na QEE, especialmente harmônicos, na rede elétrica de bordo. Para a realização do estudo de caso serão considerados algumas configurações de drives disponíveis na literatura, assim como os diferentes modos de operação da embarcação. Para acionamento do navio serão considerados, para a parte a conversão CA/CC, retificadores a diodo, e para a conversão CC/CA, IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

Para realizar a análise de QEE da embarcação é necessário conhecer os dados da rede elétrica do navio, modos de operação e as configurações do conversor de frequência utilizado para acionamento dos motores elétricos da propulsão. A planta elétrica da embarcação convencional será implementada em uma ferramenta computacional para que seus valores nominais sejam verificados.

A partir do modelo da rede elétrica montado em plataforma computacional, serão inseridos os modelos equivalentes propostos para as diferentes topologias de conversores de frequência e, para cada uma delas, analisar o comportamento da rede elétrica de bordo sob o aspecto de QEE em seus respectivos modos de operação. A partir dos resultados obtidos, quando aplicável, serão propostas soluções para mitigar os possíveis problemas que poderão ser causados pelo alto índice de THD, principalmente de tensão, na rede.

É importante ressaltar que o estudo de QEE da rede elétrica da embarcação é apenas um dos estudos a serem realizados para a implementação de um projeto desta magnitude, sendo necessário ainda explorar diversos outros assuntos relativos a rede elétrica da embarcação. Por isso, são necessários estudos cuidadosos e criteriosos quando escolhida a opção de adotar o sistema de propulsão elétrica em navios de médio porte, especialmente quando as tensões envolvidas na usina de energia elétrica se enquadram na média tensão.

1.3 Principais Contribuições

O objetivo principal do presente é implementar em plataforma computacional a planta elétrica de uma embarcação de médio porte da Marinha do Brasil com a inserção de motores elétricos para propulsão, com o auxílio da interface gráfica ATPDraw, e a partir dessas simulações obter os valores relativos a THD de tensão e corrente nos principais pontos da rede elétrica do navio.

Com a rede elétrica do navio modelada no software ATPDraw, posteriormente, será possível realizar diversas outras contribuições objetivando avançar na diminuição de riscos para um projeto desta natureza envolvendo propulsão elétrica. Dentre diversos estudos, além de QEE, que poderão ser realizados a partir do modelo disponível em plataforma computacional, destacam-se:

- Estudos de curto circuito;
- Estudos de sistemas de aterramento;
- Estudos de seletividade e proteção; e
- Estudos de estabilidade.

No âmbito desta dissertação foi publicado o seguinte artigo técnico em periódico internacional indexado com classificação Qualis A1:

RODRIGUES, T.A. ; NEVES, G.S. ; GOUVEIA, L.C.S. ; ABI-RAMIA, M.A. ; FORTES, M.Z. ; GOMES JR., S. . Impact of electric propulsion on the electric power quality of vessels. *ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH*, v. 155, p. 350-362, 2018.

1.4 Estrutura do Documento

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, neste primeiro capítulo introdutório, foi apresentado o contexto em que o trabalho está envolvido, assim como suas principais motivações e objetivos.

No Capítulo 2, "PROPULSÃO ELÉTRICA", apresenta-se o histórico da propulsão elétrica no mundo, passando pelos principais navios de guerra que a utilizaram, assim como recentes projetos que estão sendo testados e executados com essa tecnologia. São descritas as principais vantagens, desvantagens e riscos associados ao sistema de propulsão elétrica. Por fim será tratado o estado da arte dos principais equipamentos, motores e *drives* utilizados para sua aplicação.

O Capítulo 3, "QUALIDADE DE ENERGIA", apresenta os conceitos dos fenômenos que serão avaliados no estudo, os indicadores de QEE normatizados e uma revisão das recomendações das principais sociedades classificadoras de navios no que diz respeito ao tema.

No Capítulo 4, "MODELAGEM COMPUTACIONAL", apresenta-se a modelagem utilizada para a realização das simulações de QEE da planta elétrica da embarcação.

O Capítulo 5, "RESULTADOS", apresenta os resultados obtidos a partir das simulações realizadas, para todas as configurações propostas, a fim de verificar o comportamento do sistema elétrico.

O Capítulo 6 "MITIGAÇÃO DOS HARMÔNICOS", para as configurações necessárias, propõem a mitigação dos efeitos de QEE a partir de filtros passivos e apresenta os novos resultados obtidos com a inserção dos respectivos filtros.

O Capítulo 7, "CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS", apresenta as conclusões desta dissertação, evidenciando a importância e contribuição das análises aqui realizadas. Posteriormente é discutido sobre os trabalhos que possam ser realizados em complemento ao proposto neste trabalho, de forma a explorar outros potenciais riscos na implementação de sistemas de propulsão elétrica aplicada a navios.

Os anexos apresentam as simulações realizadas, com o auxílio da interface gráfica ATPDraw, que subsidiam as análises realizadas neste trabalho.

Capítulo 2 - Propulsão Elétrica

2.1 Histórico da Propulsão Elétrica

A primeira tentativa de utilização da propulsão elétrica em embarcações aconteceu no início do século XIX, precisamente no final dos anos 1830, o engenheiro alemão Moritz Hermann von Jacobi inventou um motor CC e realizou alguns experimentos com pequenos barcos capazes de transportar até 12 passageiros. O motor elétrico de sua última experiência tinha aproximadamente 1 kW de potência e era alimentado através de baterias, atingindo uma velocidade de 4 km/h. As diversas imperfeições no motor proposto fizeram com que não houvesse nenhuma aplicação comercial e a invenção caiu rapidamente no esquecimento [36].

A partir da invenção da lâmpada elétrica incandescente por Thomas Edison, surgiram as primeiras redes elétricas a bordo das embarcações. O navio a vapor de carga e passageiro *SS Columbia* foi a primeira aplicação comercial da lâmpada elétrica, no navio foram instaladas 120 lâmpadas incandescentes distribuídas em vários circuitos e alimentadas através de quatro dínamos conectados ao eixo mecânico movido a vapor. Após o sucesso da aplicação, em 1883 foi instalado uma rede elétrica a bordo do navio *United States Ship (USS) Trenton*, e um ano depois o departamento de navegação americano decidiu que os navios *Atlanta*, *Boston* e *Omaha* deveriam ser equipados com o sistema de iluminação elétrica, fazendo com que as lâmpadas elétricas se tornassem padrão nas aplicações de embarcações comerciais e militares [36].

A primeira aplicação do sistema de propulsão diesel-elétrica em navios aconteceu em 1903, trata-se do *Vandal*, Figura 2, construído na Rússia. O navio possuía 3 motores diesel de 120 HP cada, com transmissão elétrica para os propulsores. Em 1913 foi realizada a primeira aplicação militar da propulsão elétrica, no navio americano USS *Jupiter*, que mais tarde foi convertido no primeiro porta aviões americano USS *Langley*, o navio era composto de um sistema de turbinas a vapor acionando geradores elétricos para alimentar os motores de indução de rotor bobinado do navio. A experiência foi considerada um sucesso, e o mesmo sistema de propulsão foi utilizado no USS *New Mexico*, assim como no segundo e terceiro porta aviões americano USS *Lexington* e USS *Saratoga* [37].

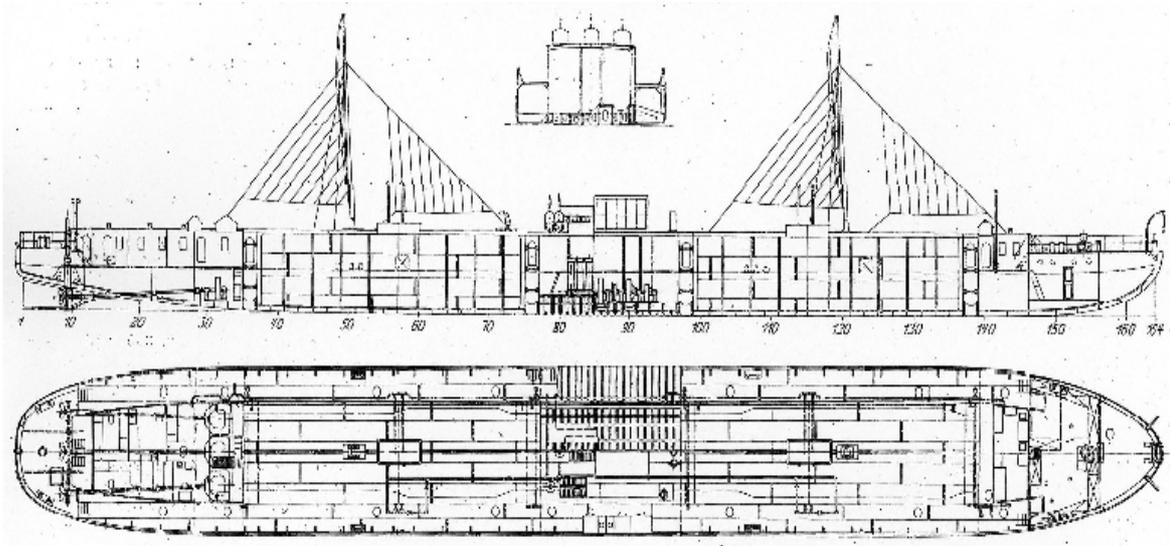


Figura 2-Vandal: primeiro navio dotado de propulsão elétrica.

Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Vandal \(tanker\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Vandal_(tanker))

No período entre as duas grandes guerras a Marinha americana construiu aproximadamente 50 navios dotados de propulsão elétrica, e durante a segunda guerra mundial foram construídos cento e sessenta navios escolta desta tecnologia [38]. Após a segunda guerra mundial, com a melhoria na operação das engrenagens redutoras e o grande espaço necessário para os motores elétricos, os motores diesel tomaram o lugar dos motores elétricos nos sistemas de propulsão de navios, que desapareceram dos novos projetos. O cenário permaneceu inalterado até o início dos anos 1980, quando o advento dos dispositivos semicondutores fez com que a propulsão elétrica fosse, novamente, considerada para a realização de projetos de navios comerciais e militares [37-38].

2.2 Propulsão Elétrica de Navios Nos Dias Atual

2.2.1 Visão Geral da Propulsão Elétrica de Navios

Com a evolução da eletrônica de potência, os navios movidos a propulsão elétrica voltaram a ser uma opção vantajosa, a depender das características da embarcação e, portanto, deve ser considerada quando da condução dos estudos para definição do sistema de propulsão a ser utilizado. A relativa facilidade para se controlar a velocidade dos motores elétricos,

através dos semicondutores de potência, faz com que as embarcações consigam variar sua velocidade por toda curva de potência operando com valores de eficiência próximo ao nominal.

A utilização de motores elétricos para a propulsão de embarcações está em constante evolução, e nos últimos anos ganhou novas formas para sua utilização. A demanda crescente de energia elétrica a bordo aumentou a busca incessante por soluções ótimas que se adequem as necessidades da embarcação, especialmente se tratando da usina de energia, que abriga as grandes máquinas geradoras de energia elétrica, uma vez que peso e espaço são sempre restritivos nos projetos de navios. Neste cenário a propulsão diesel-elétrica, aquela em que motores diesel acionam geradoras elétricos e estes os motores da propulsão, como mostrado na Figura 3, está em desuso, este tipo de projeto não permite a flexibilização necessária exigida em um projeto naval.

A fim de resolver tais inconvenientes de projeto, foi proposto o sistema elétrico de propulsão integrado (*Integrated Electric Propulsion - IEP*), nele as fontes geradoras principais da embarcação são responsáveis tanto pela alimentação dos motores elétricos da propulsão como das cargas auxiliares da embarcação, ou seja, o sistema opera de forma integrada, de acordo com a Figura 4. Tal configuração permite maior flexibilização na concepção da usina de energia, aumentando a confiabilidade do sistema e melhorando o arranjo das praças de máquinas da embarcação.

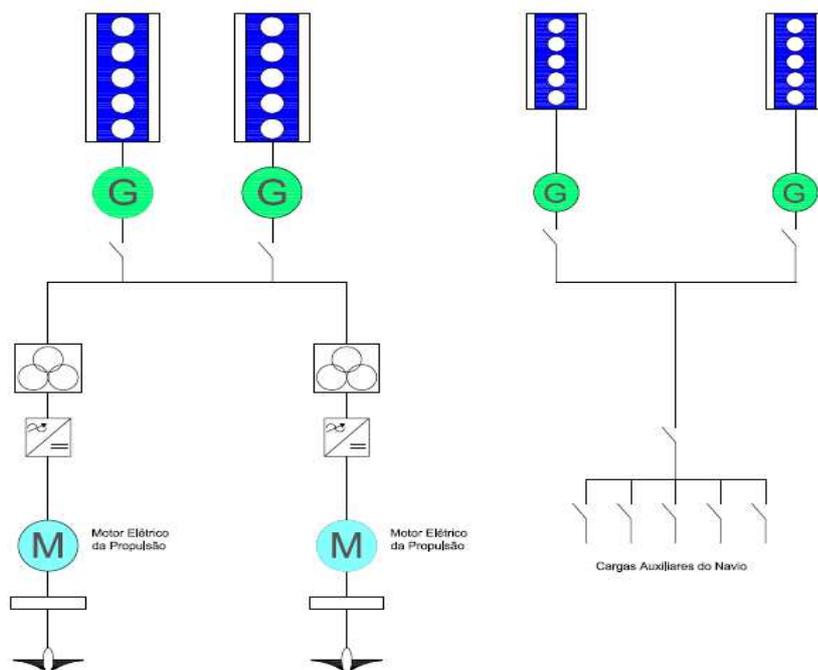


Figura 3-Configuração de propulsão Diesel-Elétrica.

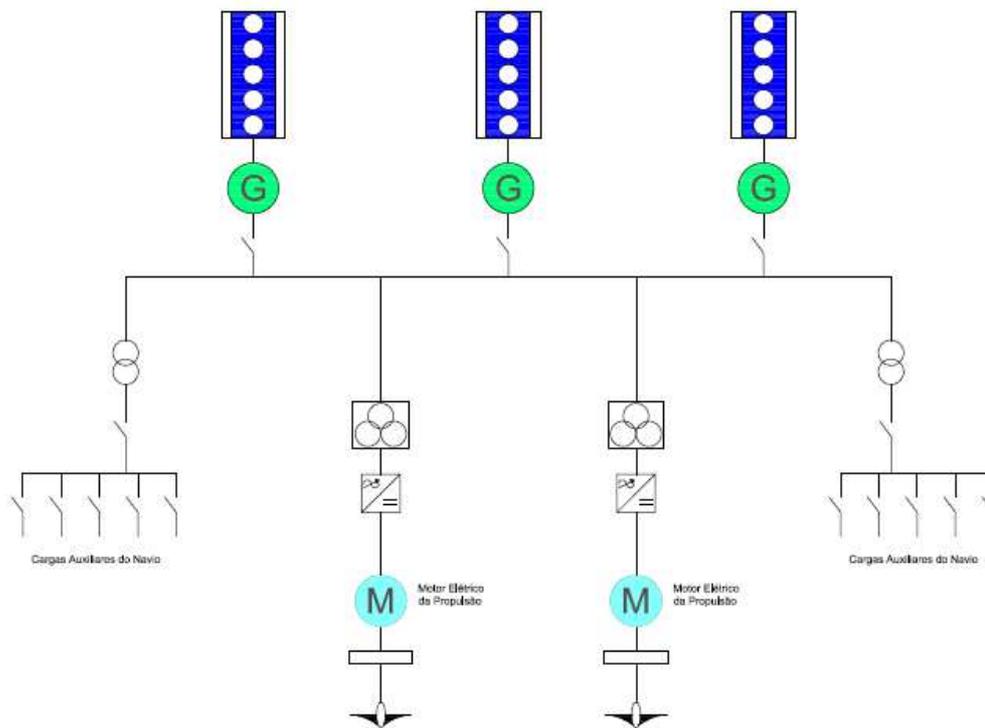


Figura 4-Configuração de Propulsão Elétrica Integrada

Outra configuração bastante utilizada atualmente, especialmente nos navios comerciais, é o conceito de propulsão híbrida. Nela há sempre dois tipos de motores conectados ao sistema de propulsão, um motor elétrico e um outro tipo de motor, que pode ser diesel ou turbina a gás, como mostrado na Figura 5. Nesta configuração, os motores diesel ou turbinas, por exemplo, operam sempre no ponto de operação em que seu rendimento é ótimo, uma vez que fora desse ponto esses equipamentos apresentam uma eficiência muito baixa. Já o motor elétrico, geralmente, é acionado para baixas velocidades, devido a sua característica de acionamento garantir operação na maior parte do tempo com uma alta eficiência, conseguido através dos conversores de frequência. Em alguns casos, quando necessário operar com potência máxima, o motor elétrico funciona como gerador, acionado pela mesma máquina que aciona o eixo da embarcação, e assim fornecendo potência elétrica para as cargas do navio.

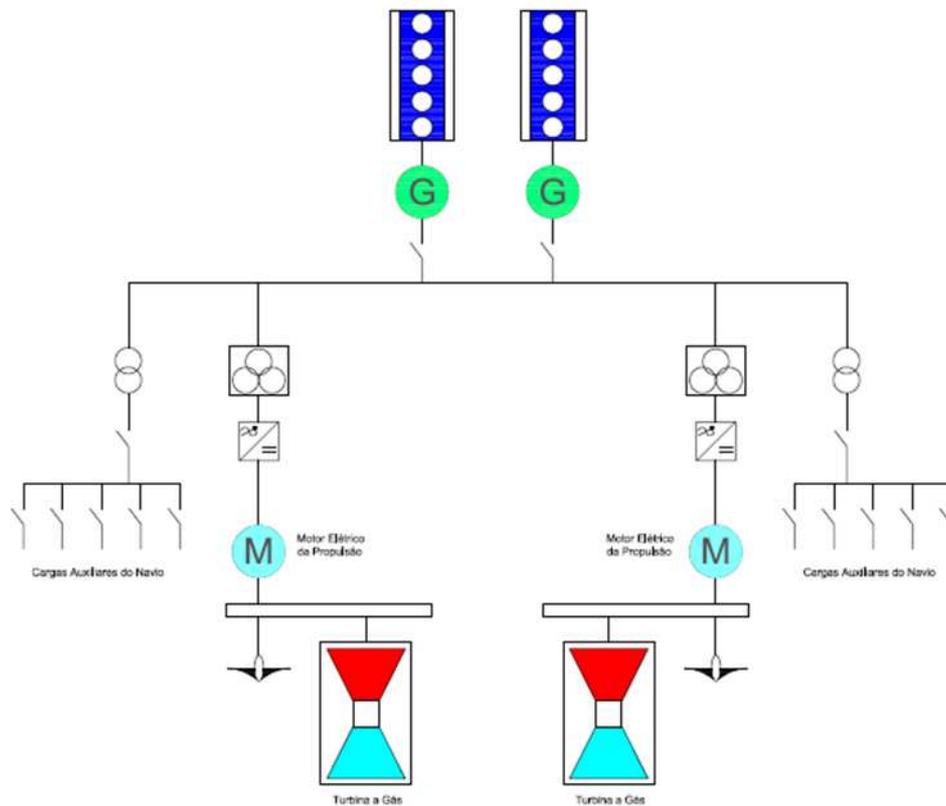


Figura 5-Configuração de Propulsão Híbrida

2.2.2 A Propulsão Elétrica na Marinha Americana

A marinha americana, atualmente na vanguarda quando se trata de tecnologia militar, promove desde o fim da guerra fria estudos para desenvolvimento de tecnologia no combate de superfície. Boa parte desses esforços diz respeito ao desenvolvimento de equipamentos e sistemas elétricos operando de forma totalmente integrada.

A necessidade de aumentar a capacidade de fornecimento de energia elétrica a bordo de navios militares, tornou a propulsão elétrica uma alternativa extremamente vantajosa quando da escolha do tipo de propulsão em uma embarcação militar, isso se deve aos radares de alta potência desenvolvidos nos últimos anos, projetos recentes de integração de armas elétricas e catapultas eletromagnéticas, como a utilizada no porta aviões *USS Gerald R. Ford*(CVN78). A facilidade para integração dos sistemas alimentados eletricamente é outro ponto muito importante e explorado nos projetos de propulsão elétrica [5]. Toda essa gama de fatores que contribuem para a adoção de navios elétricos, somado a maturidade adquirida pela *US Navy* para elaboração de projetos e construção de navios dotados de propulsão elétrica,

culminaram no mais moderno navio já construído, trata-se do contratorpedeiro *USS Zumwalt* (DDG 1000), mostrado na Figura 6.



Figura 6-*Zumwalt*, contratorpedeiro da U.S Navy

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Zumwalt-class_destroyer

2.2.3 *O Electric Ship Technology Demonstrator (ESTD)*

No início de 1999 os ministérios da defesa francês e britânico aprovaram um financiamento de um laboratório para testes de equipamentos para os navios elétricos, o *ESTD*, por intermédio do *Direction générale de l'armement (DGA)* e *Defence Procurement Agency (DPA)*, e no ano 2000 foi assinado um acordo técnico de cooperação entre os dois países sobre pesquisa e tecnologia de defesa. A empresa *Alstom Power Conversion* foi a escolhida para implementar e apresentar os resultados dos testes realizados no *ESTD* [35].

A necessidade do *ESTD* se deu devido aos riscos e desafios associados a aplicação de navios elétricos militares. Quando implementado o *ESTD*, foram considerados os seguintes fatores como vitais para a aplicação do navio elétrico [39]:

- Motores elétricos com alta densidade de potência, compatíveis com as características torque x velocidade das embarcações e discrição acústica;
- Geradores com baixa assinatura acústica, resistente a choques, bom desempenho em baixa carga e carga nominal, a fim de diminuir a quantidade de geradores a bordo;
- Confiabilidade do sistema de alta-tensão em condições degradadas;

- Estabilidade da rede inclusive nos transitórios;
- Qualidade de energia; e
- Integração de futuros sistemas de armas elétricas.

Foram conduzidos testes no *ESTD* com relação às configurações propostas para as *type-45*, contratorpedeiros com sistema *IEP* da *UK Navy* [39]. Os contratorpedeiros *Type 45*, uma das classes de navios mais modernos da marinha inglesa, possuem o motor de indução avançado em seu sistema de propulsão, assim como os porta-aviões da classe *Queen Elizabeth*, Figura 7, recém construídos pela *UK Navy* e são os mais importantes navios da *Royal Navy*. Além destes, a *Royal Navy* ainda possui dois navios de assalto anfíbio da classe *Albion*, um navio auxiliar o *Mounts Bay*, dois navios tanques classe *wave* e dois navios hidrográficos da classe *Echo*, todos dotados do sistema *IEP*.



Figura 7-*Queen Elizabeth* Porta aviões da *Royal Navy*

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Queen_Elizabeth-class_aircraft_carrier

A marinha francesa também realizou projetos e construção de navios dotados da tecnologia *IEP* para propulsão, em 1997 decidiu lançar o programa para construção de navios de assalto anfíbio da classe *Mistral*. A necessidade de realizar diferentes funções levou a DGA a optar pelo sistema *IEP*. Em 2006 foram comissionados o *Mistral*, ilustrado na Figura 8, que dá nome a classe, e o *Tonerre*, e em 2012 o terceiro navio da classe o *Dixmude*. A classe *Mistral* está entre os maiores navios franceses, e são classificados como os mais originais, sendo, portanto, referência para os futuros programas da marinha francesa [40].



Figura 8-*Mistral* da marinha francesa

https://en.wikipedia.org/wiki/Mistral-class_amphibious_assault_ship

2.2.4 A Propulsão Elétrica nas Demais Marinhas

Além das marinhas americana, britânica e francesa, que conduziram grandes projetos de propulsão elétrica nos últimos anos, várias marinhas optaram por esse tipo de propulsão para atualizar sua respectiva frota. A Tabela 1 apresenta as principais aplicações da IEP em navios de guerra ao redor do mundo.

Tabela 1- Comparação entre os resultados com passo de integração fixo e variável.

País	Classe	Tipo de embarcação	Propulsão			
			Eixos	Motores (total)	Tipo Motor / Propulsor	Fabricante
Reino Unido	Queen Elizabeth	Aeródromo	2	4 x 20MW	Indução Avançado / Embarcado	Converteam
Reino Unido	Daring (Type 45)	Fragata	2	2 x 20MW	Indução Avançado / Embarcado	Converteam
Reino Unido	Albion	Assalto Anfíbio	2	2 x 6MW	Síncrono / Embarcado	Alstom

País	Classe	Tipo de embarcação	Propulsão			
			Eixos	Motores (total)	Tipo Motor / Propulsor	Fabricante
Reino Unido	Wave	Tanque	1	2 x 7MW	-	Alstom
Reino Unido	Bay	Assalto Anfíbio	2	2 x 4,4MW	Indução / Embarcado	Siemens
Reino Unido	Echo	Hidrográfico Multi-propósito	2	2 x 1,75MW	Ímã Permanente / Embarcado	ABB
EUA	Zumwalt	Fragata	2	2 x 34,6MW	Indução Avançado / Embarcado	Converteam
EUA	Lewis and Clark	Carga	1	2 x 11,3MW	Síncrono em tandem / Embarcado	Alstom
EUA (Coast Guard)	Healy	Quebra-gelo	2	2 x 11,2MW	Síncrono Duplo Enrolamento / Embarcado	Alstom
França	Mistral	Assalto Anfíbio	2	2 x 7MW	Azimuth thruster	Rolls-Royce Mermaid
Holanda	Rotterdam	Assalto Anfíbio	2	4 x 3MW	2 por eixo, em tandem / Embarcado	Heloc
Espanha	Juan Carlos I	Assalto Anfíbio	2	2 x 11MW	Azimuth thruster	Siemens
Austrália	Canberra	Porta helicópteros	2	2 x 11MW	Azimuth thruster	Siemens
Japão	Shirase	Quebra-gelo	2	4 x 5,5MW	Indução / Embarcado	Hitachi
Alemanha	Planet	Pesquisa (SWATH)	2	4 x 1,04MW	Ímã Permanente / Embarcado	MM Magnet-Motor
Alemanha (German Customs Adm)	Helgoland	Patrulha (SWATH)	2	2 x 3,8MW	Síncrono / Embarcado	Siemens

2.3 Vantagens da Utilização da Propulsão Elétrica

A propulsão elétrica apresenta algumas vantagens quando utilizada em detrimento da propulsão convencional, abaixo estão destacados os principais benefícios de sua utilização [38]:

- O arranjo do navio ganha em flexibilidade, sendo possível que motores, transformadores e conversores de frequência fiquem localizados em compartimentos distintos;
- Há significativa melhora no controle de velocidade do sistema de propulsão devido ao acionamento quase instantâneo dos semicondutores de potência;
- A propulsão elétrica proporciona uma operação bem mais silenciosa quando comparada com a propulsão mecânica convencional;
- Redução no número de geradores, uma vez que não há necessidade de geradores no navio com a finalidade apenas de prover redundância;
- Redução da assinatura acústica;
- Economia de combustível, as máquinas primárias que geram a energia elétrica para o navio operam quase sempre próximo ao seu ponto ótimo de trabalho;
- Redução dos custos de manutenção. O ponto ótimo de trabalho das máquinas que acionam o gerador faz com que se reduza o intervalo de manutenção, além disso, com um projeto de concepção bem definido, poderá, em alguns casos, alternar a operação das máquinas; e
- Flexibilidade na utilização de fontes geradoras, como por exemplo a utilização de geradores com fontes primárias distintas;

2.4 Desvantagens e Riscos da Utilização da Propulsão Elétrica

Apesar da propulsão elétrica apresentar diversas vantagens associadas à sua utilização, há desvantagens e riscos a serem analisados quando a opção por esse sistema de propulsão é escolhida, dos quais destacam-se [38]:

- A eficiência entre o motor de propulsão e o eixo é reduzida. Na transmissão mecânica as perdas são reduzidas e o sistema atinge cerca de 97% de eficiência, enquanto na propulsão elétrica aproximadamente 92%;
- Há um aumento no espaço e peso dos equipamentos associados a propulsão elétrica, como inserção de *drives* e cabeamento; e
- Os harmônicos produzidos pelos conversores de frequência podem ocasionar em problemas de qualidade de energia para a rede elétrica da embarcação. No entanto estes problemas podem ser sanados com o uso de filtros, como será mostrado no estudo de caso deste trabalho.

2.5 Motores Elétricos Aplicados a Propulsão de Navios

Diante da crescente demanda na frota de embarcações dotadas de propulsão elétrica, se fez necessário desenvolver motores específicos para tal aplicação, uma vez que a relação potência e pacote dimensional são características fundamentais para aplicações navais devido à constante necessidade de otimização de espaço nos compartimentos das embarcações. Sendo assim, a busca, principalmente pelo aumento na densidade de potência dos motores é sempre um tema relevante. Diferentes tecnologias de motores elétricos são utilizadas na propulsão de navios, portanto, uma análise criteriosa do perfil de operação da embarcação é necessária para escolha da opção mais adequada para determinada aplicação. As principais tecnologias aplicadas a motores elétricos de propulsão são: motores de indução, motores síncronos, motores síncronos com supercondutores de alta temperatura (*High-Temperature Superconductors HTS*) e motor CC homopolar.

2.5.1 Motores de Indução

Os motores elétricos de indução representam a maioria dos motores utilizados na indústria, devido a seu baixo custo e simplicidade de construção. A facilidade na manutenção e a confiabilidade dos motores de indução são fatores atrativos para sua utilização em aplicações de propulsão. Os motores de indução são divididos em dois grupos, gaiola de esquilo e rotor bobinado, as características físicas do segundo, devido ao espaço ocupado, tornam proibitivo sua utilização em aplicações de propulsão de navios.

A partir da necessidade de aperfeiçoar a tecnologia dos motores de indução para aplicação em propulsão de navios, a empresa *ALSTOM* liderou estudos por mais de 15 anos para o desenvolvimento do Motor de Indução Avançado [39], em destaque na figura 9, trata-se de um motor de quinze fases que atende as necessidades para aplicações navais, como o aumento da densidade de potência e redução da assinatura acústica. Esta tecnologia foi a escolhida para empregar o sistema de propulsão dos navios da *U.K Royal Navy*, o *destroyerType-45* e o porta-aviões *Queen Elizabeth II*, além de empregar o mais moderno navio de guerra americano, o DDG-1000 da classe *Zumwalt* [41].



Figura 9-Motor de indução avançado de 15 fases

Fonte: [41]

2.5.2 Motores Síncronos

Os motores síncronos são extensivamente utilizados em aplicação navais comerciais, tanto para navios mercantes como para navios de cruzeiro. Os motores síncronos de ímãs permanentes (*Permanent-Magnet Synchronous Motor* PMSM) são os principais motores síncronos utilizados para propulsão de navios, devido a sua maior densidade de potência e operação silenciosa. Os motores síncronos são divididos em três classes, a depender da direção do fluxo magnético, que são: motor síncrono de fluxo axial, motor síncrono de fluxo radial e motor síncrono de fluxo transversal [42].

O motor síncrono de fluxo axial tem como característica a direção do fluxo paralela ao eixo do rotor, e possui rotor magnético cilíndrico girando dentro do estator cilíndrico. A grande vantagem na utilização do motor síncrono de fluxo axial é com relação a grande densidade de potência conseguida com esta tecnologia [42].

O motor síncrono de fluxo radial apresenta a operação tradicional das máquinas elétricas rotativas. Este motor possui o fluxo magnético no sentido radial, ou seja, ao longo do raio da máquina [42].

O motor síncrono de fluxo transversal é constituído por um disco com borda que gira entre os anéis ranhurados. O motor é configurado com ímãs alinhados em torno da periferia. As bobinas do estator correm coaxialmente com o rotor com o fluxo de enrolamento do estator ligando o fluxo do ímã permanente através de uma série de argolas de estator [42].

Um estudo comparativo entre os motores síncronos aplicados a veículos elétricos realizados em [43], apresenta excelentes valores de eficiência para os três tipos de motores sob estudo. Em resumo, o motor de fluxo axial apresenta a mais alta e ampla região de eficiência ótima. O motor de fluxo transversal apresenta uma alta eficiência em uma ampla faixa de velocidade, especialmente para aplicação com baixo torque e velocidade.

2.5.3 Motor Síncrono HTS

Os avanços no campo dos *HTS* permitiram surgir uma nova classe de motores síncronos, os super motores. Quando comparados com motores convencionais na mesma faixa de potência, os motores com a tecnologia *HTS* são mais leves, baratos, compactos e

eficientes, além de melhorar a estabilidade dos sistemas de potência de uma forma geral. A utilização dos fios *HTS*, que operam aproximadamente entre 35 e 40 K, uma temperatura muito mais alta dos que os fios *Low Temperature Superconductors (LTS)* que operam a 4 K, possibilitou a redução da complexidade e custo dos sistemas de refrigeração, além das dificuldades naturais de realizar isolamento térmico a uma temperatura tão baixa [44]. Os motores *HTS* utilizam condutores de cobre convencionais na construção do estator, enquanto os enrolamentos do rotor são compostos por fios *HTS*, resfriados através de criogenia. Para aplicação dos motores *HTS* é necessário um sistema de criogenia que alimenta com fluido frio e recebe fluido aquecido do rotor. O meio de resfriamento utilizado é o nitrogênio líquido [42]. A figura 10 apresenta os principais componentes do motor síncrono *HTS*.

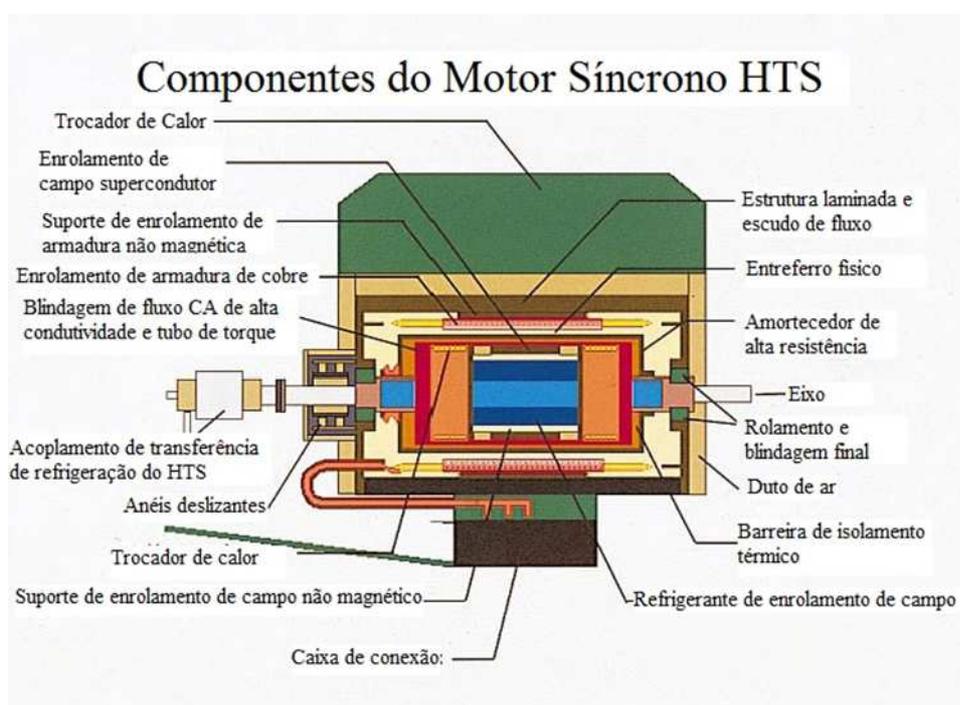


Figura 10-Motor Síncrono *HTS*

Fonte: Adaptado de <https://www.electricityforum.com/iep/electric-motors-anddrives/synchronous-motors>

2.5.4 Motor Homopolar CC Supercondutor

Os motores CC homopolares, figura 11, assim como os motores síncronos *HTS*, utilizam supercondutores para aumentar a intensidade dos campos magnéticos em relação as

tecnologias tradicionais de motores. Por se tratar de um motor CC, o acionamento é mais simples e por consequência menos dispendioso do ponto de vista financeiro [42-45]. Devido as vantagens potenciais deste tipo de motor, a *U.S Navy* em parceria com a *General Atomics*, concentrou esforços para seu desenvolvimento a partir de meados de 1970. A marinha americana inclusive conduziu o primeiro teste operacional deste tipo de motor em 1980, a bordo da embarcação de teste *NSWC Jupiter II*. O motor utilizava cabos *LTS*. A partir de então a tecnologia passou a ser testada utilizando os cabos *HTS* [42].

Os requisitos para aplicações militares são, na maioria das vezes, mais severos e criteriosos para os equipamentos utilizados a bordo, sendo assim, a utilização de motores elétricos para propulsão foi consolidada de forma um pouco mais lenta na indústria militar naval se comparado com os navios comerciais. Entretanto, os recentes grandes projetos em que estão envolvidas especialmente as marinhas britânica e americana, sinalizam que a constante evolução das tecnologias presentes nos motores elétricos irá garantir sua utilização em larga escala nos próximos anos.

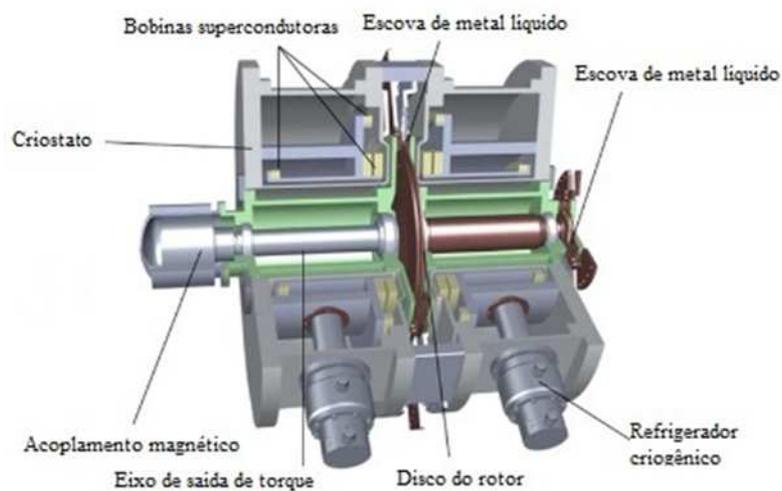


Figura 11— Motor CC homopolar

Fonte: [45]

2.6 Conversores de Frequência Aplicados a Propulsão de Navios

Responsáveis direto pelo aumento massivo na utilização de máquinas elétricas a partir do início da década de 80, os semicondutores de potência estão em constante evolução e melhorando significativamente o desempenho dos conversores de frequência que controlam o acionamento dos motores elétricos. Essa evolução foi, e é, fundamental para a consolidação da utilização da propulsão, sendo possível melhorar o controle e diminuir as dimensões ocupadas pelos *drives* de acionamento.

A escolha do acionamento mais adequado para o sistema de propulsão depende de vários fatores, estando entre os mais importantes: o tipo de motor utilizado, o tempo de resposta requerido, as taxas permitidas de THD de corrente e tensão e o orçamento disponível a ser aplicado no projeto em questão. Há várias topologias de retificadores para o *link* CC e inversores para os conversores de frequência aplicados à indústria naval. Serão tratados aqui os principais debatidos na literatura técnica existente.

2.6.1 Retificadores *Direct Front End* (DFE)

Na configuração DFE o conversor de frequência utiliza ponte retificadora a diodos para prover o link CC dos conversores, sendo sua comutação realizada pela rede. Embora a utilização de retificadores a diodo possa trazer alguns benefícios como simplicidade, dimensões e custo, há o inconveniente da alta taxa de THD gerada na rede, uma vez que não há nenhum tipo de controle na retificação. A alternativa para diminuir os harmônicos proporcionados pela retificação é aumentar o número de pulsos dos retificadores. A configuração padrão para retificadores trifásico é o retificador de seis pulsos, realizando a conexão de múltiplos retificadores de seis pulsos é possível obter retificadores de doze, dezoito, vinte e quatro e trinta e seis pulsos, com a utilização de transformadores defasadores que proporcionam o defasamento necessário entre as formas de onda de tensão.

2.6.2 Retificadores *Active Front End* (AFE)

Os retificadores AFE, em algumas aplicações navais, vem substituindo os retificadores a diodo, especialmente em alguns sistemas híbridos em que as máquinas elétricas funcionam tanto como motor quanto como gerador, caso das fragatas italianas FREMM. Nestes casos, o uso dos retificadores AFE torna-se obrigatório, uma vez que o acionamento deve ser

bidirecional. Os retificadores ativos AFE devem prover o *link* CC a partir da energia proveniente da rede, quando operando como motor, e devem regular a energia para o sistema elétrico na operação como gerador, além disso, a utilização de retificadores AFE proporcionam a possibilidade da frenagem regenerativa, que é a utilização da energia proveniente da frenagem do navio na rede elétrica da embarcação. O uso dos retificadores AFE dispensa a utilização de transformadores defasadores e produzem níveis baixos de THD, em alguns casos pode ser dispensado também a utilização de filtros harmônicos, devido a possibilidade de controle na retificação através dos circuito de potência baseado em elementos IGBT e modulação *Pulse Width Modulation* (PWM). O principal impacto negativo na utilização dos retificadores AFE é o alto custo inicial para obtenção, consideravelmente superior quando comparado aos retificadores a diodo, o que inviabiliza a sua utilização em determinadas aplicações.

2.6.3 Inversor de Corrente Imposta (*Current Source Inverter*)

A partir do link CC alimentado por um retificador e suavizado por um indutor, é caracterizado o inversor de fonte de corrente (*CSI*), ocasionalmente referido como inversor comutado por carga (*Load commutated inverter LCI*). Normalmente utilizado em motores síncronos, também pode ser utilizado para motores de indução com algumas modificações, porém esta aplicação é quase inexistente atualmente. A parte retificadora do conversor é composta por uma ponte retificadora tradicional, ou seja, em relação a rede elétrica não há diferença com relação a topologia utilizada no inversor. No lado da carga, o motor síncrono deve fornecer a tensão de comutação para o inversor, o que significa que ele deve ser executado com ângulo de fase capacitivo. O motor será assim dimensionado para uma corrente mais alta e aumentará de tamanho em comparação com um motor com um fator de potência de 1. O lado do inversor, que alimenta o motor, tem a mesma topologia que um retificador tiristorizado e usa as tensões induzidas do motor em vez da tensão da rede. A corrente de fornecimento contém harmônicos que devem ser considerados durante o projeto do sistema e normalmente devem ser reduzidos pelo uso de uma configuração de 12 pulsos, em 6 fases. A corrente do circuito intermédio é direcionada através das fases do motor, controlando os tiristores da fase do inversor. O *CSI* requer uma força contraeletromotriz induzida do motor para executar a comutação. Por isso, é usado principalmente em unidades

de motor síncrono nas quais o motor pode ser operado com um fator de potência capacitivo. Em velocidades mais baixas, normalmente abaixo de 5-10% da velocidade nominal, a força contraeletromotriz é muito baixa para realizar uma comutação natural. Nessa faixa de velocidade, o *CSI* é executado em modo pulsado, no qual a corrente é controlada no nível zero durante a comutação do estágio de saída do inversor. Uma vez que a corrente e, portanto, o torque é forçado a um nível zero, a pulsação de torque no eixo do motor é grande nesta área operacional. O *CSI* é utilizado normalmente para motores de grande potência, onde possibilitam um rendimento consideravelmente maior do que os motores de indução [2 e 46].

2.6.4 Inversor de Tensão Imposta (*Voltage Source InverterVSI*)

O conversor *VSI* é, de longe, o conversor de frequência mais utilizado em aplicações industriais. Ele proporciona ao acionamento, maior flexibilidade, precisão e desempenho superior e pode ser usado em motores de indução, que é o tipo de motor mais utilizado. É possível também a sua utilização em máquinas síncronas e síncronas de ímãs permanentes com um desempenho muito melhor do que outras alternativas. A principal limitação desta topologia era o limite prático de potência disponibilizado pelos semicondutores de potência, mas à medida que os componentes evoluem, esse limite aumentou e hoje pode ser aplicado em unidades que demandam uma alta potência por meio dos conversores multiníveis que conseguem prover acionamento em uma faixa que vai até 81 MW em aplicações navais. Normalmente um retificador a diodo não controlado é conectado à rede, provendo o link CC do conversor, que é suavizado por um banco de capacitores.

Existem várias maneiras de controlar a comutação para obter a alimentação desejada para o motor. A maneira mais comum e difundida é utilizar o PWM em alguma de suas formas. Na sua versão mais básica, uma tensão trifásica é gerada pela comparação de três valores de referência sinusoidais com um sinal triangular de alta frequência. Enquanto a referência senoidal for maior do que o sinal triangular, o elemento de comutação superior do inversor recebe um sinal de disparo, o inferior é desligado e ocorre o oposto quando o sinal de referência senoidal é menor do que o sinal triangular. As tensões do inversor para os terminais do motor seguem o mesmo padrão. Existem basicamente duas maneiras de realizar o controle:

controle escalar e vetorial, a escolha irá depender das características do acionamento, como tempo de resposta, simplicidade, robustez entre outras [2 e 46].

2.6.5 Cicloconversores

O cicloconversor é um conversor direto sem o *link* CC. A tensão alternada do motor é construída selecionando os segmentos de fase da tensão de alimentação ao controlar a ponte de tiristor anti-paralela. Havendo necessidade de diminuir o conteúdo harmônico produzido pelos retificadores, poderá ser usado retificadores de mais de 6 pulsos, a utilização de retificadores de 6 pulsos poderá dispensar o uso de transformadores, a depender dos níveis de tensão.

A tensão do motor é controlável até aproximadamente um terço da frequência de alimentação, portanto, é o mais aplicável em unidades de eixo direto sem engrenagem.

A tensão do motor contém um nível inferior de harmônicos do que o CSI, e o fator de potência do motor pode ser mantido alto.

O fator de potência da fonte é dependente da tensão do motor e é de aproximadamente 0,76 na faixa de enfraquecimento do campo. O conteúdo harmônico na rede depende da velocidade e deve ser cuidadosamente considerado no design do sistema quando o motor representa grande parte da potência instalada.

Os limites de operação são semelhantes aos encontrados no tipo CSI de unidades de motor síncrono, exceto que as limitações de baixa velocidade não estão presentes, uma vez que a comutação ocorre em direção às tensões da rede e não às tensões do motor. Por conseguinte, o cicloconversor foi preferido em aplicações onde a operação e o desempenho de baixa velocidade são essenciais, especialmente nos sistemas de quebra de gelo, como também em aplicações de embarcações de passageiros, onde a performance de baixa velocidade e manobra é essencial [2 e 46].

Capítulo 3 - Qualidade de Energia

O grande aumento no número de dispositivos chaveados fez com que aumentasse de forma significativa os problemas de qualidade de energia nas redes elétricas. Quando os dispositivos controlados eletronicamente são conectados à rede elétrica de navios não é diferente, podendo ser ainda mais prejudicial e causar degradação na rede, uma vez que as características peculiares de sistemas isolados, como por exemplo, baixa potência de curto circuito pode maximizar os efeitos negativos da inserção de cargas não lineares a bordo.

É vasta a quantidade de definições para QEE na literatura técnica existente, Dugan [47] definiu como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou operação inadequada dos equipamentos, já no IEE Std 1159 [14], QEE é tratado por um conceito mais amplo, sendo resultado de uma interação entre todos os elementos do sistema elétrico, e portanto, definida como uma ampla gama de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e a corrente em um tempo e localização determinados no sistema elétrico. Independente da escolha para a melhor definição de QEE, é fato que havendo indicadores ruins de qualidade de energia os equipamentos sofrerão as consequências, com problemas que variam desde o funcionamento incorreto até a queima do equipamento, além disso há ainda o impacto econômico associado ao mau funcionamento da rede elétrica. A sensibilidade dos equipamentos utilizados atualmente faz com que pequenas perturbações na rede se tornem grandes problemas para os equipamentos, principalmente quando se trata de navios de guerra, em que quaisquer incorreções podem causar comprometimento de toda uma operação.

São muitas as categorias de fenômenos eletromagnéticos utilizados pela comunidade de QEE, estes estão descritos nas Tabelas 2 e 3. Esse trabalho tem com foco restrito os problemas de QEE ocasionado por harmônicos gerados por cargas não lineares na rede elétrica de navios, portanto, nas seções seguintes serão tratados especificamente os detalhes que cercam este fenômeno eletromagnético.

Tabela 2-Distúrbios elétricos na categoria de eventos.
Adaptado [49]

Tipos de Distúrbios	Duração	Método de Caracterização
Transitório impulsivo	Curta duração < 50 ns 50 ns – 1 ms > 1 ms	Tempo de Subida 5 ns 1 μ s 0,1 ms Magnitude de pico Duração
Transitório oscilatório	Curta Duração 0,3 – 30 μ s 20 μ s 5 μ s	Tempo de Subida Banda de Frequência Baixa Frequência: < 5kHz Média Frequência: 5 – 500 kHz Alta Frequência: 0,5 – 5 MHz Magnitude de Pico 0 – 4 pu 0 – 8 pu 0 – 4 pu
Interrupção	Curta Duração	Magnitude < 0,1 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de Ocorrência
Afundamento de tensão	Curta Duração	Magnitude 0,1 – 0,9 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de Ocorrência
Elevação de tensão	Curta Duração	Magnitude 1,1 – 1,8 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de Ocorrência

Tabela 3-Distúrbios elétricos sustentáveis.
Adaptado [49]

Tipos de Distúrbios	Duração	Método de Caracterização
Sobretensão	Estado permanente	Magnitude 1,1 – 1,2 pu Duração > 1min
Sobretensão	Estado permanente	Magnitude 0,8 – 0,9 pu Duração > 1min
Interrupção	Estado permanente	Duração > 3min Frequência de Ocorrência
Flutuação de tensão	Estado permanente	Varição da magnitude Frequência de modulação Frequência de ocorrência
Desequilíbrio de tensão	Estado permanente	Fator de desequilíbrio
Ruídos	Estado permanente ou Curta duração	Magnitude Espectro de frequência
Notches ou Cortes	Estado permanente	Magnitude Duração
Harmônicos	Estado permanente	Espectro harmônico Distorção harmônica

3.1 Harmônicos

Arrilaga define harmônicos em sistemas elétricos como sendo tensões e correntes senoidais múltiplos do sinal principal gerado na frequência fundamental [48]. De acordo com o IEEE Std 519-2014 harmônico é um componente de ordem maior que um da série de Fourier de um sinal periódico [29]. Sendo assim, uma onda deformada é o resultado da superposição de uma série de ondas senoidais, que possui uma componente fundamental e um conjunto de ondas que são denominadas harmônicas [49], e que podem ser encontradas a partir da aplicação da série de Fourier para um sinal periódico.

A geração elétrica é normalmente realizada em uma frequência fixa, e quando alimentam cargas lineares as formas de onda de tensão e corrente são idênticas, estando a diferença somente na amplitude dos sinais, como mostrado, por exemplo, na Figura 12.

Quando cargas não lineares são alimentadas por esse mesmo sistema de geração, componentes harmônicas surgem no sistema, causando distorção harmônica na rede elétrica e, portanto, tensões e correntes já não possuem formas de onda idênticas, como pode exemplificado na Figura 13.

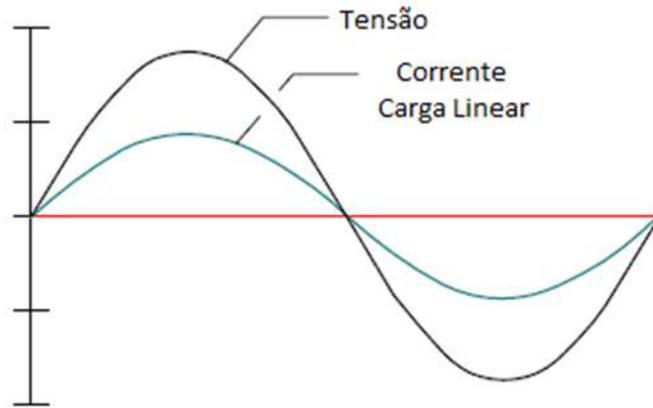


Figura 12- Formas de onda de uma carga linear

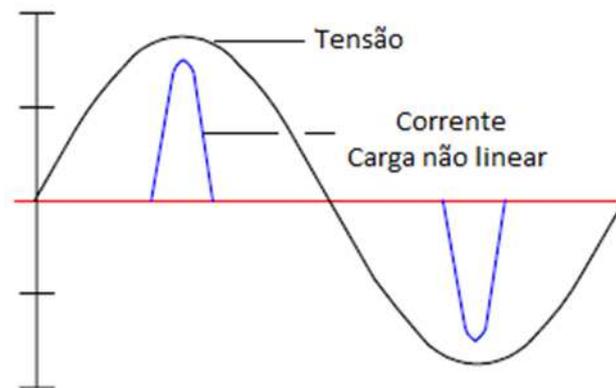


Figura 13- Formas de onda de uma carga não linear

Com a evolução dos dispositivos eletrônicos, as cargas lineares utilizadas atualmente se restringem, basicamente, apenas a aquecedores com resistência elétrica e lâmpadas incandescentes, sendo que esta última tem se tornando cada vez mais escassa. Neste cenário, praticamente todas as cargas elétricas conectadas a rede elétrica produzem componentes harmônicos. Como QEE é uma relação entre os elementos do sistema, cargas não lineares iguais conectadas em sistemas diferentes, irão impactar o sistema de maneira distinta, por exemplo, um sistema elétrico com alta impedância e um baixo valor de correntes harmônicas pode resultar em níveis significativos de distorção de tensão no ponto comum de acoplamento

do sistema, enquanto em sistemas com um alto valor de potência de curto circuito não será afetada de maneira significativa.

3.2 Principais Indicadores de Distorção Harmônica

De forma que se possa quantificar os índices de harmônicos nas instalações é necessário mensurar a conformidade senoidal da tensão e corrente e, por consequência, o desempenho da instalação [49]. A partir deste conceito surgem os indicadores de harmônicos, assim é possível identificar o quão distorcido está o sistema elétrico em relação a suas formas de onda ideais. Serão tratados nesta dissertação os conceitos fundamentais para o entendimento das análises aqui realizadas.

3.2.1 Distorção Harmônica Total (THD)

De acordo com o IEEE Std. 519 [29] THD é definido como a razão entre a raiz quadrada média do conteúdo harmônico, considerando componentes harmônicos até a 50ª ordem e especificamente excluindo inter-harmônicas, expressa como uma porcentagem da fundamental. Componentes harmônicos de ordem maior que 50 podem ser incluídos quando necessário.

A partir deste conceito pode-se perceber que o THD mede o quanto o sinal de tensão ou corrente está distorcida em relação a uma senóide pura. Portanto, em termos matemáticos, THD é definido de acordo com a equação 1:

$$\text{THD}_C = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^n C_h^2}}{C_1} \quad (1)$$

O índice 1 indica a componente fundamental da tensão, enquanto h a respectiva ordem harmônica e C pode representar tensão ou corrente.

3.2.2 Distorção de Demanda Total (TDD)

TDD é definido de forma semelhante ao THD, a exceção que a distorção é expressa como um percentual da corrente máxima demandada e não mais da componente fundamental [29], e pode ser definida como:

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}}{I_L} \quad (2)$$

Na equação 2, h representa a ordem harmônica da corrente e o subíndice L diz respeito a máxima corrente demandada pela carga. A partir da equação 2 é possível perceber que a TDD será sempre menor que a THD, uma vez que o valor máximo de corrente demandada será sempre maior que o valor da componente fundamental.

3.2.3 Componente Harmônico Individual (IHC)

Para quantificar a distorção harmônica individual, ou seja, o percentual harmônico de cada ordem, utiliza-se a equação 3:

$$\text{IHC} = \frac{C_h}{C_1} \quad (3)$$

em que c pode representar tensão ou corrente, h é a ordem harmônica e o índice 1 representa a componente fundamental [49].

3.3 Efeitos Dos Harmônicos Para os Equipamentos e no Sistema Elétrico do Navio

3.3.1 Ressonância

A presença de capacitância no sistema elétrico, como por exemplo, para corrigir fator de potência, pode levar a efeitos significativos na impedância do sistema devido às

frequências harmônicas. Ressonância pode ocasionar altos valores de correntes e/ou tensões, que podem causar severos danos aos equipamentos. A ressonância é verificada quando os valores das reatâncias indutivas e capacitivas são iguais, uma vez que a reatância indutiva é proporcional a frequência enquanto a reatância capacitiva é inversamente proporcional. Há duas formas de ressonância a serem consideradas, que são a ressonância série e a ressonância paralela [2 e 48].

3.3.2 Gerador

Os efeitos dos harmônicos são verificados em geradores que alimentam o sistema elétrico de bordo, especialmente em relação a perdas térmicas, devido ao aumento de calor nas máquinas. As perdas térmicas são divididas em perdas por histerese, correntes de Foucault e perdas no cobre, todas relacionadas com o aumento da frequência das correntes que circulam pela máquina, especificamente para as perdas no cobre é verificado o efeito pelicular mais acentuado devido as componentes de mais alta frequência. Outro efeito prejudicial dos componentes harmônicos para os geradores é o torque pulsante no eixo da máquina, que pode causar desgaste mecânico no gerador [2 e 48].

3.3.3 Transformador

Assim como nos geradores, o efeito primário dos harmônicos verificado nos transformadores é o calor adicional gerado pelas perdas causadas pelas correntes harmônicas, que aumentam as perdas no cobre e perdas por histerese. Outro possível problema para os transformadores é a ressonância entre a indutância do transformador e capacitância do sistema. Um fator importante quando dimensionado o transformador que alimentará carga com uma alta taxa de harmônicos é fator K, que são projetados especialmente para este fim, possuindo menos perdas para as componentes harmônicas de corrente [2 e 48].

3.3.4 Motores de Indução

Muito utilizados para diversos acionamentos nos navios, nos motores de indução, assim como nos transformadores, os harmônicos causam aquecimento devido as perdas

verificadas no cobre e no ferro. O efeito pelicular, em frequências acima de 300 Hz, também é verificado nos motores de indução. Os componentes harmônicos de sequência negativa são responsáveis por gerar torque pulsante nos motores podendo afetar mecanicamente o motor de forma significativa [2 e 48].

3.3.5 Lâmpadas Elétricas

Um efeito bastante notável da má qualidade da energia da instalação que pode ser verificado em lâmpadas elétricas, incandescentes ou fluorescentes, é o efeito flicker. Entre outras coisas, as tensões interharmônicas sobrepostas na tensão de alimentação é uma das causas da cintilação luminosa verificada nas lâmpadas. Além do flicker, a interação entre harmônicos de corrente e as capacitâncias para corrigir o fator de potência interno as lâmpadas fluorescentes podem causar ressonância com a indutância da rede, resultando em danos para as lâmpadas [2].

3.3.6 *Uninterruptible Power Supply (UPS)*

A preocupação com QEE fez aumentar a quantidade de UPS destinadas a cargas sensíveis, que variam desde potências mais baixas até alguns MVA. O efeito das distorções harmônicas nas UPS's é o aquecimento adicional que causam. As baterias, localizadas no lado CC também podem superaquecer. Além disso, distorções excessivas podem causar falha na ponte retificadora de entrada, podendo resultar em ruptura do fusível. Havendo ressonância com filtro de entrada da UPS, a mesma poderá ser desligada, indicando perda da alimentação em corrente alternada (CA). É importante ressaltar que as UPS são também responsáveis pela poluição harmônica da rede, uma vez que produzem um alto conteúdo harmônico [2].

3.3.7 Cabos Elétricos

Os cabos condutores de energia elétrica são fortemente afetados pelo conteúdo harmônico da rede, uma vez que as perdas térmicas são proporcionais ao quadrado da corrente que circula pelos condutores. Deve ser considerado também o efeito pelicular, verificado para as frequências mais altas que aumenta a resistência do cabo e por consequência as respectivas

perdas. Outro fenômeno que afeta a resistência do cabo, análogo ao efeito pelicular, é o efeito de proximidade devido a indutância mútua entre condutores dispostos paralelamente [2].

3.3.8 Equipamentos de Medição

Normalmente medidores são destinados a realizar medição de grandezas senoidais. Tensões e correntes não lineares podem introduzir erros no circuito de medição e, por consequência, acarretar em leituras com percentual significativo de erro. Alguns medidores apresentam como resultado da leitura um valor proporcional ao pico da onda, sendo assim não conseguem detectar os harmônicos presentes no sistema, apenas os medidores true rms são capazes de medir com precisão os valores distorcidos [2].

3.3.9 Disjuntores

A grande maioria dos disjuntores termomagnéticos de baixa tensão utilizam como mecanismo de acionamento os efeitos térmicos das correntes. Para cargas não lineares o efeito térmico será maior do que para cargas lineares de mesma potência. Portanto, é importante a configuração correta do disjuntor de acordo com a carga, para que não haja risco de atuação sem necessidade. Os disjuntores de detecção de pico também são afetados pelos harmônicos, pois o valor de pico das correntes não lineares é maior do que para as respectivas cargas lineares. É comum os novos disjuntores incluírem os dois métodos de proteção, ainda assim sujeito aos problemas causados pelos harmônicos [2].

3.4 Normas Técnicas e Recomendações de Harmônicos

De uma maneira geral normas técnicas estabelecem regras, diretrizes ou características acerca de um material, produto, processo ou serviço. A obediência a uma norma, quando não referendado por uma norma jurídica, não é obrigatório. A partir deste conceito, pode-se entender normas e recomendações técnicas como sendo boas práticas, benchmarkings a serem seguidos para se buscar uma melhoria contínua nos indicadores de processos.

Quando verificado o impacto das cargas não lineares, surgiu a necessidade de criação de normas para estabelecer regras para este tipo de equipamento e sua interação com o sistema elétrico. As principais normas utilizadas para QEE ao redor do mundo são a americana IEEE e a européia IEC, além disso, como parte dos requisitos para classificar um navio, é necessário seguir as recomendações das sociedades classificadoras, que também tratam dos níveis de distorções harmônicas.

3.4.1 IEEE

A norma IEEE 519-2014, *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, trata de recomendações que devem ser aplicadas aos sistemas, operadores e consumidores do sistema elétrico em questão. Os limites são recomendações pretendidas no ponto comum de acoplamento (*Point of Common Coupling - PCC*), que é o ponto comum do sistema, operador e usuário. Além disso há também recomendações com relação às correntes produzidas pelos equipamentos não lineares, ou seja, todos passam a ser responsáveis pela QEE da rede a fim de reduzir os potenciais riscos aos quais o sistema elétrico está submetido.

A Tabela 4 apresenta os níveis individual e total de distorção harmônica de tensão permitidos pela IEEE 519-2014 no barramento para os diferentes níveis de tensão.

Tabela 4-Limites de distorção de tensão
Adaptado [29]

Tensão na Barra	Harmônico Individual (%)	Distorção harmônica Total THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1	1,5

A Tabela 5 apresenta os limites definidos para os harmônicos ímpares com relação a correntes de demanda máxima no barramento. I_{cc} é a máxima corrente de curto circuito no barramento e I_L a corrente máxima demandada pela carga conectada ao barramento.

Tabela 5-Limites de distorção de corrente para sistemas entre 120 V e 69 kV

Adaptado [29] Harmônica de ordem ímpar						
Icc/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	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

IEEE Std 45-2002- *IEEE Recommended Practice for Electric Installations on Shipboard*, que versa sobre recomendações de projeto, seleção e instalação de equipamentos elétricos para a bordo dos navios, introduz uma preocupação com harmônicos, mas sem muitos detalhes ou aprofundamento no tema. As recomendações desta norma são para que os barramentos dedicados a propulsão não ultrapassem 8% de distorção harmônica total de tensão e os barramentos não dedicados não ultrapassem 5%, além disso deixa como referência a IEEE 519-2014 para assuntos atinentes ao tema.

3.4.2 International Electrotechnical Commission(IEC)

O IEC é uma organização internacional de padronização de tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas. A IEC 61000, que trata de tema relativo a esta dissertação, é estruturada em 6 partes, subdivididas em diversas áreas. As subdivisões que tratam sobre harmônicos se encontram nas seções IEC 61000-2-2, IEC 61000-3-3 e IEC 61000-3-4.

A IEC 61000-2-2 *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems* trata de distúrbios na faixa de frequência de 0 a 9 kHz. A Tabela 6 e 7 apresentam os limites estabelecidos pela IEC 61000-2-2.

O THD de tensão para os níveis de compatibilidade da Tabela 6 é de 11%.

A norma IEC 61000-3-2 *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*, define os limites de harmônicos de corrente para equipamentos com corrente nominal menor que 16 A

por fase. Os limites propostos na IEC 61000-3-2 dizem respeito a equipamentos elétricos e eletrônicos conectados a sistemas de distribuição públicos de baixa tensão.

Tabela 6-Limites de distorção de tensão individual para baixa tensão
Adaptado [23]

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3		Harmônicas ímpares múltiplas de 3		Harmônicas pares	
Ordem h	IHC (%)	Ordem h	IHC (%)	Ordem h	IHC (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \times (17/h) - 0,27$	$21 < h \leq 45$	0,2	$10 < h \leq 50$	$0,25 \times (10/h) + 0,25$

A norma *IEC 61000-3-4 Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A*, trata dos equipamentos elétricos e eletrônicos conectados a sistemas de distribuição em baixa tensão com as seguintes características:

- tensão nominal até 240 V, monofásico, dois ou três condutores;
- tensão nominal de até 600 V, trifásico, três ou quatro fios;
- frequência nominal de 50 ou 60 Hz.

Tabela7-Limites de harmônico de corrente em relação a fundamental
Adaptado [23]

Ordem	Corrente harmônica I_H/I_1 (%)	Ordem	Corrente harmônica I_H/I_1 (%)
3	21,6	21	$\leq 0,6$
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	$\leq 0,6$
11	3,1	29	0,7
13	2	31	0,7
15	0,7	>33	$\leq 0,6$
17	1,2		
19	1,1	Pares	$\leq 8/h$ ou $\leq 0,6$

I_h representa a respectiva corrente harmônico e I_1 é o valor da componente fundamental da corrente.

A IEC 60092-501:2013 *Electrical installations in ships - Part 501: Special features - Electric propulsion plant*, especifica requisitos para plantas de propulsão elétrica, como projetos, instalação e teste dos equipamentos elétricos do sistema de propulsão. No que diz respeito a harmônicos, afirma que o nível de distorção harmônica total de tensão não deve exceder 10%, se isso acontecer, a operação da propulsão elétrica deverá estar desconectada de quaisquer outros elementos elétricos do sistema. Em casos de a rede da propulsão estar conectada a rede do navio o THD de tensão não deverá ser superior a 5%, de acordo com IEC 600092-101 *Electrical installations in ships - Part 101: Definitions and general requirements*.

3.4.3 Sociedade Classificadora de Navios

As sociedades classificadoras de navios atuam fornecendo certificações para projetos de embarcações, sendo necessário cumprir determinadas recomendações de projeto para garantir que o projeto atenda às exigências necessárias para sua respectiva classificação. Com relação aos sistemas elétricos das embarcações não é diferente, logo, há níveis estabelecidos de harmônicos permitidos para o projeto. A Tabela 8 apresenta os requisitos necessários para harmônicos de tensão de acordo com a ABS, DNV, RINAMIL E BV.

Tabela 8-Limites de harmônicos de tensão das sociedades classificadoras

Sociedade Classificadora	THD (%)	IHC (%)
ABS	8	5
DNV	8	5
RINAMIL	10	5
BUREAU VERITAS	10	5

Quando se trata de navios dotados de propulsão elétrica, algumas sociedades classificadoras permitem níveis acima dos mencionados na Tabela 8, no entanto, não há nenhuma recomendação quanto aos níveis admitidos, tornando difícil a realização de qualquer análise mais profunda com relação ao tema. Apesar do aumento significativo em pesquisas e discussões sobre QEE em navios com propulsão elétrica, o tema ainda é relativamente novo, o que dificulta uma formulação mais direta a respeito do tema. Os valores definidos e a forma como o tema é tratado pelas sociedades classificadores ainda é um pouco secundário, e deve se buscar uma maior discussão a respeito deste fenômeno eletromagnético.

Capítulo 4 - Modelagem Computacional

As simulações realizadas para avaliar os índices de QEE da rede elétrica do navio foram realizadas no domínio do tempo, com a utilização do ATPDraw como interface gráfica para a entrada dos modelos dos equipamentos. A solução consiste na resolução de equações diferenciais que representam o comportamento dinâmico da rede elétrica. As informações relativas aos harmônicos no domínio do tempo envolvem a solução para o regime permanente e, em seguida, a aplicação da Transformada Rápida de Fourier [50]. Este procedimento pode exigir integração durante períodos consideráveis, portanto é sugerido apenas para casos em que a resposta periódica possa ser obtida em alguns ciclos de operação [51].

Com o objetivo de validar o estudo, a planta elétrica do navio será, inicialmente, simulada considerando apenas a frequência fundamental dos equipamentos elétricos presente na planta convencional, a fim de determinar se os valores simulados estão de acordo com os valores nominais dos equipamentos presentes na embarcação. As cargas de baixa tensão não serão detalhadas nesta dissertação por questões de sigilo, pois trata-se de uma embarcação militar, além disso, as cargas não apresentam relevância destacada na análise harmônica, uma vez que os motores elétricos de propulsão possuem uma potência bem elevada em relação as cargas presentes na embarcação.

O segundo passo será inserir as cargas não-lineares e os modelos de acionamento do motor elétrico de indução do sistema de propulsão do navio, buscando avaliar os índices de QEE e determinar a viabilidade de utilização da propulsão elétrica, com base nas premissas adotadas. Além disso, serão comparados os resultados das três proposições de modelagem para representar o motor elétrico do sistema de propulsão a ser inserido no sistema elétrico. Quando da violação, ou valores muito próximos dos limites estabelecidos pelas normas e sociedades classificadoras, filtros serão implementados no sistema elétrico de forma que mitiguem os nocivos efeitos dos harmônicos.

De acordo com o IEEEStd 399 [52], o estudo de harmônicos requer conhecimento das correntes harmônicas geradas pelas cargas não lineares, sendo considerado três maneiras de determinar essas correntes:

- Medir os harmônicos gerados por cada fonte;

- Calcular os harmônicos gerados usando uma análise matemática sempre que possível, como conversores ou compensadores estáticos; ou
- Usar valores típicos de aplicações semelhantes ou apresentado em publicações.

Para a análise pretendida nessa dissertação o primeiro método não é possível, uma vez que se trata de um estudo para verificar viabilidade de implementação da propulsão elétrica.

O segundo será implementado a partir do acionamento realizado pelos dispositivos semicondutores de potência para partida e controle de velocidade dos motores e, por consequência das linhas de eixo, que é realizado por meio de retificadores multipulsos para o link CA/CC e IGBT para a conversão CC/CA, conforme apresentado na Figura 14. Para a análise aqui pretendida verificar os efeitos dos harmônicos na rede elétrica de bordo, a influência da não linearidade da carga se concentra basicamente na interação entre a rede elétrica CA e retificadores multipulsos, portanto, o *drive* de acionamento será representado, de maneira simplificada, por duas maneiras: retificadores multipulsos alimentando fonte de corrente constante e retificadores multipulsos alimentando resistência, ambos com o valor drenado pela carga na respectiva condição de operação, com o objetivo de comparar os efeitos das duas modelagens propostas, representadas de acordo com a Figura 15. Tal simplificação implicará em redução significativa na complexidade da simulação sem influência na análise dos resultados, uma vez que a dinâmica de condução e bloqueio dos diodos estará sendo devidamente considerada.

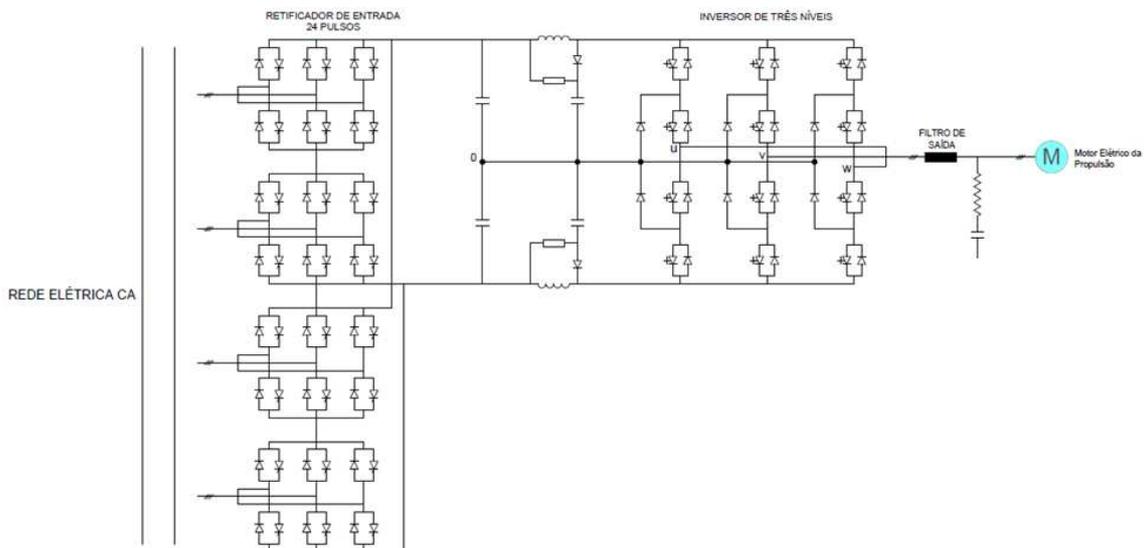


Figura 14- Acionamento do Motor Elétrico de Propulsão

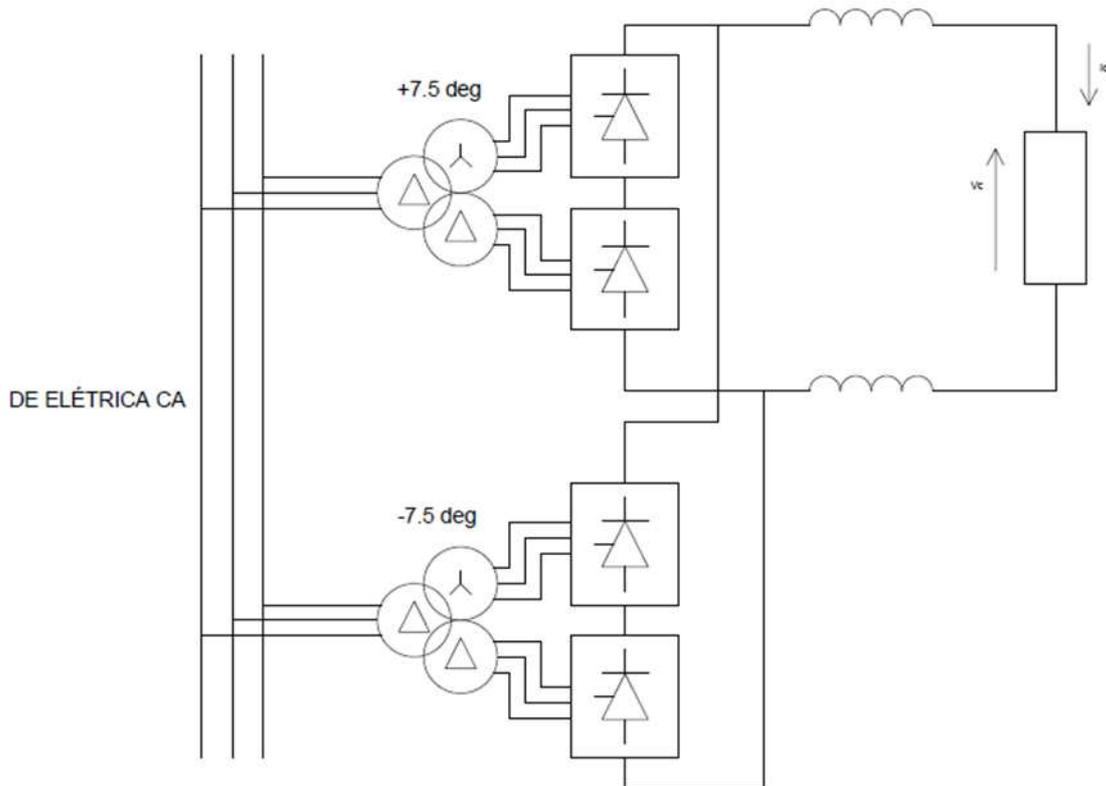


Figura 15-Acionamento do Motor Elétrico de Propulsão

E o terceiro, a partir da vasta literatura em relação ao tema, valores típicos de correntes harmônicas [2, 47 e 52] serão usados para representar as diferentes cargas não lineares que estão presentes na embarcação. As cargas não lineares foram modeladas pela injeção de corrente na respectiva frequência no ponto de conexão da carga, de acordo com a Figura 16, como descrito em Dungan et al [47].

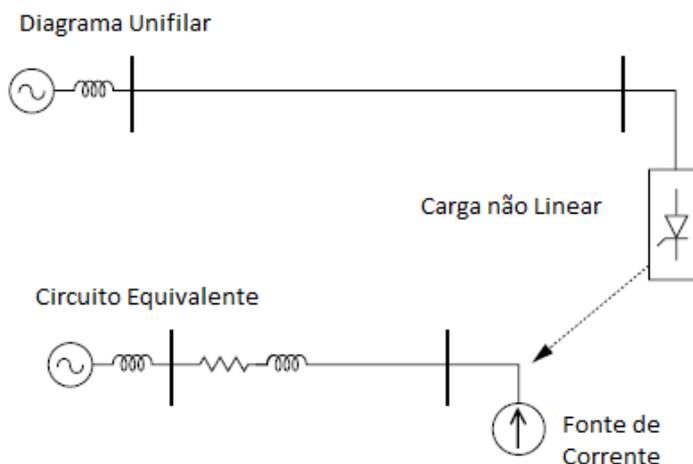


Figura16- Representação de uma carga não linear para análise harmônica

Fonte: Adaptado [47]

4.1 Modelo dos Componentes do Navio no ATPDraw

Os equipamentos que compõem a rede elétrica do navio foram modelados de acordo com os arquivos contidos na biblioteca do ATPDraw e descritos em Prikler e Høidalen [53].

4.1.1 Gerador

De acordo com as recomendações constantes na referência [52], para os geradores, um modelo de “fonte de tensão sub-transitória” foi usado em série com a respectiva “reatância sub-transitória”, como mostrado na Figura 17. Para a fonte, um modelo de “fonte de CA” foi configurado para fornecer tensão de 13,8 kV ao barramento de alta tensão e 440 V para o barramento de baixa tensão. Para representar a reatância sub-transitória, o modelo “RLC-3ph” foi usado.

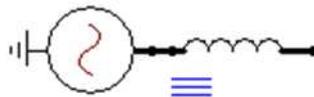


Figura 17-Modelo do gerador e sua respectiva reatância sub-transitória

4.1.2 Transformador

Os transformadores utilizados nas simulações, tanto abaixadores como defasadoras, foram o modelo “*Saturable 3 phase*”, Figura 18, com a modelagem sendo realizada a partir dos dados do ensaio de curto circuito e circuito aberto dos respectivos transformadores.

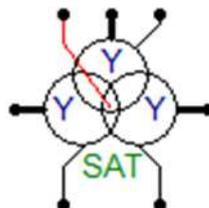


Figura 18- Modelo do transformador utilizado nas simulações

4.1.3 Cabos

Os cabos que conectam a geração e os barramentos às cargas foram modelados pela resistência e reatância equivalentes do modelo “RLC-3ph”, que pode ser visto na Figura 19. Os dados foram obtidos do catálogo da fabricante Prysmian [54]. Vale ressaltar que, neste exemplo, os valores da impedância do cabo são muito menores que os da impedância do transformador, devido às pequenas distâncias envolvidas, portanto não se faz necessário a utilização do modelo “pi” ou Bergeron de linha de transmissão.

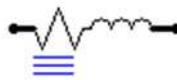


Figura 19- Modelo dos cabos utilizados nas simulações

4.1.4 Cargas Lineares e Não Lineares

Cargas lineares que não geram harmônicas foram introduzidas usando o modelo “RLC-3ph” como na Figura 19, assim como a componente fundamental das cargas não lineares, modeladas por sua resistência e reatância equivalentes. Os componentes harmônicos de ordem mais alta foram introduzidos através de vários modelos de “fonte AC”, que foram configurados para fornecer corrente em cada uma das frequências harmônicas geradas no retificador, como visto na Figura 20.

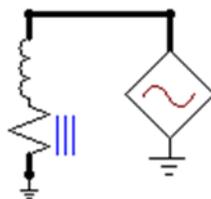


Figura 20- Modelo das cargas não lineares utilizadas nas simulações

4.1.5 Motores Elétricos de Propulsão

Os conversores de frequência, alimentando transformadores defasadores de 13,8 / 3,3 kV, responsáveis pela alimentação dos motores de propulsão com 11 MW em cada linha de

eixo, foram modelados para que sua influência nas tensões e correntes da rede elétrica fosse verificada. Para efeito de comparação, a modelagem do acionamento dos motores de propulsão será realizada de três maneiras distintas:

- Injeção de correntes harmônicas no ponto de conexão da carga, como mostrado na Figura 21, de acordo com os valores típicos encontrados em catálogos de fabricantes de *drives* [55 e 56] com as características do acionamento em questão;
- Modelagem de retificadores multipulsos, especificamente de 12 e 24 pulsos, de acordo com a Figura 22, com topologias utilizados nas principais aplicações navais [57], alimentando fontes de corrente que representam a carga alimentada pelos motores nas condições de operação desejadas;
- Modelagem de retificadores multipulsos, especificamente de 12 e 24 pulsos, de acordo com a Figura 23, com topologias utilizados nas principais aplicações navais [57], alimentando resistências que representam a carga alimentada pelos motores nas condições de operação desejadas.

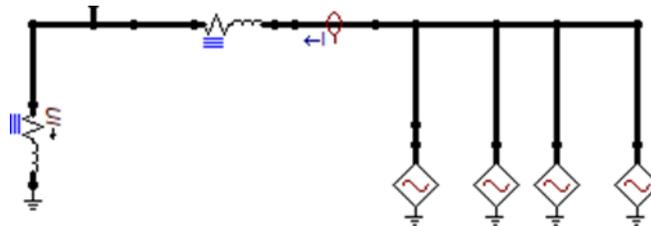


Figura 21- Modelo do motor na metodologia de injeção de correntes harmônicas

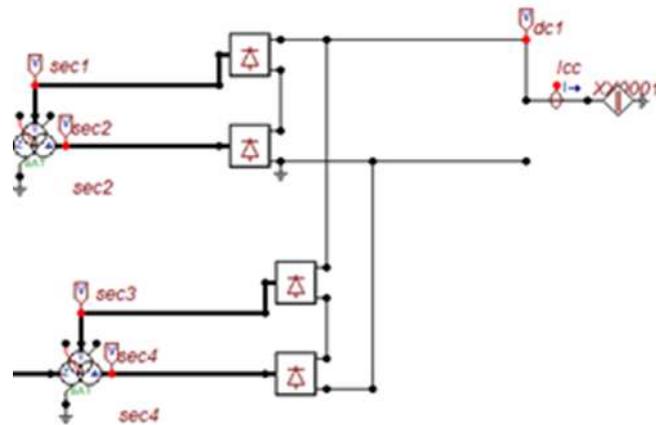


Figura 22- Modelo do motor com a modelagem de retificadores multipulsos alimentando fonte de corrente

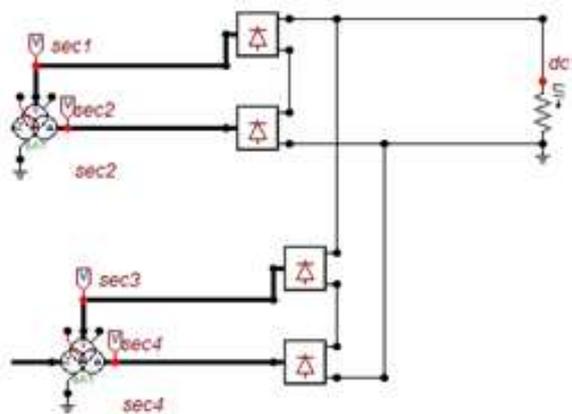


Figura 23- Modelo do motor com a modelagem de retificadores multipulsos alimentando resistência

4.2 Simulações de QEE

A primeira simulação realizada no ATPDraw (Configuração 1) representa um sistema elétrico tradicional aplicado em navios com sistema de propulsão convencional realizada por meio de motores de combustão, o que significa que as cargas não lineares são compostas apenas por pequenos grupos de retificadores responsáveis por alimentar um conjunto específico de equipamentos da embarcação. A Figura 24 ilustra a configuração da usina elétrica do navio dotado de propulsão convencional. Ressalta-se que para aplicação com

propulsão convencional a rede elétrica do navio é toda em baixa tensão (440V e 115V). O objetivo desta simulação é verificar a validade do modelo a partir de comparação da simulação com os valores nominais das cargas.

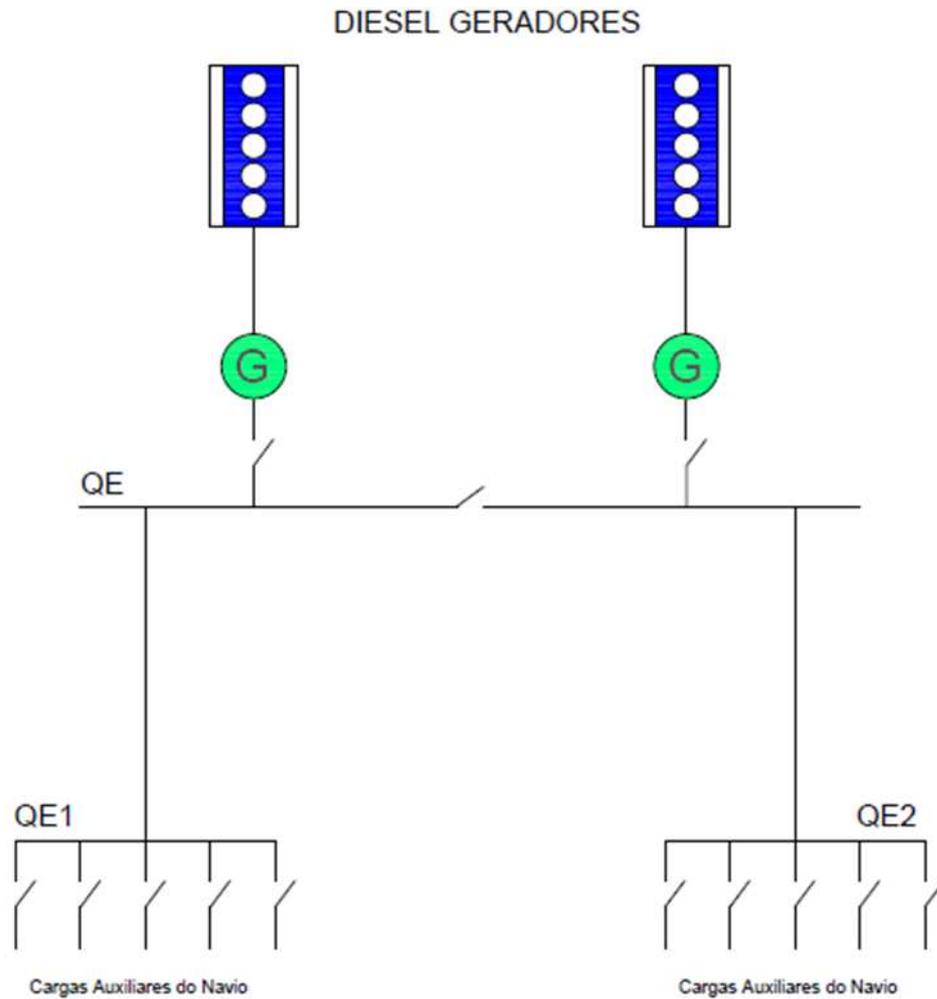


Figura 24-Configuração 1: planta elétrica com propulsão convencional

Com o objetivo de estudar o comportamento da rede elétrica do navio em relação a QEE, o sistema de propulsão elétrica, composto por dois motores elétricos de indução, foi inserido na simulação. Cada motor fornece energia à sua respectiva linha de eixo, como mostrado na Figura 25. Além da configuração 1, com propulsão convencional, foram analisadas outras 6 configurações com propulsão elétrica, com os três modelos de acionamento dos motores propostos, para 12 e 24 pulsos.

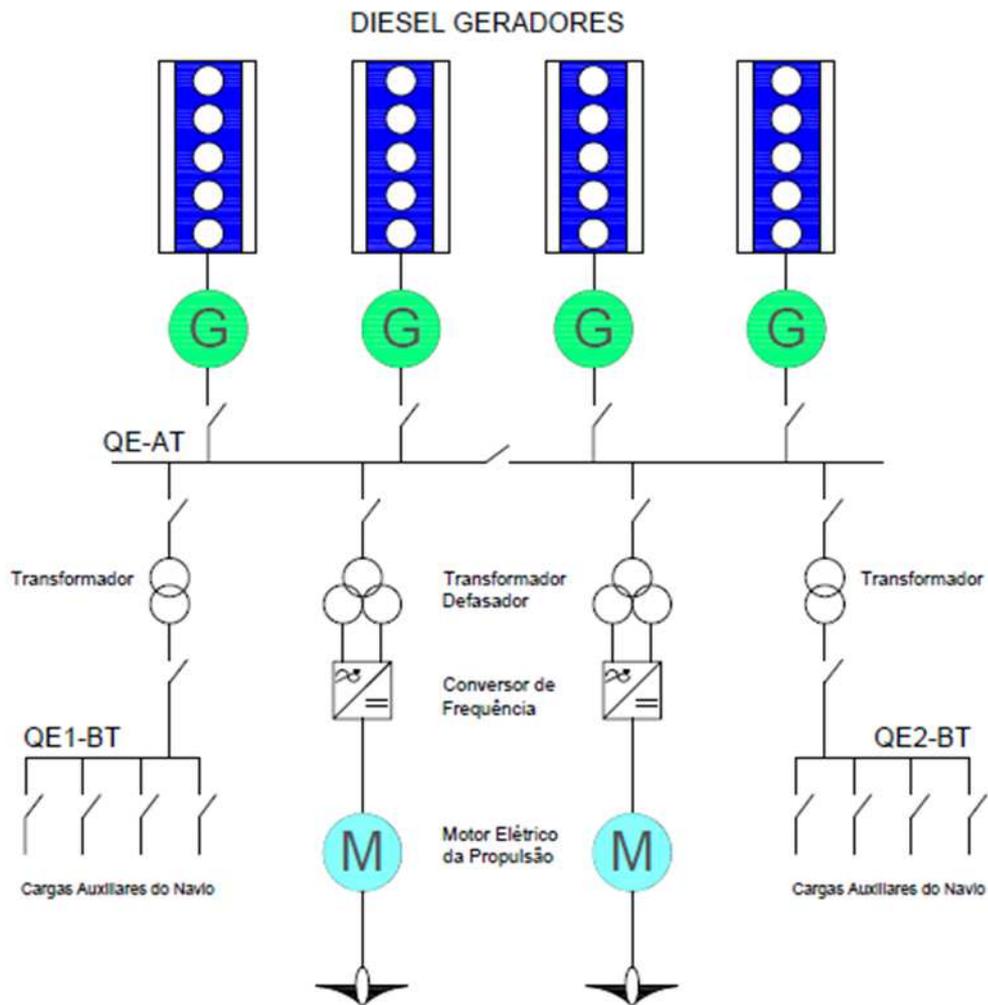


Figura 25- Sistema elétrico do navio com propulsão elétrica

Além dos três modelos que representam os motores elétricos de propulsão, as simulações foram realizadas para dois pontos de operação distintos do navio: estando o navio a plena carga, ou seja, em sua velocidade máxima e operando com três geradores em paralelo e com o navio operando na velocidade de cruzeiro com apenas um gerador para suprir toda a demanda do navio nesta condição, como mostrado respectivamente Figuras 26 e 27. Devido aos altos valores de potência envolvidos no sistema de propulsão, a geração elétrica do navio será realizada em média tensão (13,8 kV), que é tratada como alta tensão para aplicações navais. A Tabela 9 apresenta um resumo das simulações de QEE realizadas.

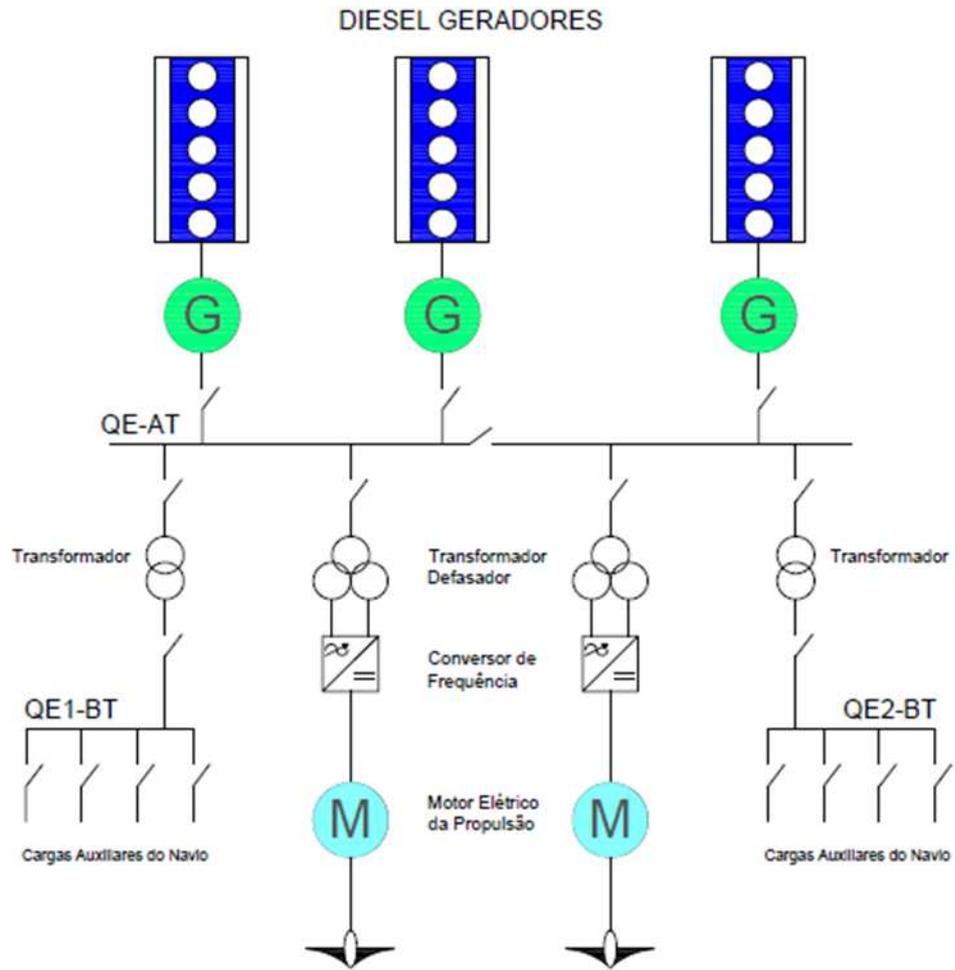


Figura 26- Configuração da planta com propulsão elétrica operando na velocidade máxima

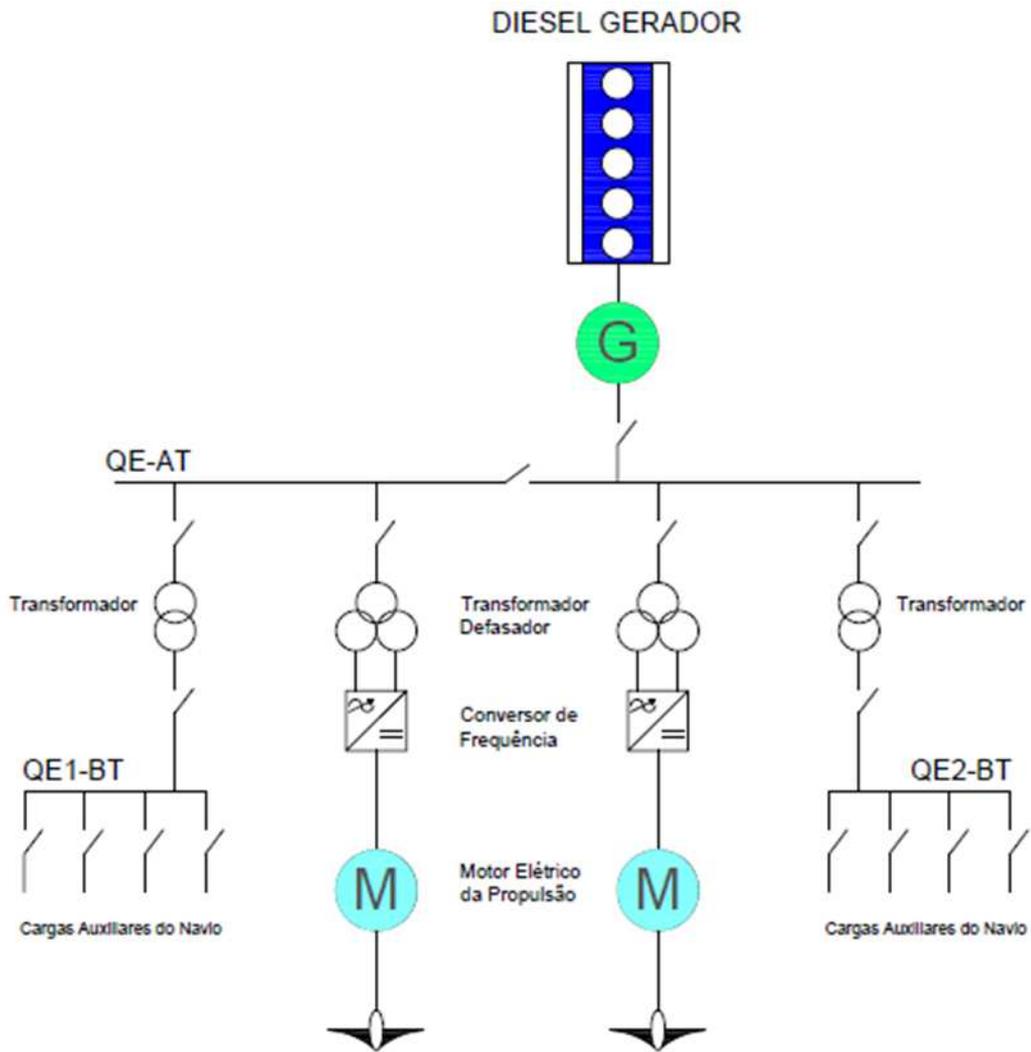


Figura 27- Configuração da planta com propulsão elétrica operando na velocidade de cruzeiro

Tabela 9-Configurações utilizadas nas simulações

		Sistemas de Propulsão	Geradores em funcionamento	Tensão (V)		Topologia do Acionamento
				Alta	Baixa	
Configuração 1		Convencional	2	-	440	-
Configuração 2	Velocidade Máxima	Elétrico	3	13800	440	12 Pulsos por injeção de corrente
	Velocidade de Cruzeiro		1			
Configuração 3	Velocidade Máxima	Elétrico	3	13800	440	12 Pulsos com o retificador alimentando fonte de corrente
	Velocidade de Cruzeiro		1			
Configuração 4	Velocidade Máxima	Elétrico	3	13800	440	12 Pulsos com o retificador alimentando resistor
	Velocidade de Cruzeiro		1			
Configuração 5	Velocidade Máxima	Elétrico	3	13800	440	24 Pulsos por injeção de corrente
	Velocidade de Cruzeiro		1			
Configuração 6	Velocidade Máxima	Elétrico	3	13800	440	24 Pulsos com o retificador alimentando fonte de corrente
	Velocidade de Cruzeiro		1			
Configuração 7	Velocidade Máxima	Elétrico	3	13800	440	24 Pulsos com o retificador alimentando resistor
	Velocidade de Cruzeiro		1			

Capítulo 5 - Resultados

Com o objetivo de verificar e analisar os resultados das simulações, as tensões foram observadas nos principais pontos do sistema para as configurações e pontos de operação analisados. Com exceção da configuração 1, foram realizadas simulações para dois pontos distintos de operação, velocidade máxima e de cruzeiro, e os resultados serão apresentados para ambos os casos.

5.1 Configuração 1

As Figuras 28 e 29 apresentam, respectivamente, as formas de onda da tensão e o espectro de frequência para o Quadro Elétrico 1 (QE1) na configuração 1, assim como as Figuras 30 e 31 para o Quadro Elétrico 2 (QE2). As formas de onda da tensão, como mostrado nas Figuras 28 e 30, não são afetadas de forma significativa pelas cargas não lineares presentes na embarcação. Isto é comprovado pela representação dos espectros de frequências para cada quadro elétrico obtido a partir da aplicação da transformada de Fourier da onda de tensão, com baixos valores de harmônicos em relação à componente fundamental. Para o QE1 o THD de corrente é de 0,6 % e o de tensão 1,07%. Para o QE2, tem-se 0,2 % para a corrente e 0,62 % para a tensão.

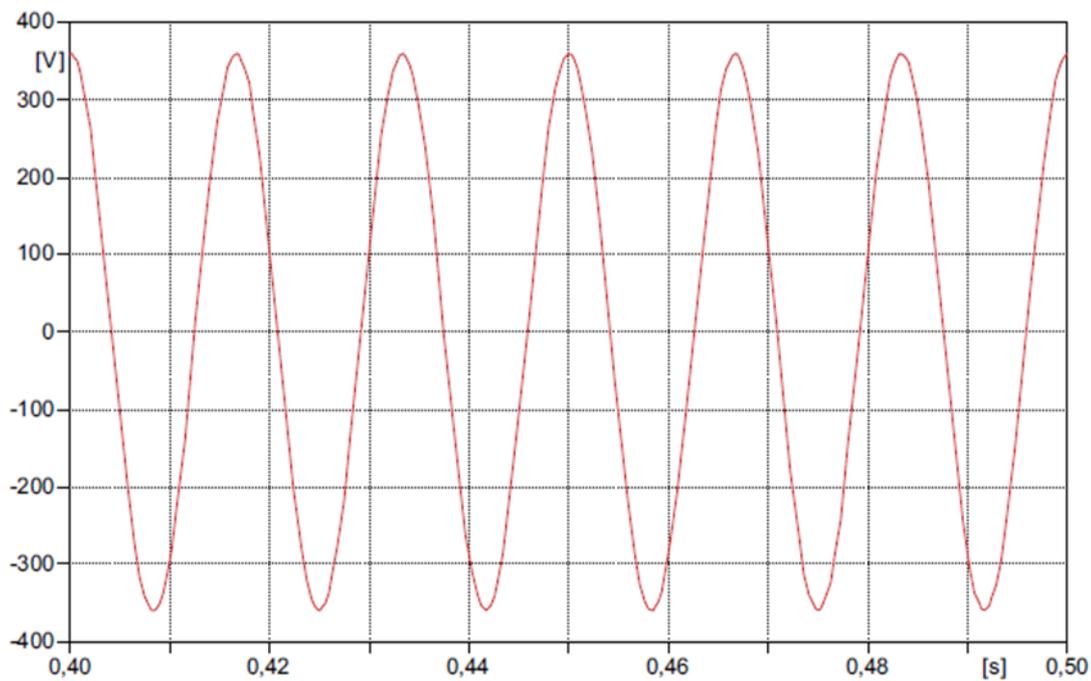


Figura 28-Forma de onda da tensão no QE1

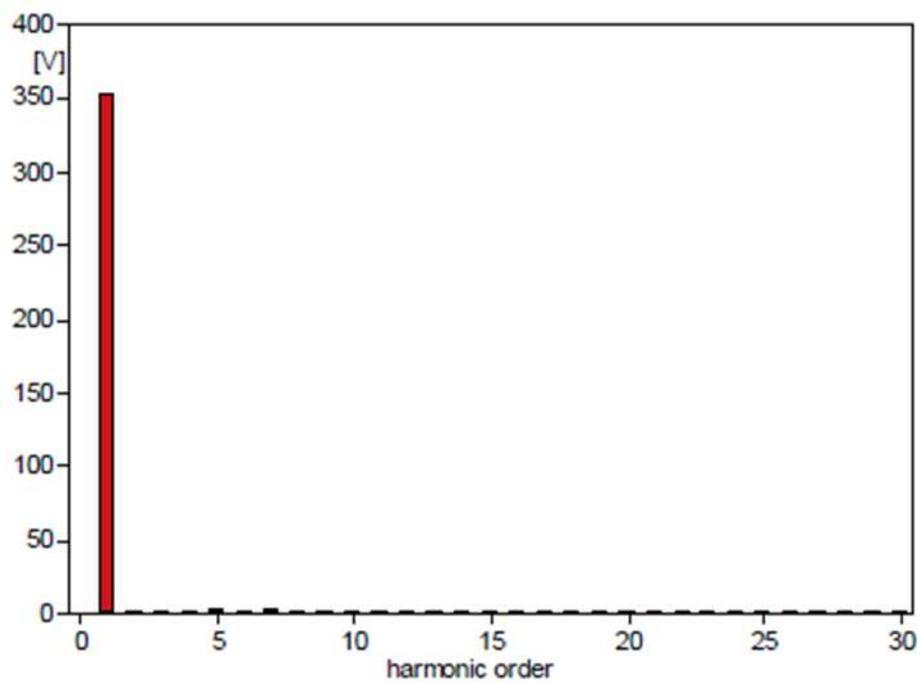


Figura 29- Espectro harmônico da tensão no QE1

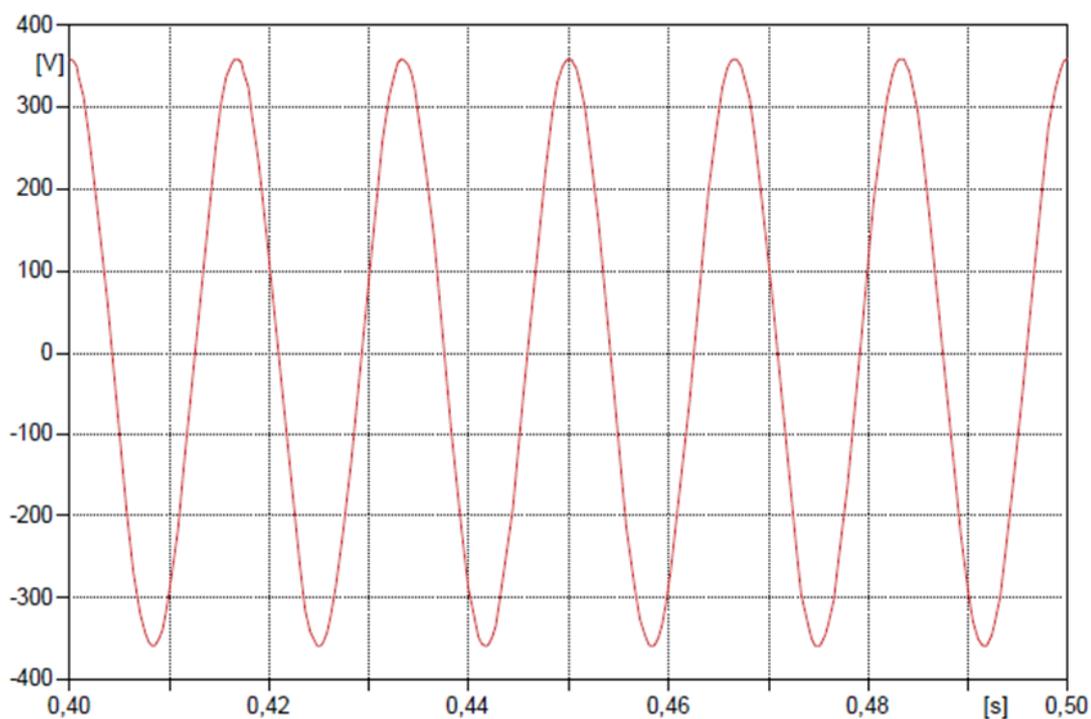


Figura 30- Espectro harmônico da tensão no QE1

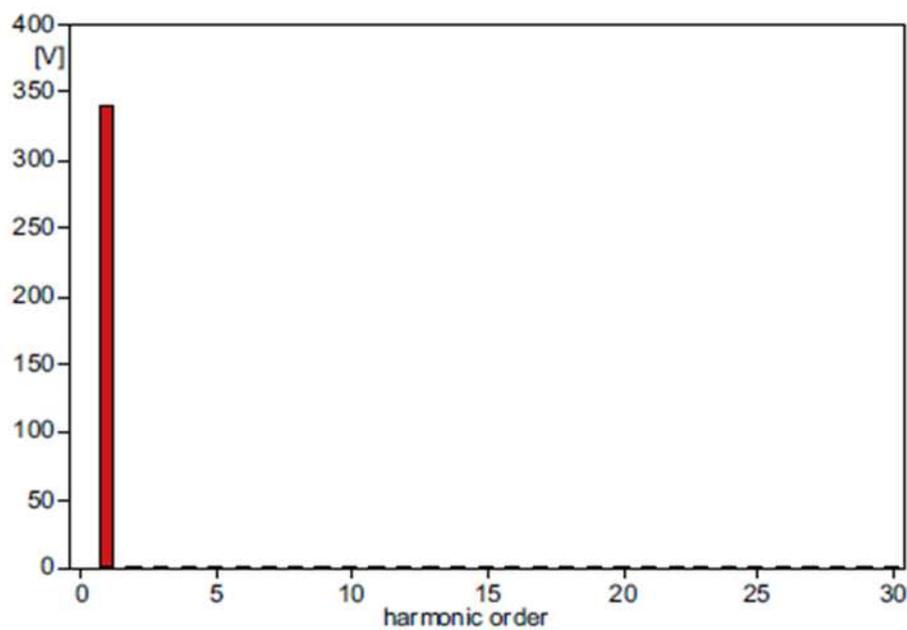


Figura 31- Espectro harmônico da tensão no QE1

O QE1 apresenta um nível mais alto de distorção harmônica, já que a maioria das cargas não-lineares está conectada no referido quadro, ainda assim, não há um efeito significativo na tensão presente naquele barramento.

5.2 Configuração 2

5.2.1 Operação com Velocidade Máxima

As Figuras 32 e 33 apresentam, respectivamente, as formas de onda da corrente e tensão no Quadro Elétrico de Alta Tensão (QE-AT) para a configuração 2 na velocidade máxima. Apesar de um valor relativamente baixo de 2,53% de THD de corrente, o que fica evidenciado com a forma de onda pouca distorcida na Figura 32, o valor da THD de tensão no QE-AT é de 8,01%, muito próximo aos limites estabelecidos pelas classificadoras e ultrapassando as principais normas internacionais de QEE. A Figura 34 apresenta a comparação entre os valores percentuais dos principais componentes harmônicos de tensão e corrente presentes no sistema elétrico. Os valores apresentados evidenciam que, para o sistema elétrico sob estudo, distorções ainda que leves na forma de onda da corrente levam a altos valores de distorção da tensão, fato que pode sensibilizar sobremaneira o sistema.

O comportamento da tensão no QE-AT é propagado para todos os pontos a jusante conectados ao sistema elétrico, fazendo com que a tensão no Quadro Elétrico de Baixa Tensão 1 (QE-1-BT) e Quadro Elétrico de Baixa Tensão 2 (QE-2-BT) sejam distorcidas, como apresentado nas Figuras 35 e 36, o que pode ocasionar um mau funcionamento das cargas conectadas a estes quadros. Além dos componentes harmônicos presentes no acionamento da propulsão, os efeitos das cargas não lineares presentes no sistema também contribuem para a distorção da tensão no QE-1-BT e QE-2-BT, especialmente aquelas conectadas ao QE-1-BT.

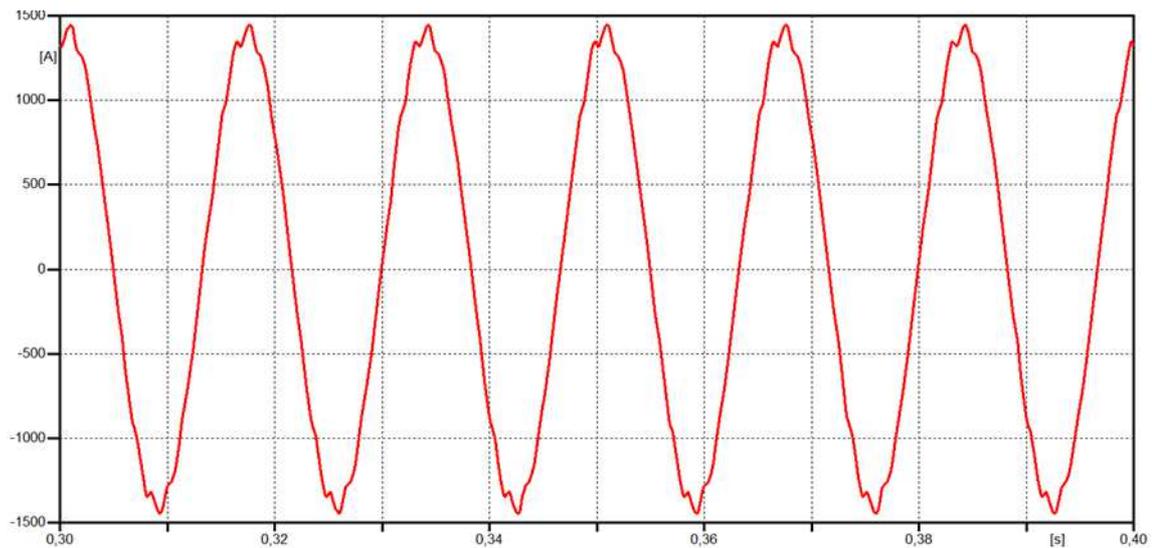


Figura 32- Forma de onda da corrente no QE-AT

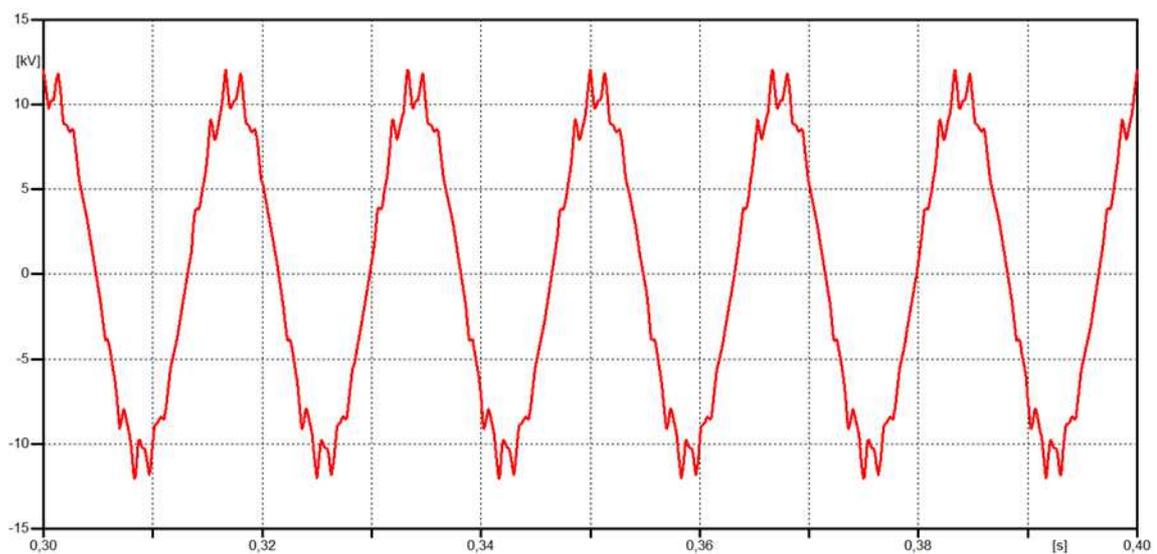


Figura 33- Forma de onda da tensão no QE-AT

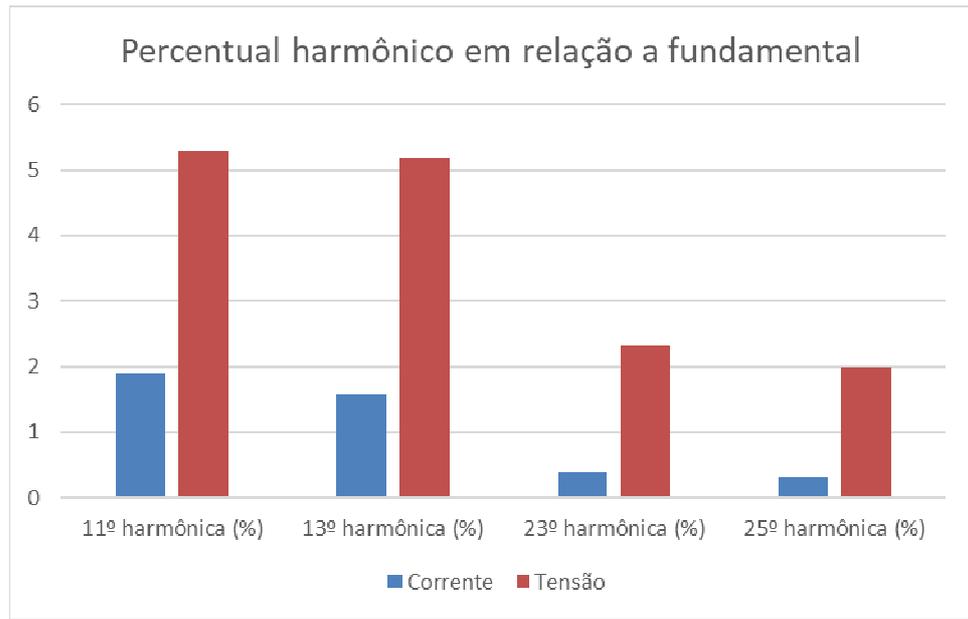


Figura 34- Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT

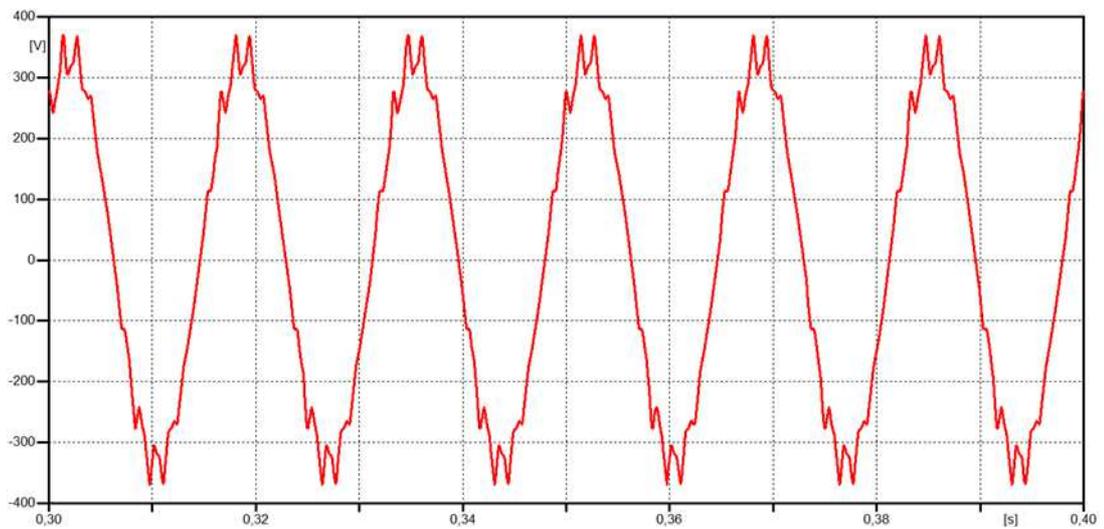


Figura 35- Forma de onda da tensão no QE-1-BT

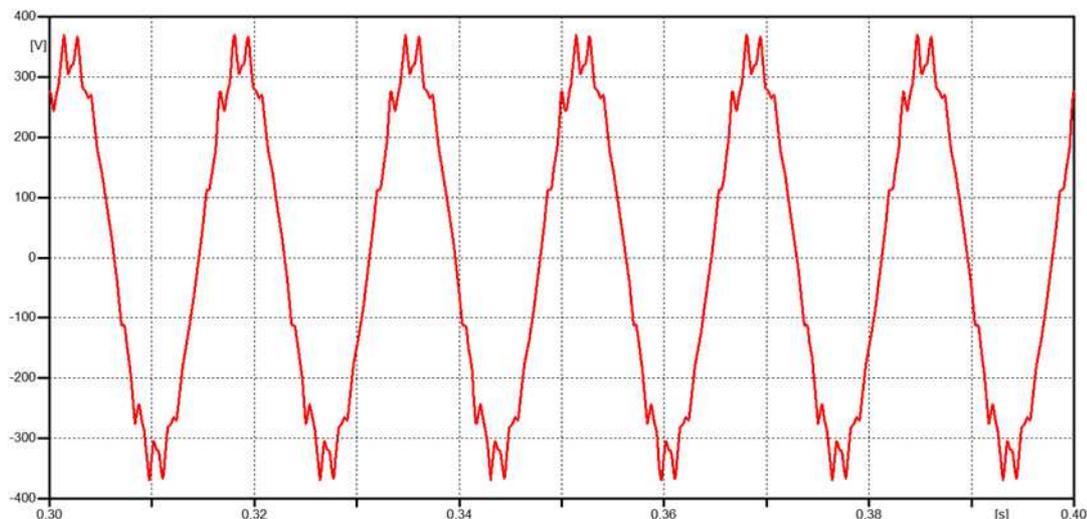


Figura 36-Forma de onda da tensão no QE-2-BT

5.2.2 Operação com Velocidade de Cruzeiro

Devido à característica da curva velocidade x potência do navio, há uma grande diferença entre a potência disponibilizada no eixo para velocidade máxima e para a de cruzeiro, enquanto para atingir a velocidade máxima são necessários 11 MW, para a velocidade de cruzeiro esse valor cai para aproximadamente 1 MW. Devido aos valores demandados de energia elétrica na velocidade de cruzeiro, é necessário apenas um gerador na linha, o que ocasiona uma diminuição significativa na potência de curto circuito da embarcação, sendo assim, o sistema elétrico se torna ainda mais vulnerável ao efeito das correntes harmônicas dos drives. Apesar da diminuição significativa dos valores dos componentes harmônicos, o sistema ainda sofre com valores consideráveis de THD de tensão de acordo com a Figuras 37, chegando a 7,13% em virtude da fragilidade do sistema elétrico do navio.

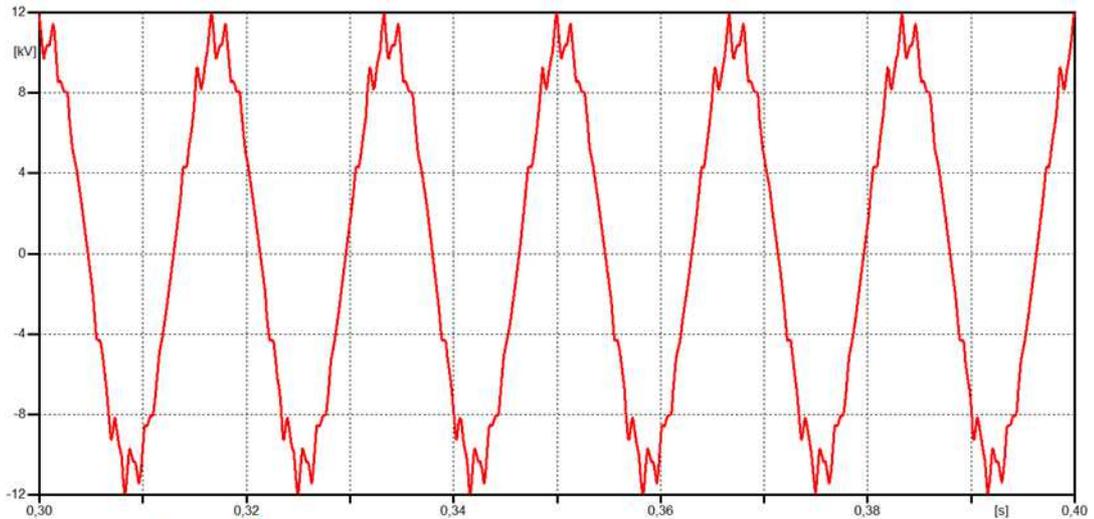


Figura 37-Forma de onda da tensão no QE-AT

5.3 Configuração 3

Na configuração 3, em que a conversão CA/CC, fundamental para verificar os efeitos de QEE na rede, foi realizada com o retificador de 12 pulsos alimentando fonte de corrente constante representando a carga na condição de velocidade requerida pelo navio, foram observados os valores mais severos de THD nos pontos de interesse no sistema.

5.3.1 Operação com Velocidade Máxima

As Figuras 38 e 39 apresentam a corrente e tensão no QE-AT respectivamente. Assim como na configuração 2, fica evidente a sensibilidade do sistema em relação aos índices de THD e, neste caso, os valores de THD de tensão chegam a 13,73% como uma distorção na corrente de 4,04% o que certamente irá culminar em funcionamento inadequado do sistema. A Figura 40 mostra os valores percentuais individuais dos harmônicos de tensão e corrente no sistema.

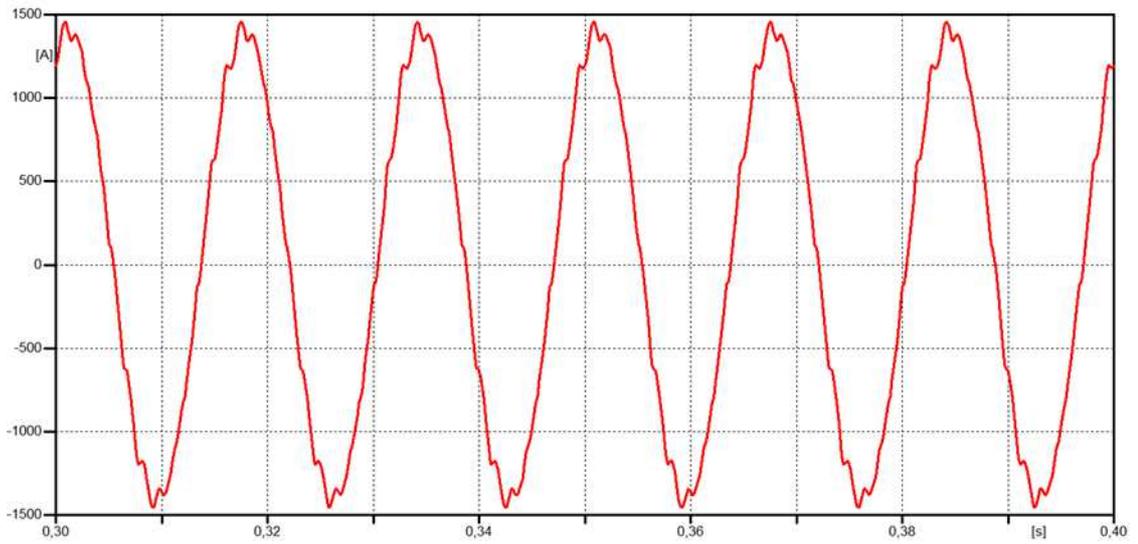


Figura 38-Forma de onda decorrente no QE-AT

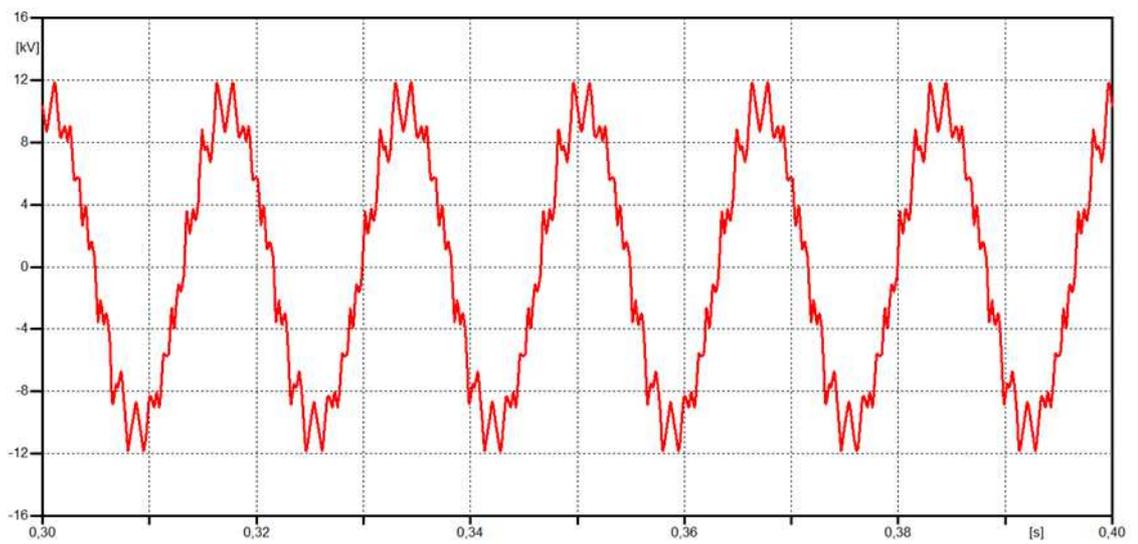


Figura 39-Forma de onda datensão no QE-AT

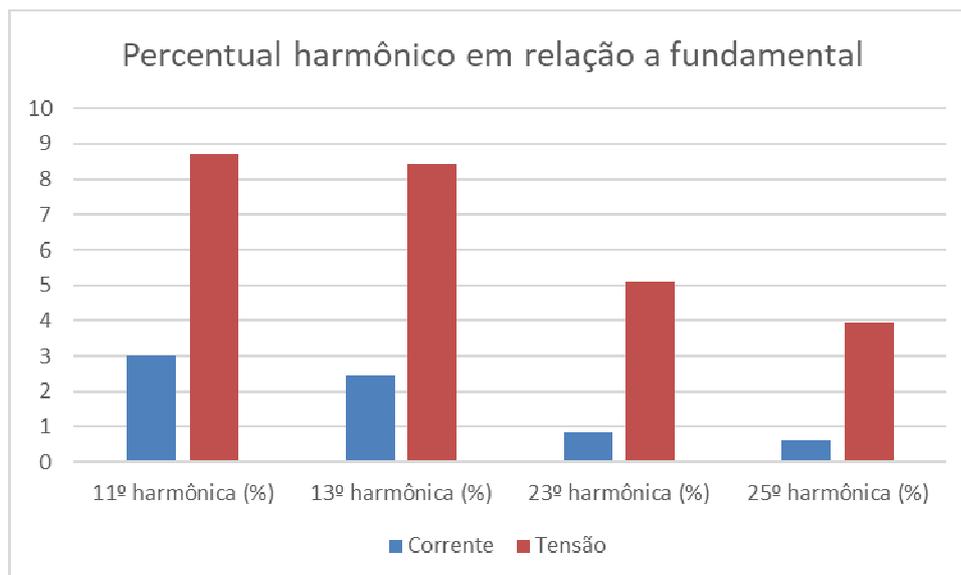


Figura 40-Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT

Os harmônicos são propagados para todos os pontos do sistema, inclusive na parte de baixa tensão, como ilustram as Figuras 41 e 42, o que pode comprometer o desempenho dos equipamentos conectados a estes barramentos, podendo comprometer a finalidade da operação do navio.

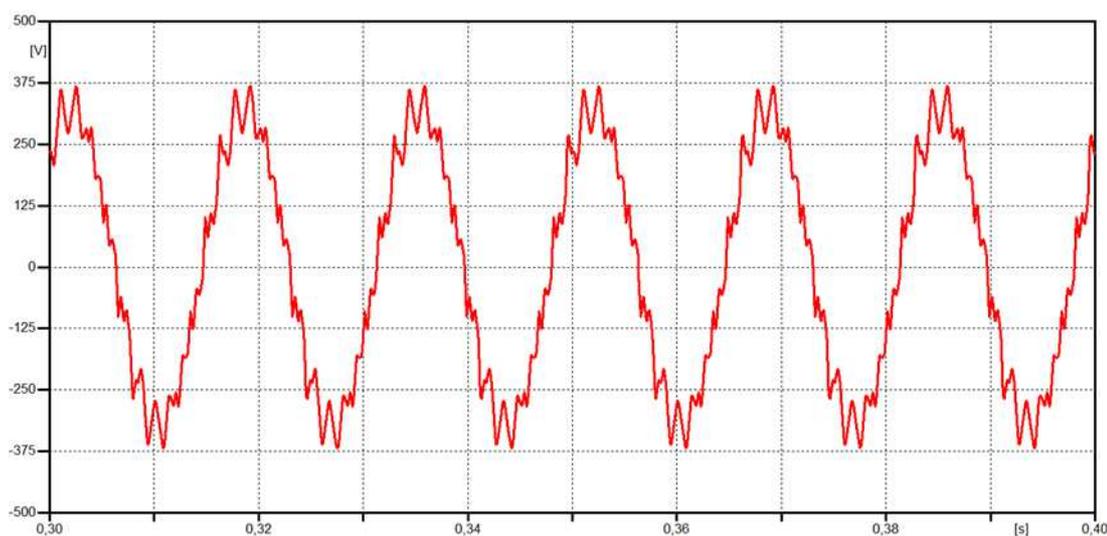


Figura 41- Forma de onda da tensão no QE-1-BT

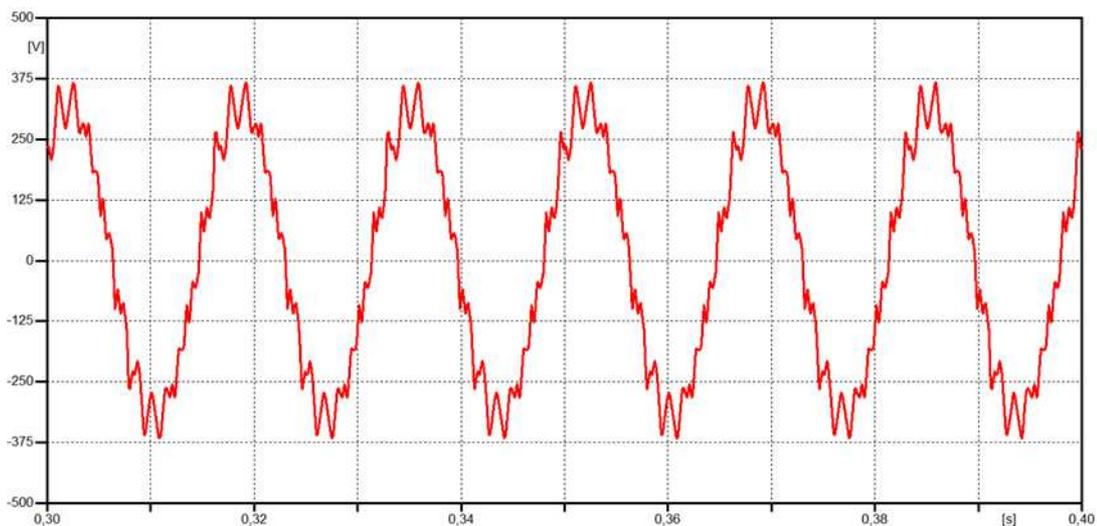


Figura 42-Forma de onda da tensão no QE-2-BT

5.3.2 Operação com Velocidade de Cruzeiro

Na velocidade de cruzeiro, apesar da redução significativa na potência de acionamento dos motores da propulsão, o sistema apresenta ainda altos valores de THD, especialmente de tensão, devido a fragilidade do sistema operando com apenas um gerador conectado ao QE-AT. O THD de tensão para este caso é de 11,86%. A Figura 43 apresenta a forma de onda da tensão no QE-AT.

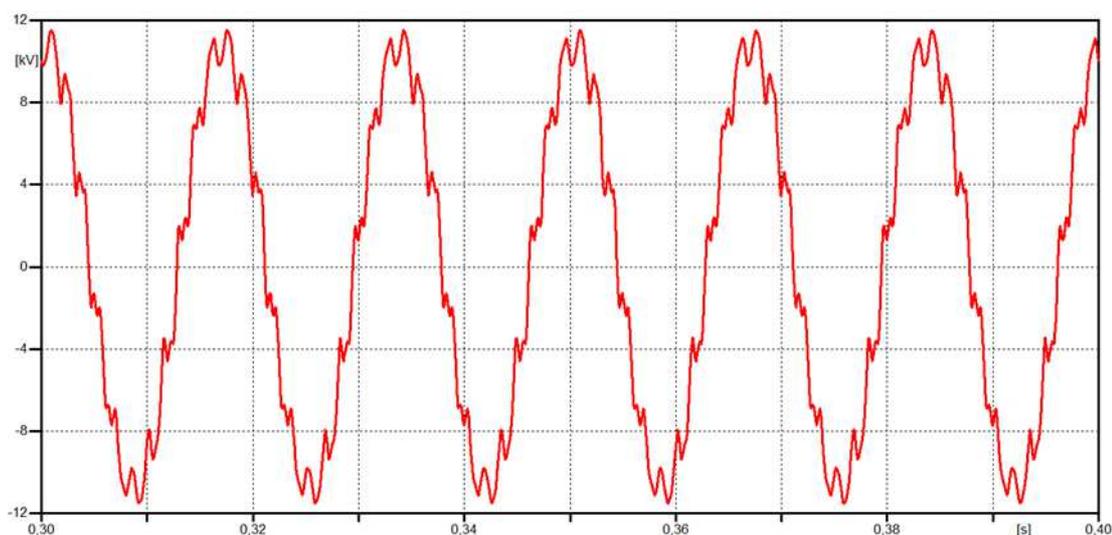


Figura 43-Forma de onda da tensão no QE-AT

5.4 Configuração 4

Na configuração 4 a conversão CA/CC foi realizada com o retificador de 12 pulsos alimentando resistência representando a carga na condição de velocidade requerida pelo navio, foram observados valores intermediários de THD nos pontos de interesse no sistema para as configurações com 12 pulsos.

5.4.1 Operação com Velocidade Máxima

Análogo as configurações anteriores, as Figuras 44, 45 e 46 apresentam as formas de onda de corrente, tensão e harmônicos percentuais individuais de tensão e corrente. Semelhante aos casos anteriores, os valores de THD de tensão ultrapassaram os limites estabelecidos normas internacionais de QEE foram próximos aos limites encontrados nas classificadoras. O THD de tensão foi de 9,71% e o de corrente ficou em 2,66%.

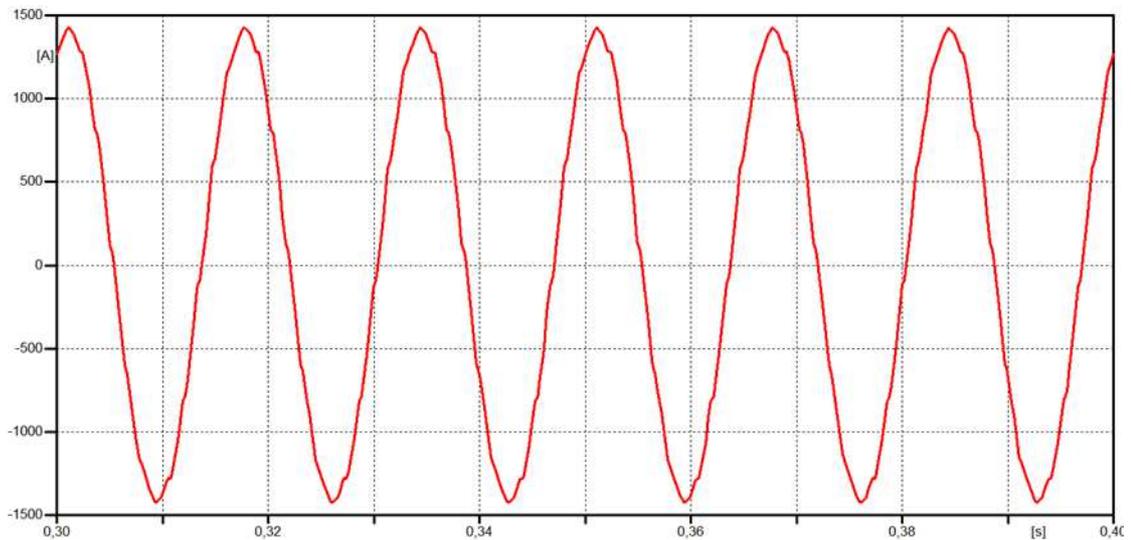


Figura 44- Forma de onda da corrente no QE-AT

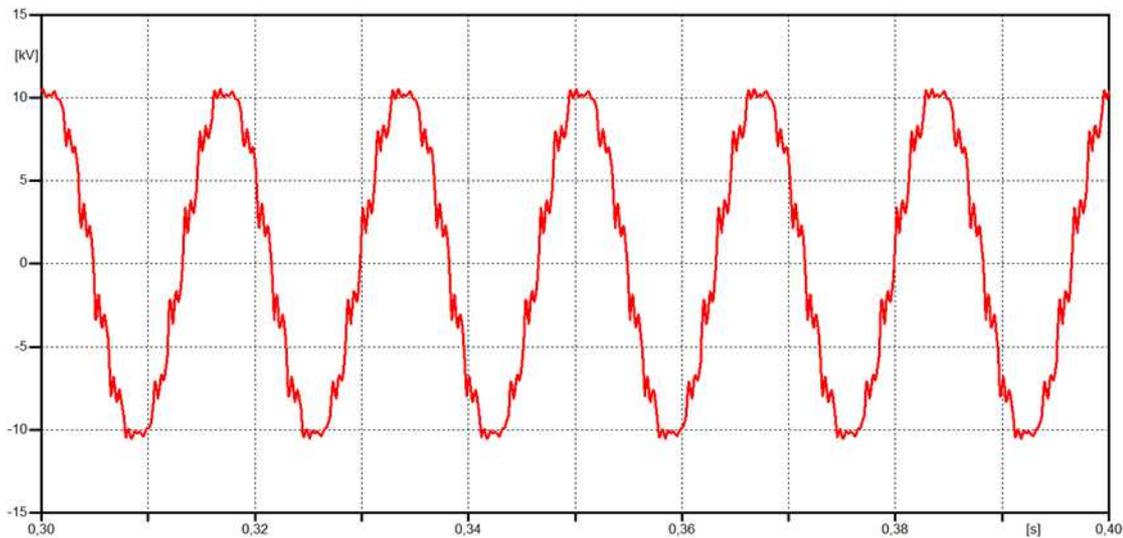


Figura 45- Forma de onda da tensão no QE-AT

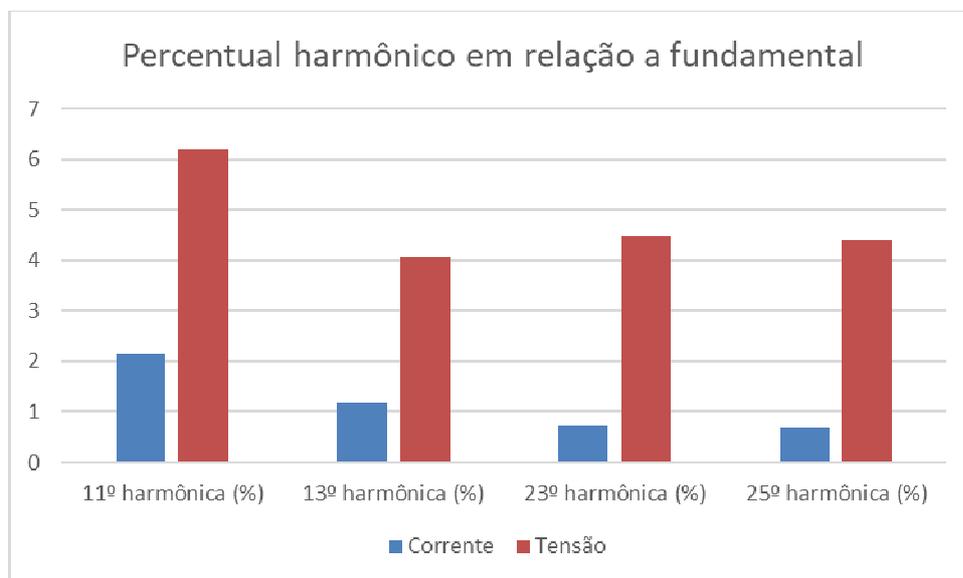


Figura 46- Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT

As formas de onda da tensão nos quadros elétricos de baixa tensão QE-1-BT e QE-2-BT, respectivamente Figuras 47 e 48, também ficaram sensivelmente distorcidas.

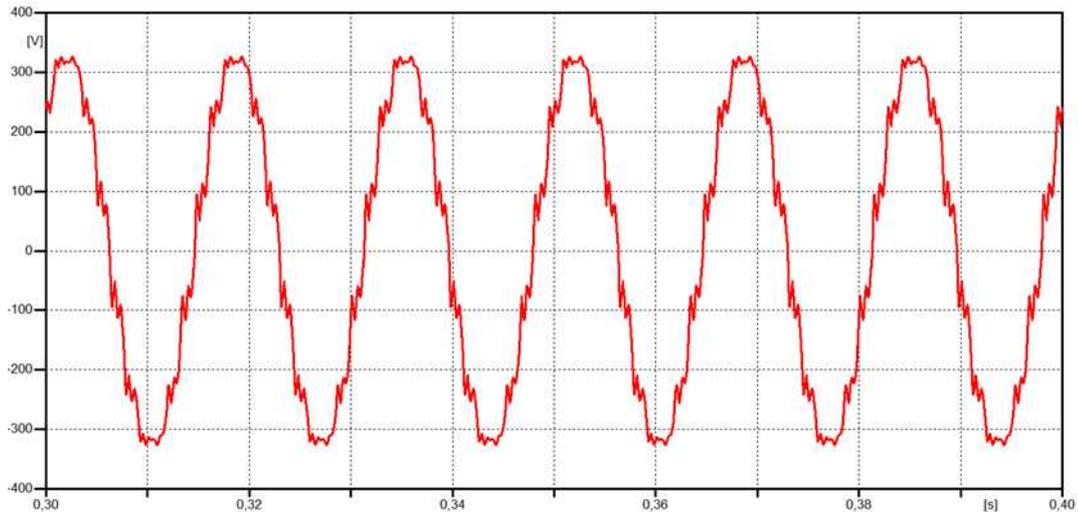


Figura 47- Forma de onda da tensão no QE-1-BT

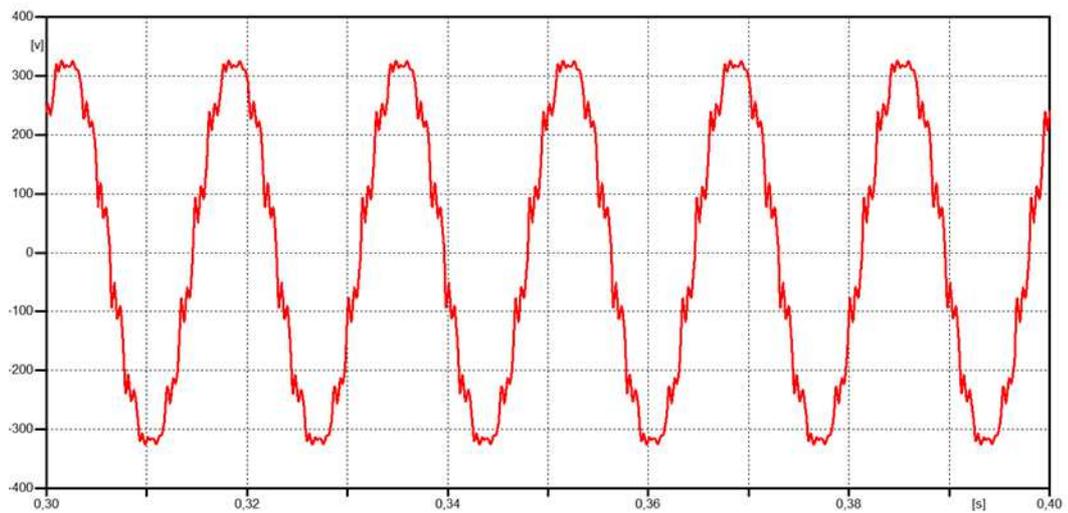


Figura 48- Forma de onda da tensão no QE-2-BT

5.4.2 Operação com Velocidade de Cruzeiro

Na simulação com operação em cruzeiro os valores encontrados de THD nos principais pontos do sistema também foram consideravelmente altos. A Figura 49 apresenta a forma de onda da tensão no QE-AT.

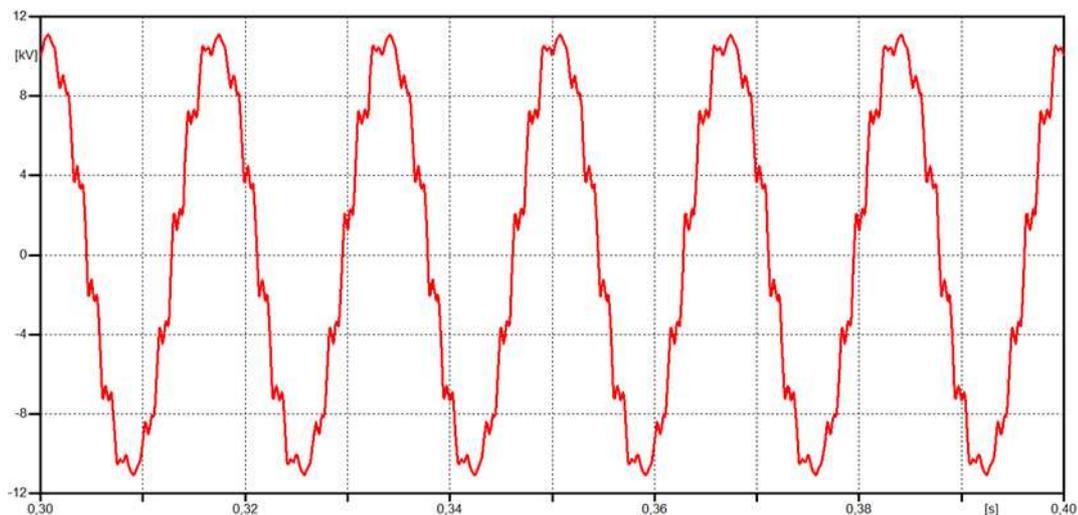


Figura 49-Forma de onda da tensão no QE-AT

As configurações 2, 3 e 4 tratam de diferentes metodologias para simular os efeitos de um retificador de 12 pulsos na rede elétrica de bordo, e os resultados apresentados acima, ilustram que os resultados podem variar sensivelmente de uma metodologia para outra. A Figuras 50 e 51 traz um comparativo dos percentuais individuais de THD de corrente e tensão respectivamente, das 3 metodologias implementadas para simular os efeitos do retificador.

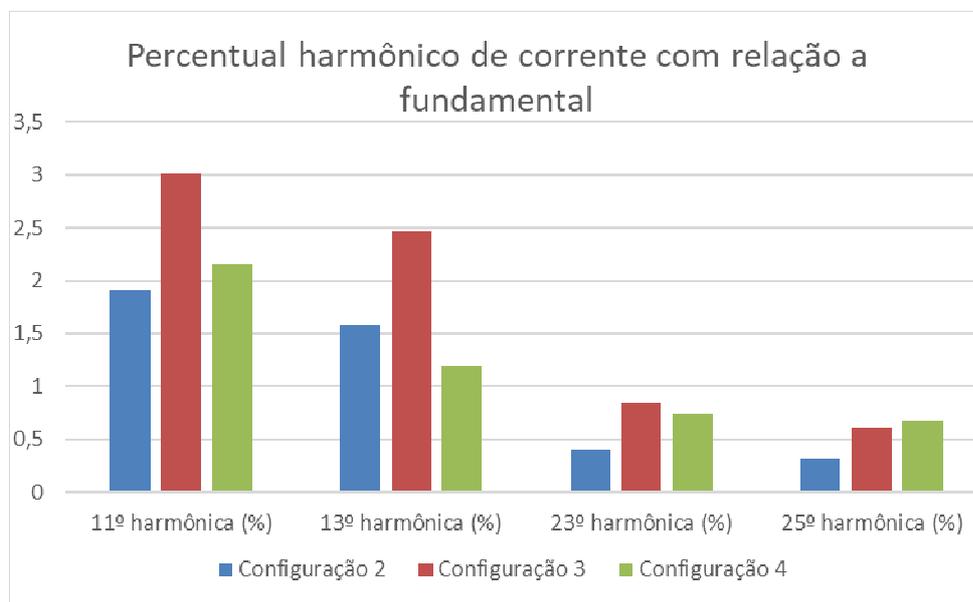


Figura 50-Comparativo dos principais harmônicos de corrente para as três configurações dos retificadores de 12 pulsos

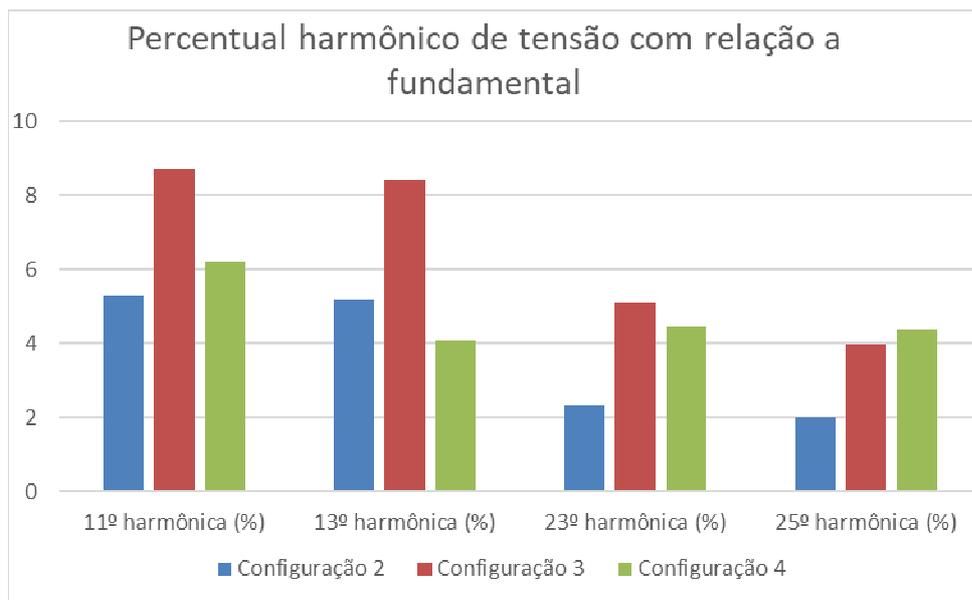


Figura 51-Comparativo dos principais harmônicos de tensão para as três configurações dos retificadores de 12 pulsos

A simulação mais severa verificada foi com a utilização da configuração 3, retificador alimentando fonte de corrente. Já os valores mais brandos foram verificados utilizando a configuração 2, injeção de correntes harmônicas no ponto de conexão do motor elétrico. Os valores ilustram a necessidade de inserir um modelo que represente com maior riqueza de detalhes o equipamento a ser simulado, uma vez que a injeção de corrente representa a forma mais simplista da simulação e não apresenta a dinâmica envolvida no processo de condução e bloqueio dos diodos para realizar a conversão CA/CC, ainda que os valores harmônicos injetados estejam em acordo com os fornecidos pelo respectivo equipamento.

5.5 Configuração 5

Semelhante ao caso mostrado na configuração 2, são mostrados nos principais pontos da rede elétrica os efeitos da inserção da propulsão elétrica, nesta configuração, com injeção de corrente no ponto de conexão com valores correspondentes a um retificador de 24 pulsos.

5.5.1 Operação com Velocidade Máxima

As Figuras 52 e 53 apresentam as formas de onda da corrente e tensão, respectivamente, no QE-AT. Apesar de muito menores quando comparadas com a configuração 2 de 12 pulsos, a distorção está presente nas formas de onda, sendo o THD de tensão de 4,75% e de corrente de 0,79%. Semelhante aos casos já mostrados, baixos valores de THD de corrente acarretam em valores significativos de tensão, como verificado na Figura 54.

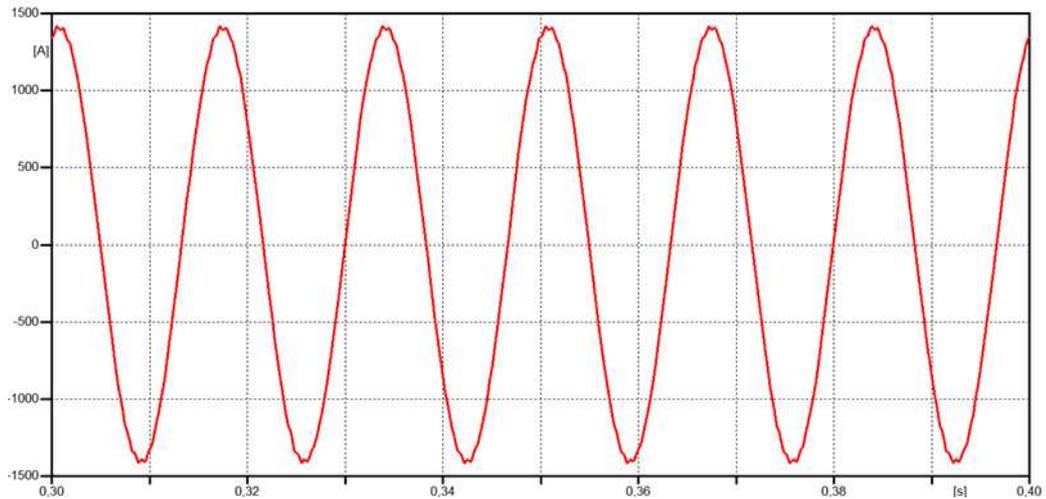


Figura 52-Forma de onda da corrente no QE-AT

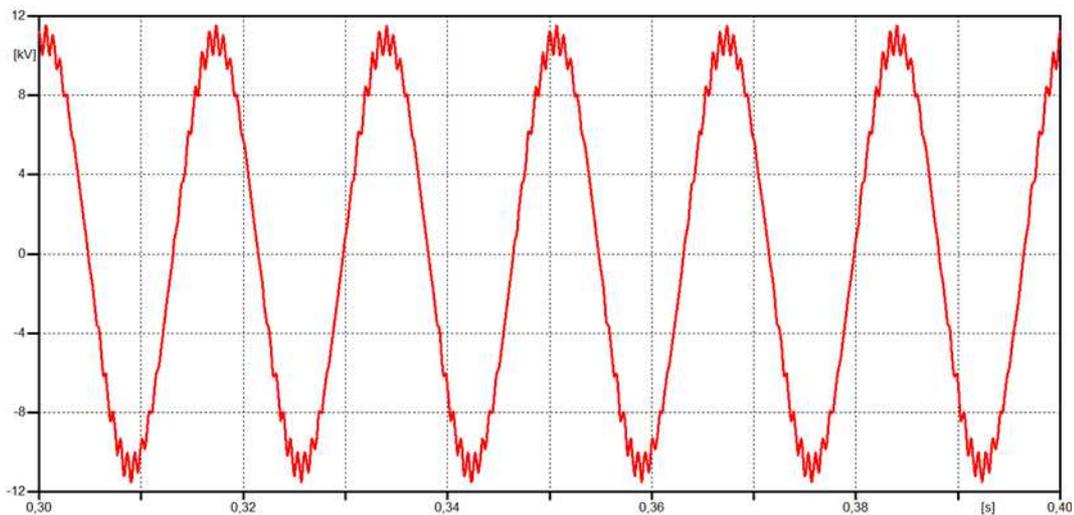


Figura 53-Forma de onda da tensão no QE-AT

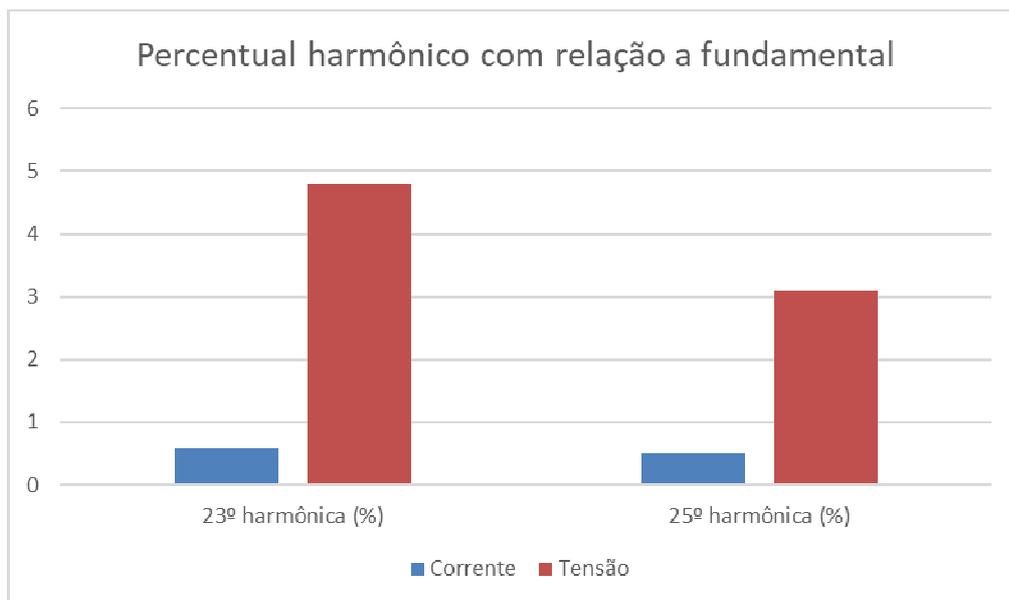


Figura 54- Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT

As distorções também são propagadas para os pontos em que estão conectados os equipamentos mais sensíveis, que ocorre na baixa tensão, como mostram as Figuras 55 e 56.

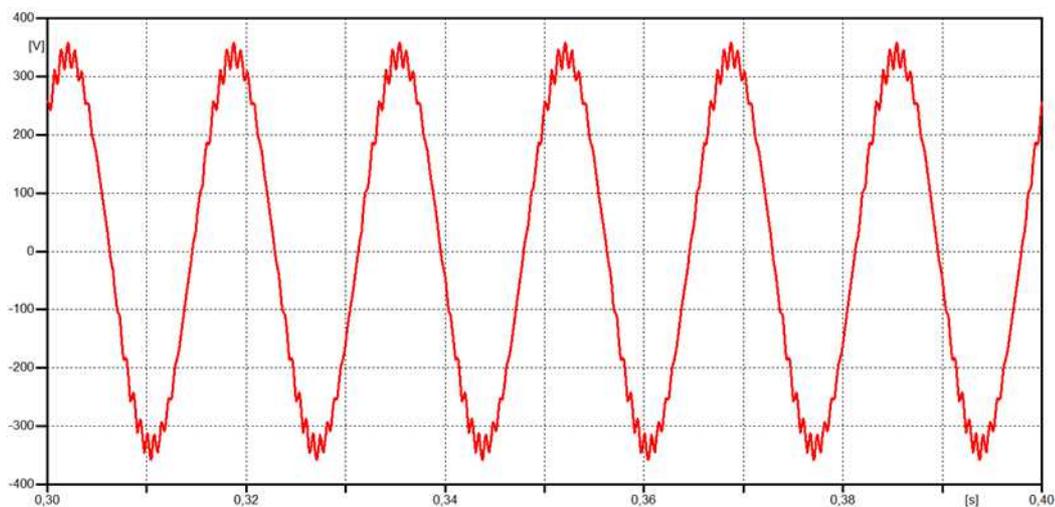


Figura 55- Forma de onda da corrente no QE-1-BT

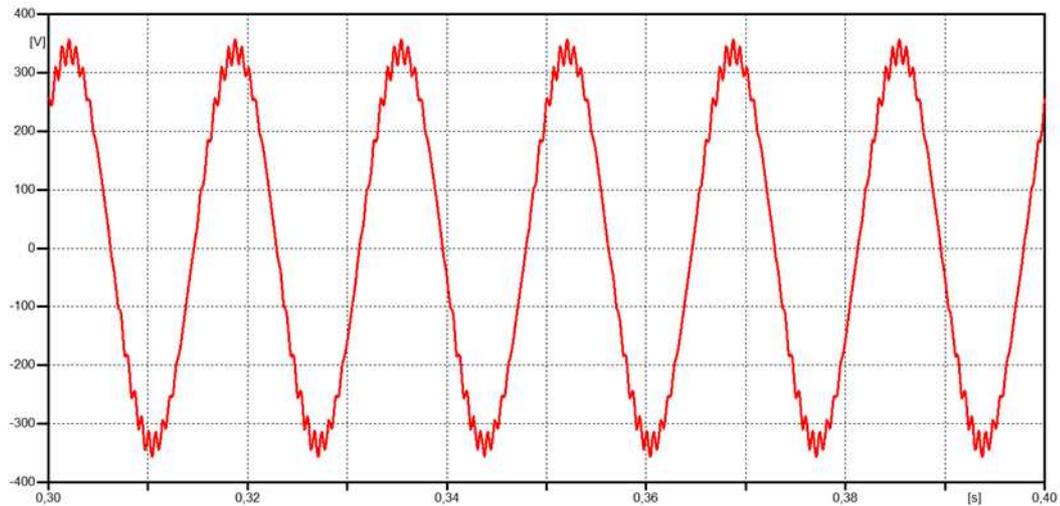


Figura 56- Forma de onda da corrente no QE-2-BT

Apesar de apresentar valores de distorção harmônica, na configuração 5 os valores não ultrapassam os limites estabelecidos pelas classificadoras e nas normas, ainda assim, deverá ser dada atenção aos índices, uma vez que podem comprometer os equipamentos mais sensíveis.

5.5.2 Operação com Velocidade de Cruzeiro

A Figura 57 apresenta a forma de onda da tensão no QE-AT. Para o caso da velocidade de cruzeiro os índices de THD caem a níveis aceitáveis para a tensão no barramento, sendo de 2,21%, uma vez que o THD de corrente ficou em 0,52%.

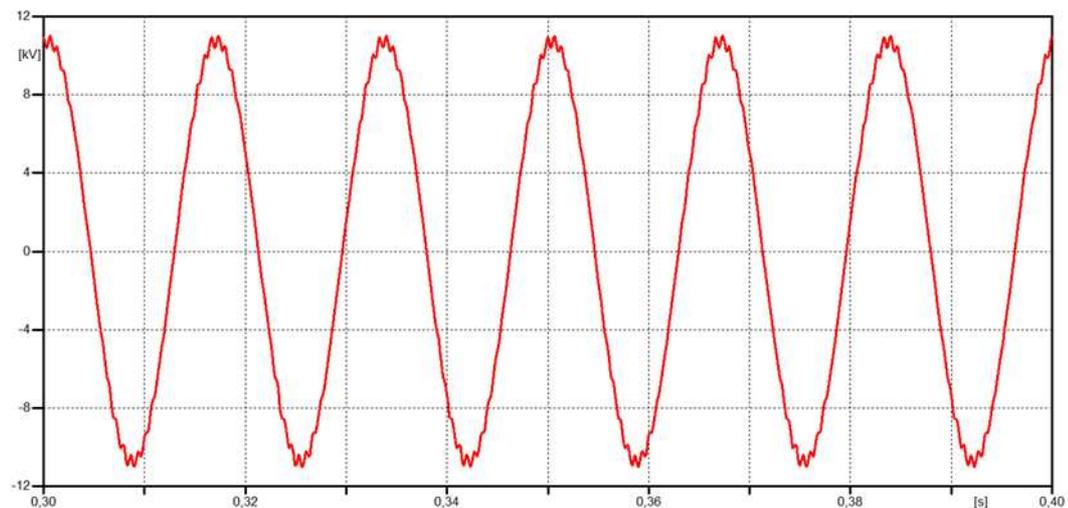


Figura 57- Forma de onda da tensão no QE-AT

5.6 Configuração 6

Análogo ao caso da configuração 3 a conversão CA/CC, fundamental para verificar os efeitos de QEE na rede, foi realizada com o retificador de 24 pulsos alimentando fonte de corrente constante representando a carga na condição de velocidade requerida pelo navio.

5.6.1 Operação com Velocidade Máxima

Assim como nos casos para 12 pulsos, na condição de velocidade máxima, os maiores valores para os casos de 24 pulsos foram verificados para o caso em que os retificadores alimentam fonte de corrente representando a carga, com THD de tensão de 5,72% e de corrente de 0,93%. As Figuras 58 e 59 apresentam as formas de onda de tensão e corrente respectivamente. A Figura 60 apresenta os valores individuais percentuais de corrente e tensão.

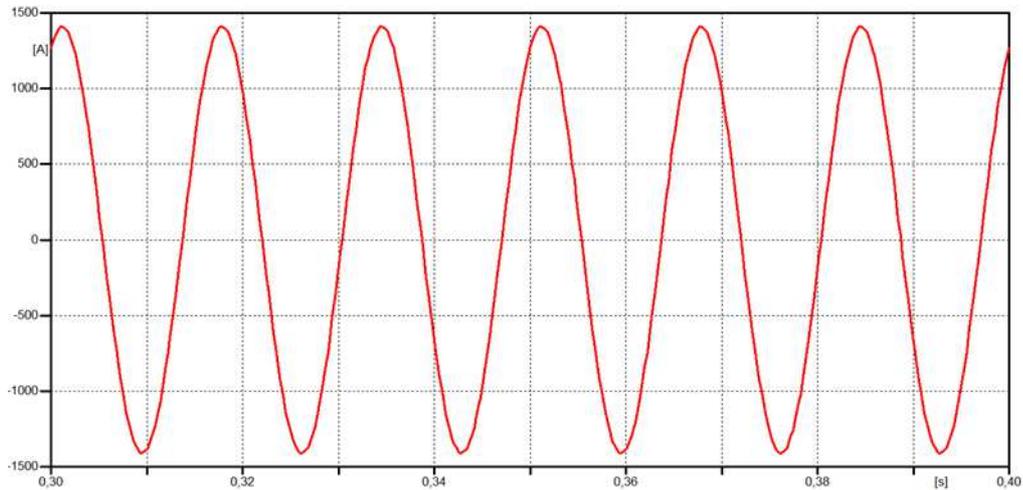


Figura 58-Forma de onda da corrente no QE-AT

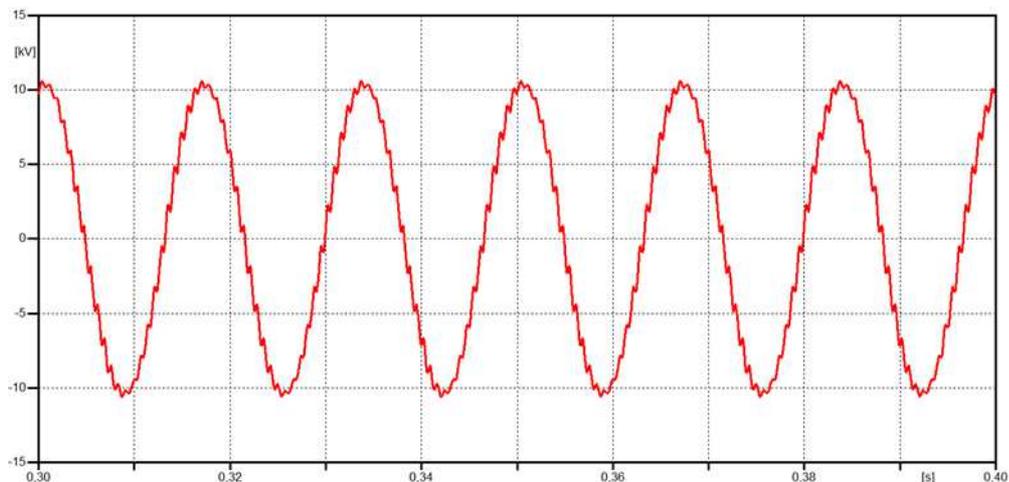


Figura 59- Forma de onda da tensão no QE-AT

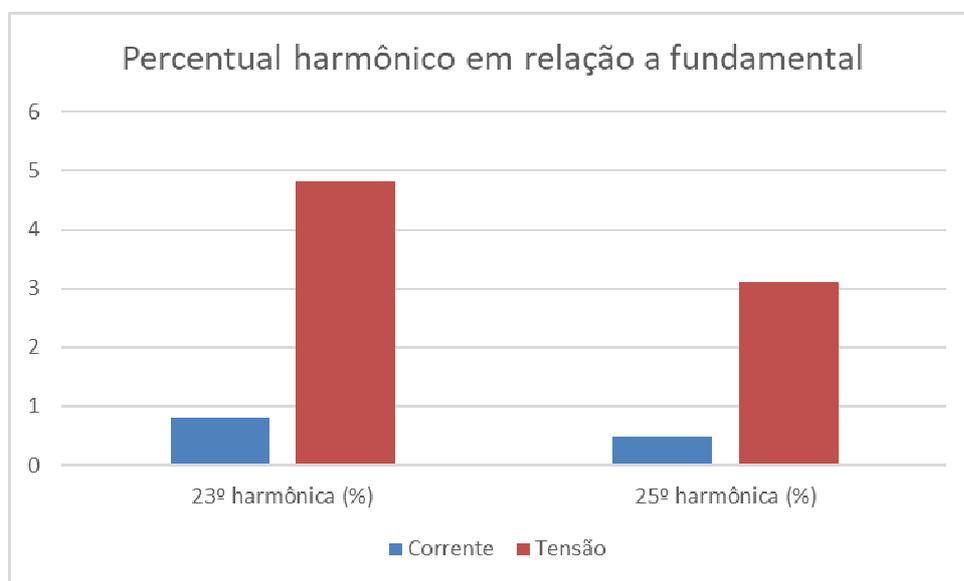


Figura 60- Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT

Na baixa tensão é verificado a propagação das distorções, conforme mostrado na Figura 61 e 62.

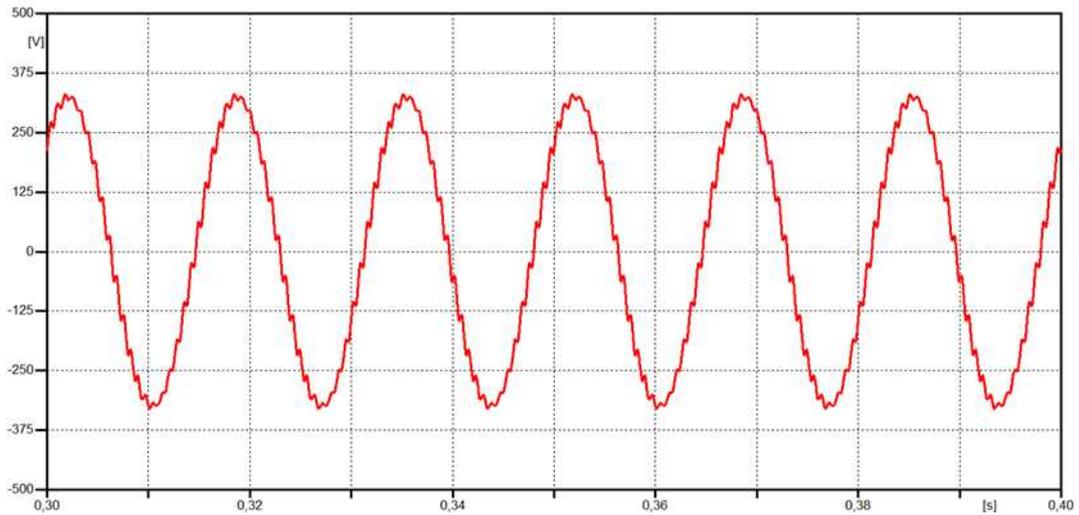


Figura 61- Forma de onda da tensão no QE-1-BT

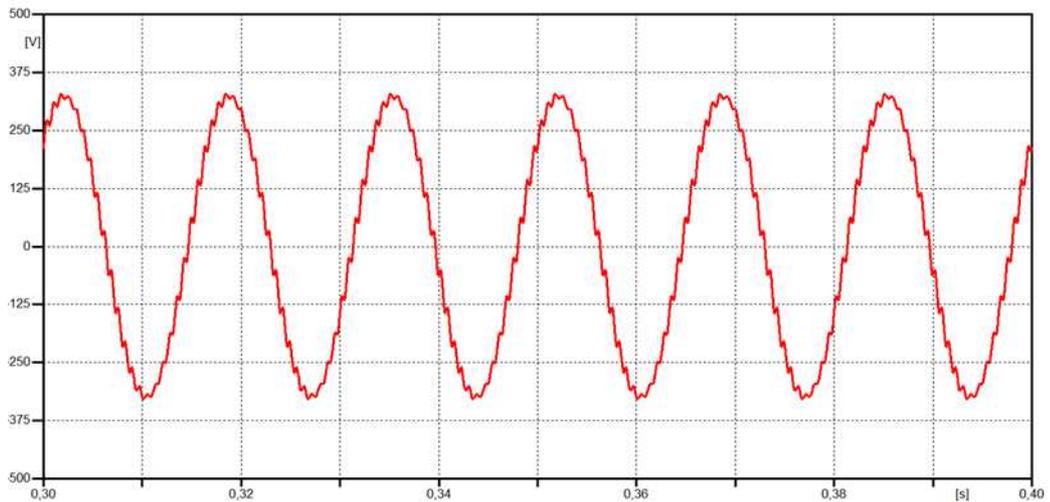


Figura 62-Forma de onda da tensão no QE-2-BT

5.6.2 Operação com velocidade de Cruzeiro

Para a condição de cruzeiro foram verificados, novamente, valores baixos de THD de tensão. A Figura 63 apresenta o perfil de tensão para esta condição.

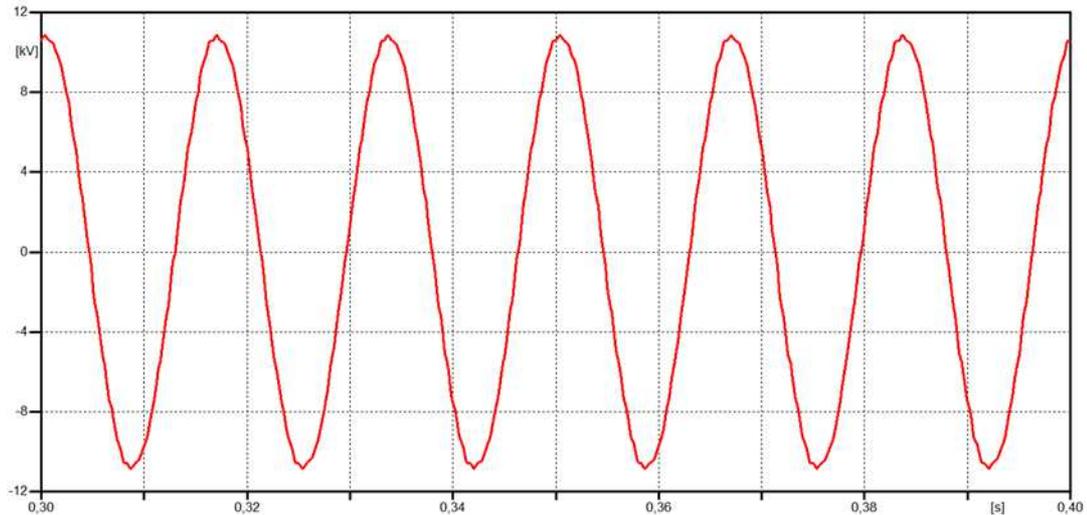


Figura 63- Forma de onda da tensão no QE--AT

5.7 Configuração 7

Análogo a configuração 4, a conversão CA/CC foi realizada com o retificador de 24 pulsos alimentando resistência representando a carga na condição de velocidade requerida pelo navio, foram observados valores intermediários de THD nos pontos de interesse no sistema para as configurações com 24 pulsos.

5.7.1 Operação com Velocidade Máxima

Os valores de THD, para a configuração 7, considerando retificador de 24 pulsos foi intermediário, ou seja, valores maiores do que a injeção de corrente e menores do que com os retificadores alimentando fonte de corrente. As Figuras 64 e 65 apresentam as formas de onda da corrente e tensão no QE-AT, os valores de THD ficaram em 5,67% e 0,92% para tensão e corrente respectivamente. Os valores individuais percentuais são apresentados na Figura 66 de tensão e corrente.

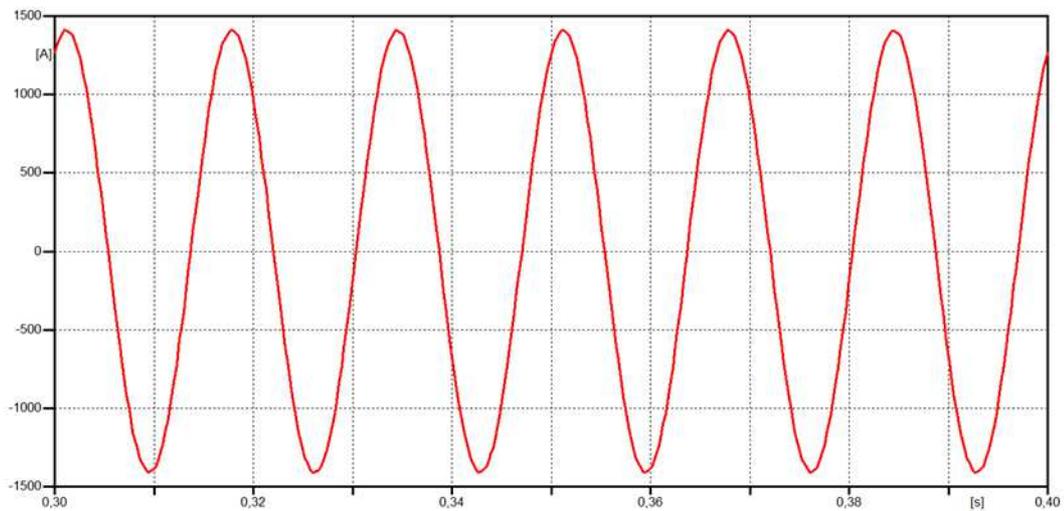


Figura 64- Forma de onda da corrente no QE--AT

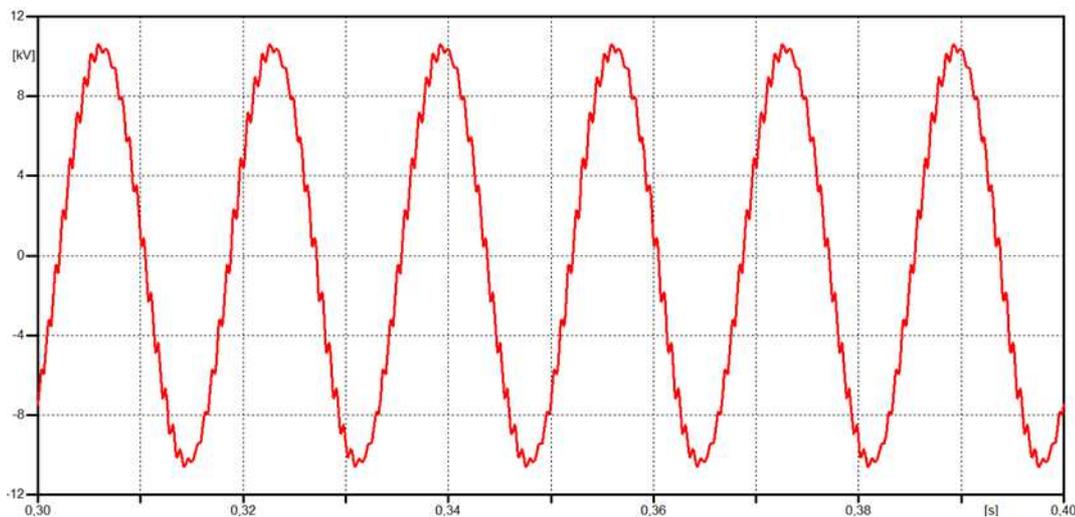


Figura 65- Forma de onda da tensão no QE—AT

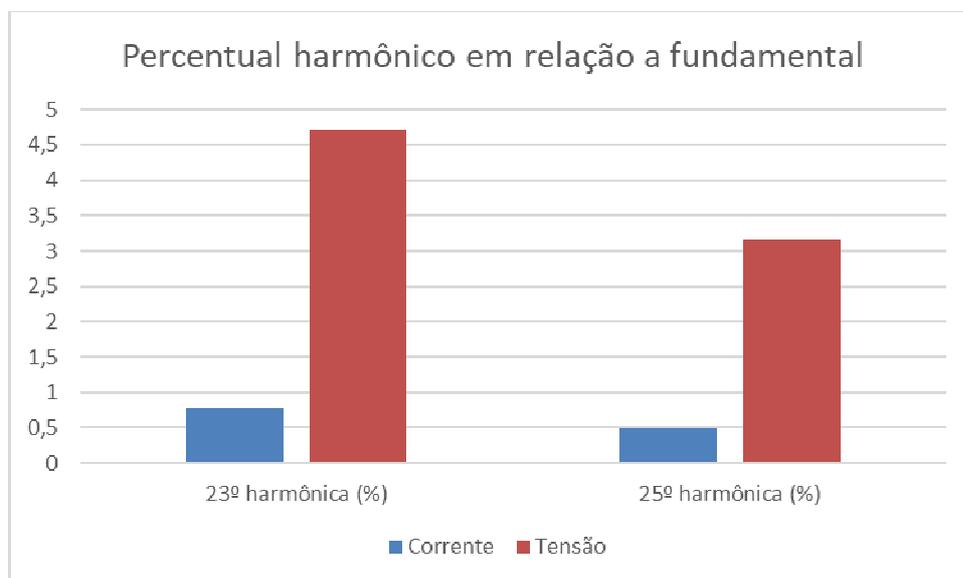


Figura 66- Comparação entre os harmônicos de Corrente e Tensão no QE-AT

As Figuras 67 e 68 apresentam as formas de onda da tensão nos quadros de baixa tensão.

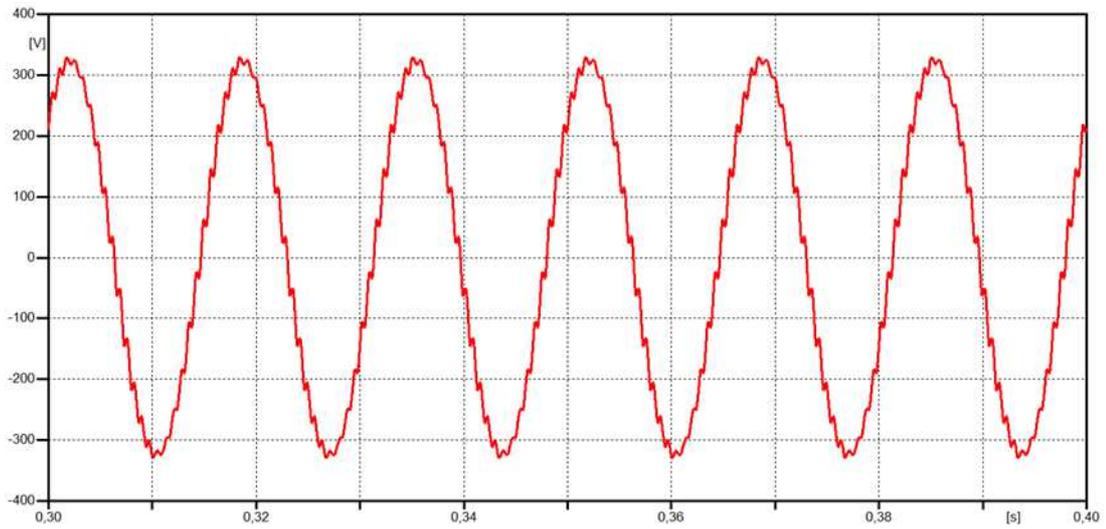


Figura 67-Forma de onda da tensão no QE-1-BT

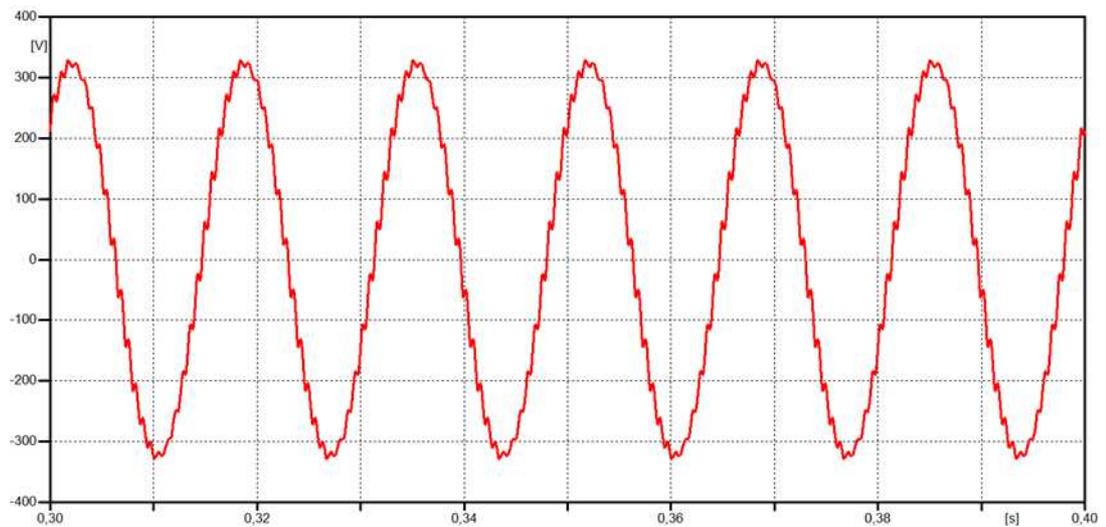


Figura 68-Forma de onda da tensão no QE-1-BT

5.7.2 Operação com Velocidade de Cruzeiro

Em cruzeiro assim como nos casos anteriores aos retificadores de 24 pulsos, não foram verificados índices significativos de THD, como apresentado o perfil de tensão no QE-AT na Figura 69.

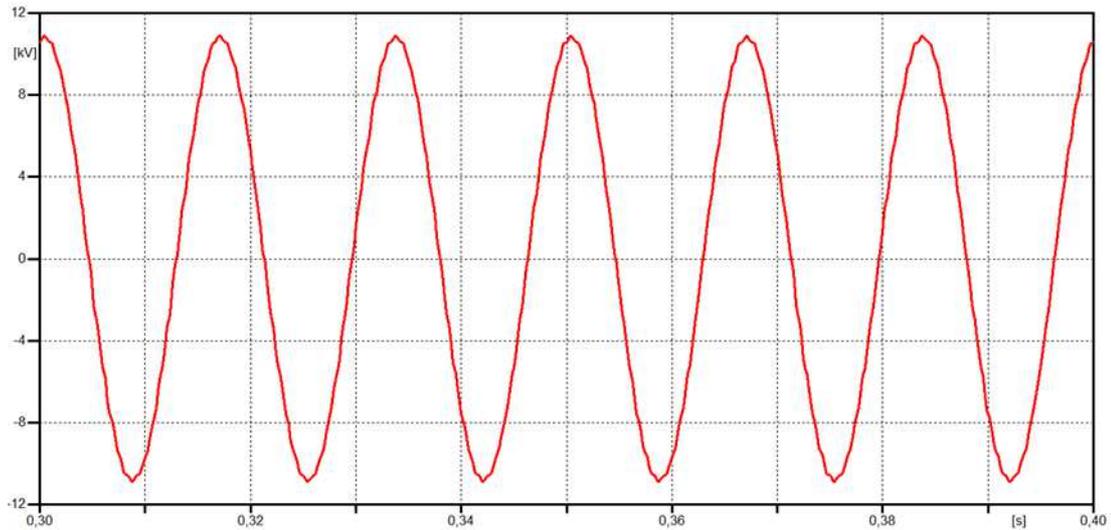


Figura 69- Forma de onda da tensão no QE-AT

Assim como para o acionamento em 12 pulsos, os maiores valores de THD foram verificados com o modelo dos retificadores alimentando fonte de corrente constante, enquanto os menores foram verificados com o modelo de injeção de corrente, em relação às simulações para velocidade máxima. Já para a velocidade de cruzeiro, a configuração 7 apresentou o menor THD de tensão e corrente dentre as configurações com 24 pulsos, corroborando o fato de se buscar representar nas simulações os modelos mais realistas possíveis, para diminuir os riscos quando da execução do projeto. As simulações utilizando os modelos dos retificadores apresentam uma dinâmica que não acontece quando a injeção de corrente é considerada. As Figuras 70 e 71 apresentam um comparativo, na velocidade máxima, dos harmônicos percentuais mais significativos das três configurações dotadas de 24 pulsos para corrente e tensão respectivamente.

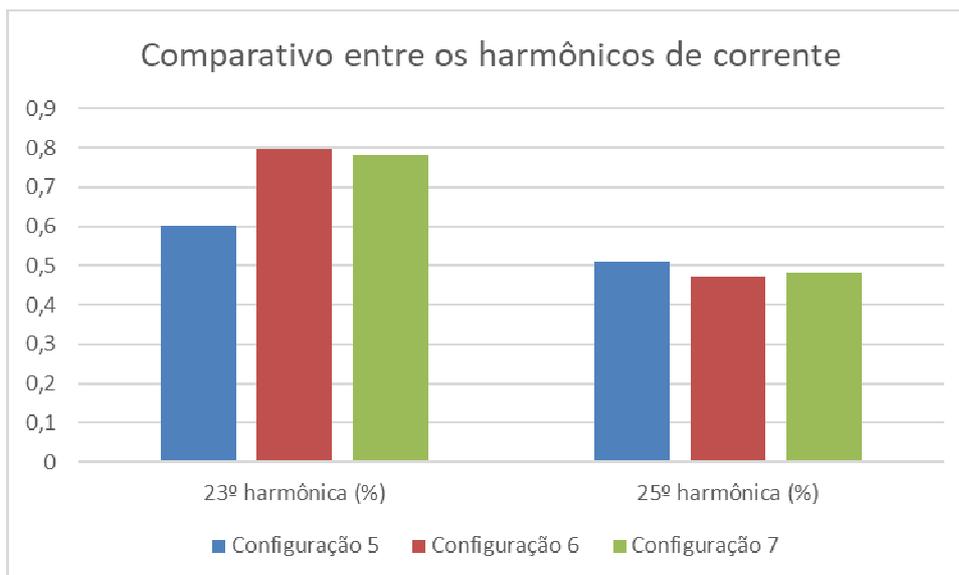


Figura 70- Comparativo dos principais harmônicos de corrente para as três configurações dos retificadores de 24 pulsos

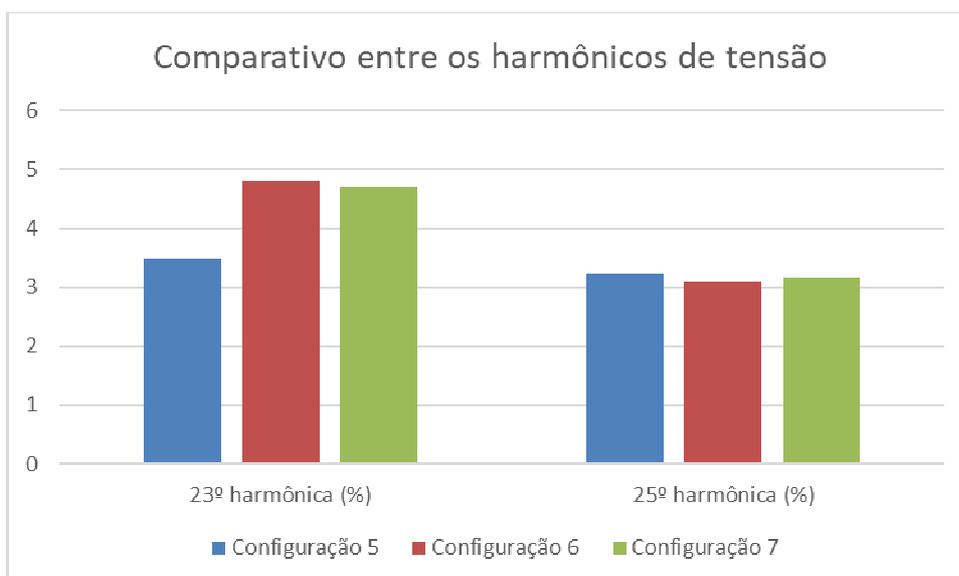


Figura 71- Comparativo dos principais harmônicos de corrente para as três configurações dos retificadores de 24 pulsos

De uma forma geral as configurações em que foram utilizadas o modelo dos retificadores alimentando fonte de corrente ou resistência foram verificados os maiores índices de THD, especificamente para os casos de 12 pulsos os valores ultrapassaram os estabelecidos em norma e representam um risco para o sistema elétrico de bordo, sendo necessário medidas que mitiguem os harmônicos para a correta operação do sistema elétrico da embarcação.

A Tabela 10 apresenta os valores de THD verificados para todas as configurações nos principais pontos do sistema elétrico da embarcação.

Tabela 10-Valores de THD de tensão e corrente nos principais pontos do sistema

		THD _v %			THD _i %		
		QE-AT	QE-1-BT	QE-2-BT	QE-AT	QE-1-BT	QE-2-BT
Configuração 1		-	1,07	0,62	-	0,6	0,2
Configuração 2	Velocidade Máxima	8,01	7,73	7,59	1,5	1,5	1,48
	Velocidade de Cruzeiro	7,13	6,93	6,77	2,93	1,3	1,27
Configuração 3	Velocidade Máxima	13,73	13,3	13,02	4,04	2,15	2,45
	Velocidade de Cruzeiro	11,86	11,41	11,24	5,3	2,35	2,41
Configuração 4	Velocidade Máxima	9,71	9,37	9,19	2,663	1,65	1,62
	Velocidade de Cruzeiro	10,172	9,75	9,62	4,31	2,11	2,02
Configuração 5	Velocidade Máxima	4,75	4,56	4,48	0,79	1,11	0,6
	Velocidade de Cruzeiro	2,21	2,17	2,1	0,52	1,01	0,35
Configuração 6	Velocidade Máxima	5,72	5,46	5,38	0,93	1,23	0,7
	Velocidade de Cruzeiro	1,64	1,63	1,56	0,67	0,94	0,3
Configuração 7	Velocidade Máxima	5,67	5,42	5,34	0,92	1,23	0,7
	Velocidade de Cruzeiro	1,56	1,52	1,47	0,42	1,01	0,32

Capítulo 6 - Mitigação dos Harmônicos

Na caracterização do problema de QEE relacionada à modelagem do sistema elétrico da embarcação, é possível mitigar os harmônicos, especialmente os causados pelos motores da propulsão elétrica. A utilização de filtros é a solução que atende a necessidade de redução dos harmônicos. Os filtros, para mitigação dos harmônicos gerados pelos *drives* da embarcação, podem ser filtros passivos ou filtros ativos. A utilização do primeiro se justifica pelas características da carga acionada. O acionamento dos motores elétricos de propulsão é realizado em pontos definidos de operação, portanto a sintonia dos filtros passivos é realizada de forma bastante simples e eficiente. Soma-se a isso o fato de os filtros passivos apresentarem baixo custo de implementação e manutenção, não necessitam de alimentação e suportarem grandes correntes e elevadas tensões [49]. A Figura 72 apresenta o sistema elétrico da embarcação com a inserção dos filtros passivos.

Para validar a utilização dos filtros passivos, foi escolhida a configuração 3 (12 pulsos com retificadores alimentando fontes de corrente) que possui os piores casos de distorção harmônica dentre todas as configurações analisadas.

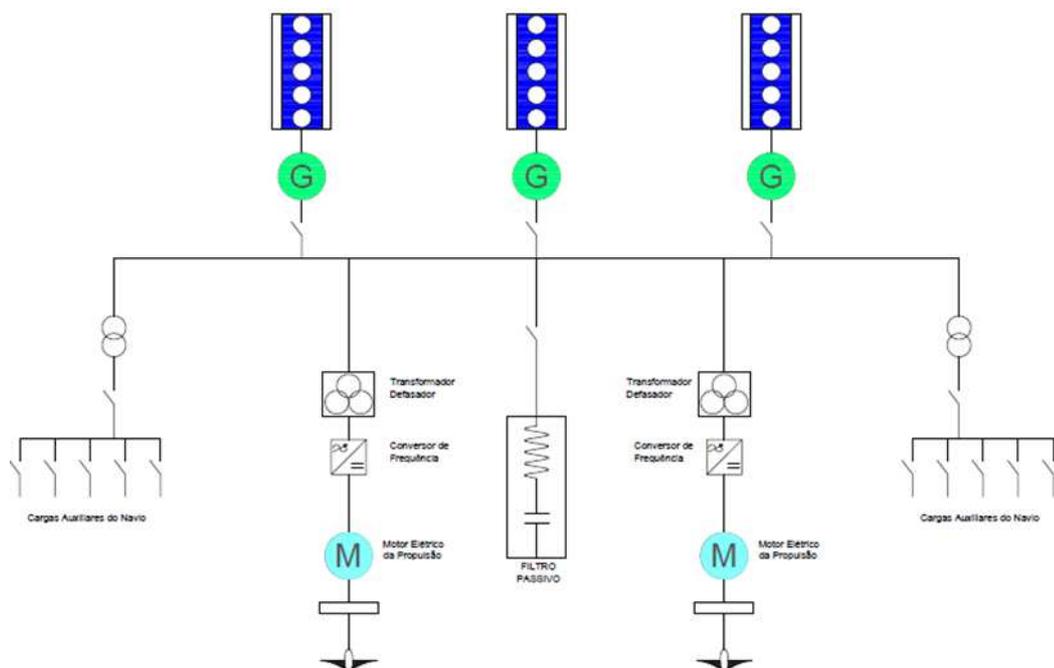


Figura 72- Sistema elétrico do navio com filtros passivos

A partir dos espectros harmônicos apresentados em cada caso, é possível identificar as ordens harmônicas de maior relevância no sistema. As componentes 11, 13, 23 e 25 predominam no retificador de 12 pulsos, e as de 23 e 25 predominam quando o retificador de 24 pulsos é utilizado. A partir dessas informações, é possível realizar o projeto de um filtro passivo LC para cada ordem harmônica, considerando compensação reativa necessária, de acordo com [49]. O fator de potência sem a inserção de filtro, para os casos estudados, é de aproximadamente 0,9, sendo assim, o filtro será projetado para aumentar o fator de potência para 0,98, portanto a potência reativa capacitiva necessária é calculada de acordo com a equação 4:

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (4)$$

Sendo P a potência ativa da embarcação, φ_1 o fator de potência atual e φ_2 o fator de potência desejado.

A partir do valor da potência reativa capacitiva encontrada, é possível dimensionar a reatância capacitiva X_c e por consequência a capacitância total C_T , respectivamente nas equações 5 e 6.

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c} \quad (5)$$

$$C_T = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (6)$$

Conhecendo-se as a capacitância total e as componentes harmônicas de corrente, proveniente das simulações apresentadas no capítulo 5, é possível encontrar os valores individuais de capacitância para cada caso, de acordo com a equação 7, e a partir desses valores são encontrados os valores para a indutância dos filtros, equação 8.

$$C_x = C_T \frac{I_x}{I_T} \quad (7)$$

$$L_x = \frac{1}{[2\pi f(x)]^2 * C_x} \quad (8)$$

O subíndice x indica a ordem harmônica em que se deseja mitigar os efeitos e I_T a corrente total.

Em Leão et al. [42], o fator de qualidade é um importante parâmetro relacionado aos filtros harmônicos. O valor de resistência do filtro irá depender da resistência do indutor. Tipicamente a qualidade dos filtros, fator Q está entre $50 < Q < 150$ [42]. A equação 9 define o valor R da resistência de cada filtro, sendo que para esse projeto foi utilizado $Q=100$.

$$R_x = \frac{\sqrt{\frac{L_x}{C_x}}}{Q} \quad (9)$$

A partir dos valores encontrados nas simulações apresentadas no capítulo 5, serão calculados os parâmetros dos filtros para cada caso analisado, na velocidade máxima, em que os maiores valores de THD são verificados, de acordo com as equações 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

6.1 Configuração 3

A Tabela 11 apresenta os valores calculados para o filtro na configuração 3. A partir do perfil de tensão apresentado na Figura 73, verifica-se uma tensão muito próxima de uma senoide pura, ou seja, diminuição significativa do conteúdo harmônico, que é comprovado com os valores apresentados na Tabela 12.

Tabela 11-Valores do filtro para a configuração 3

Filtro Passivo RLC			
Ordem	Capacitância (uF)	Indutância(mH)	Resistência (Ω)
11°	110,21	0,530	0,0218810
13°	90,35	0,460	0,0225848
23°	30,97	1,34	0,0658801
25°	22,071	1,89	0,0924647

Tabela 12-Valores de THD após a inserção do filtro para a configuração 3

	THDv			THDi		
	QE-AT	QE-1-BT	QE-2-BT	QE-AT	QE-1-BT	QE-2-BT
Sem Filtro	13,73	13,3	13,02	4,04	2,15	2,45
Com Filtro	0,363	0,369	0,33	0,062	0,92	0,3

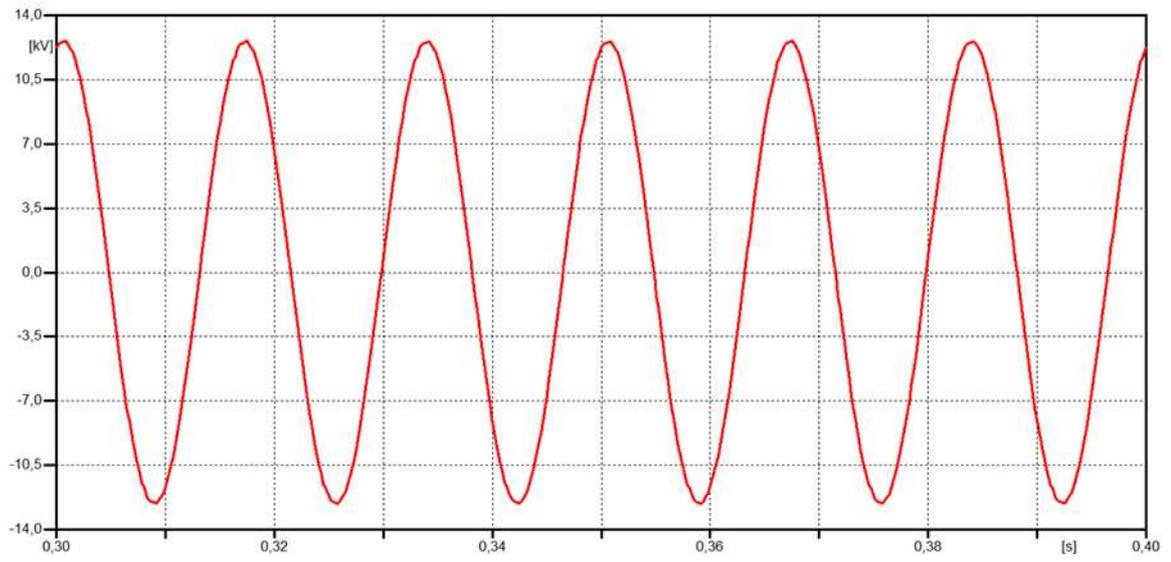


Figura 73-Forma de onda da tensão no QE-AT

Capítulo 7 - Conclusões e Trabalhos futuros

7.1 Conclusões

A flexibilidade proporcionada pela utilização da propulsão elétrica oferece à embarcação benefícios de grande importância, a possibilidade de localização do motor e drives em diferentes locais, permitindo uma melhor utilização dos espaços, uma vez que este é um dos principais desafios no projeto de uma embarcação, especialmente militar. A possibilidade de redução da manutenção e tripulação em relação aos sistemas de propulsão convencionais também são fatores importantes de serem destacados, por tudo isso, a propulsão elétrica vem ganhando cada vez mais destaque e sendo referência quando o assunto é propulsão de navios.

A despeito das vantagens na utilização da propulsão elétrica, há inúmeros desafios em se instalar uma usina de algumas dezenas de MW em uma embarcação. Em instalações terrestres os riscos já são consideráveis e aumentam substancialmente quando se trata de embarcações, principalmente militares, em que os requisitos são bem mais rigorosos quanto ao desempenho dos equipamentos e da embarcação. Soma-se a isso a peculiaridade de sistemas isolados, portanto fraco sob o aspecto elétrico, que são consideravelmente mais suscetíveis às perturbações de natureza elétrica no sistema.

Um dos fenômenos eletromagnéticos passíveis de acontecer em um sistema elétrico desta natureza são as distorções harmônicas, causadas por cargas não lineares oriundas sobretudo dos acionamentos dos motores elétricos de propulsão. A partir dos resultados apresentados no capítulo 5 desta dissertação, foi verificado que o sistema se comporta de forma vulnerável com relação aos harmônicos gerados pelos motores elétricos. Os resultados mostraram que valores relativamente baixos de THD de corrente levaram a altos valores de THD de tensão, este fato ocorre devido ao sistema apresentar baixo nível de curto circuito, sendo, portanto, extremamente vulnerável com relação aos fenômenos de QEE e ponto fundamental a ser verificado, ainda na fase de projeto básico, quando se escolher utilizar motores elétricos para a propulsão de navios. Os índices de THD de tensão apresentados na simulação, principalmente para os casos em que o drive utiliza retificador de 12 pulsos para a conversão CA/CC, são altos e podem prejudicar sobremaneira o comportamento dos

equipamentos elétricos conectados à rede, sendo alguns deles extremamente sensíveis, como nos casos de equipamentos de navegação, comunicação e combate.

Outro ponto importante a ser discutido é com relação às metodologias utilizadas nas simulações. Os casos mais brandos de THD foram verificados quando foram injetadas correntes harmônicas no ponto de conexão, simulações mais simplificadas e que podem, por desconsiderar a dinâmica envolvida no processo de conversão CA/CC, culminar em resultados menos confiáveis e assim apresentar níveis mais baixos com relação ao que de fato é verificado. Quando os retificadores foram implementados, os resultados foram mais severos, especialmente quando alimentando fonte de corrente CC, pois nestes casos a dinâmica da condução e bloqueio dos diodos é considerada e há uma interação maior com a rede elétrica modelada no ATPDraw. Assim são necessárias premissas para limitar os casos em que as simplificações podem ser adotadas, a julgar pelos inconvenientes que podem ser causados na evolução de um projeto desta natureza.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, conclui-se que a implementação de um sistema de propulsão elétrica, em relação a QEE, só pode ser considerado com a uso de filtros que mitiguem os efeitos gerados pelas cargas não lineares. Estes filtros devem ser projetados de forma que diminuam os efeitos da distorção harmônica causada pelo acionamento do sistema de propulsão. No capítulo 6 deste trabalho foi realizado o projeto de filtros passivos para o caso mais severo verificado na configuração³ respectivamente, o resultado nas simulações foi satisfatório e eliminou os altos níveis de THD presentes no sistema.

Uma análise por simulação como a realizada neste trabalho é de fundamental importância ainda na execução de um projeto básico. Se considerarmos os altos valores de potência utilizados na usina de energia da embarcação, os filtros e outros equipamentos envolvidos no processo possuem também valores elevados de potência e, por consequência, apresentam pacotes dimensionais consideráveis, o que pode inviabilizar um projeto desta natureza caso não seja previsto ainda na fase de projeto básico.

7.2 Trabalhos Futuros

Além dos problemas de QEE aqui verificados, a implementação de um sistema de propulsão elétrica em uma embarcação requer outros cuidados adicionais. A partir da planta

elétrica do navio simulada através da interface gráfica ATPDraw para verificar os índices de QEE, realizados nesta dissertação, faz-se necessário em trabalhos futuros adaptar o sistema elétrico para realizar outras análises fundamentais para desenvolver um projeto desta magnitude, destacando-se aqui análises de curto circuito, proteção e seletividade, estabilidade de máquinas elétricas e sistemas de aterramento. Além disso, uma análise em outros pontos de operação do motor se faz necessário, para verificar o comportamento do sistema em toda a faixa de velocidade, de forma que se faça uma análise geral do sistema elétrico do navio.

Referências Bibliográficas

- [1] SULZBERGER,C., “First Edison lights at sea: The SS Columbia story, 1880–1907 [history],” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 13, no. 1, pp. 92–101, Jan. 2015
- [2] American Bureau of Shipping — ABS, *Guidance Notes on Control of Harmonics in Electrical Power Systems*, 2006
- [3] MINDYKOWSKI, J.,TARASIUK, T., Problems of power quality in the wake of ship technology development, *Ocean Eng.* 107 (2015) 108–117
- [4] TARASIUK,T., A few remarks about assessment methods of electric power quality on ships — present state and further development, *Measurement* 42 (8) (2009) 1153–1163
- [5] DOERRY, N.,AMY, J.,KROLICK, C., "History and the Status of Electric Ship Propulsion Integrated Power Systems and Future Trends in the U.S. Navy", *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2243-2251, Dec. 2015.
- [6] SCHOYEN,H.,SOW, H., A decision making tool concerning retrofit of shaft generator frequency converter, *Ocean Eng.* 109 (2015) 103–112
- [7] ALVES,Renata. Propulsão Elétrica de Navios, Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Rio de Janeiro Federal — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007
- [8] MINDYKOWSKI, J., Power quality on ships: today and tomorrow’s challenges, *Proceedings of 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering — EPE* (2014)
- [9] WIMSHURST, M.J.V., Variable frequency drives — application to ships propulsion systems, *Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting* (2002)
- [10] MOYA,S.E.,VILAR, J.N.,KORPYS, R.A.,KOLODZIEJ, J.E., Frequency and total harmonic distortion estimation based on adaptive filters, *IEEE Lat. Am. Trans.* 11 (2013) 207–212
- [11] REHMATULLA, N., CALLEYA, J.,SMITH, T., The implementation of technical energyefficiency and CO2emission reduction measures in shipping, *Ocean Eng.* 139(2017) 184–197
- [12] REHMATULLA,N.,SMITH, T., Barriers to energy efficiency and low carbonshipping, *Ocean Eng.* 110 (2015) 102–112
- [13] ARMSTRONG, N.,BANKS, C., Integrated approach to vessel energy efficiency, *Ocean Eng.* 110 (2015) 39–48

- [14] Institute of Electrical and Electronic Engineers — IEEE, IEEE Standard 1159-2009, Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 2009.
- [15] SKJONG,E.,VOLDEN, R.,RODSKAR, E.,MOLINAS, M.,JOHANSEN, T.A., CUNNINGHAN, J., Past, present, and future challenges of the marine vessel's electrical powersystem, IEEE Trans. Transp. Electrification. 2 (2016) 522–537
- [16] BARROS, J.,DIEGO, R.I., A review of measurement and analysis of electric powerquality on shipboard power system network, Renew. Sustain. Energy Rev. 62(2016) 665–672
- [17] GIANNOUTSOS,S.V., MANIAS, S.N., A systematic power-quality assessment andharmonic filter design methodology for variable-frequency drive applicationin marine vessels, IEEE Trans. Ind. Appl. 51 (2015) 1909–1919
- [18] KIM,S.Y.,CHOE, S., KO, S.,SUL, S.K., A naval integrated power system with abattery energy storage system: fuel efficiency, reliability, and quality ofpower, IEEE Electrification. Mag. 3 (2015) 22–33
- [19] ZAHEDI,B.,NORUM, L.E., LUDVIGSEN, K.B., Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems, J. Power Sources 255 (2014) 341–354
- [20] JI, Q.,LIU, G., A starting method of ship electric propulsion permanent magnetsynchronous motor, Procedia Eng. 15 (2011) 655–659
- [21] CARICCHI,F.,CRESCIMBINI, F., O. HONRATI, Modular axial-flux permanent-magnetmotor for ship propulsion drives, IEEE Trans. Energy Convers. 14 (1999)673–679
- [22] SUDHOFF,S.S.,CORZINE,GLOVER,K.A., S.F.,HEGNER,. Robey,H.N., DC linkstabilized fieldoriented control of electric propulsion systems, IEEE Trans.Energy Convers. 13 (1998) 27–33
- [23] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. 61000-2-2, part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems
- [24] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. 61000-3-2, part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)
- [25] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. 61000-3-2, part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)
- [26] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-3-4, part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A

- [27] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. 60092-501:2013 Electrical installations in ships, part 501: Special features - Electric propulsion plant
- [28] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION — IEC, IEC Standard 60092-101-2002, Electrical installations in ships. Definitions and general requirement, 2002
- [29] IEEE Std 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems
- [30] IEEE Std. 45-2002 - IEEE Recommended Practice for Electric Installations on Shipboard
- [31] AMERICAN BUREAU OF SHIPPING — ABS, Rules for building and classing, steelvessels, 2008
- [32] DET NORSKE VERITAS — DNV, Rules for classification of ships, 2008
- [33] LLOYD’S REGISTER — LR, Rules and regulations for the classification of navalships — electrical engineering, 2001
- [34] RINAMIL — RINA, Rules for the Classification of Naval Ships, 2011
- [35] CAUNEAU, P, Le démonstrateur du concept de navire électrique (ESTD), REE N°3 Mars 2006
- [36] SKJONG, E., RØDSKAR, E., MOLINAS, M., JOHANSEN, T., CUNNINGHAM, J., The marine vessel’s electrical power system: From its birth to present day, Proc. IEEE, vol. 103, no. 12, pp. 2410-2424, Dec. 2015
- [37] HANSEN, J. F., WENDT, F., History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion Integrated Power Systems and Future Trends, Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 12, pp. 2229-2242, Dec. 2015
- [38] ARRINGTON, J., W., 1998, The Analysis of Components, Designs, and Operation for Electric Propulsion and Integrated Electrical System, Master of Science in Electrical Engineering, Naval Postgraduate School (NPS), Monterey, California, USA.
- [39] Little, G.T., Erskine, P.A., Norton, P., Demonstrating the Electric Ship, Naval Engineers Journal, 2003
- [40] CHAIGNO, J.P, SEKULA, V., Propulsion électrique sur les Bâtiments de projection et de commandement Mistral et Tonnerre et les nouveaux méthanières: a principaux avantages pour ces navires et pour les armateurs, REE N°3 Mars 2006
- [41] “Are Trends Electric? New Naval Power and Propulsion Generations Emerge”, Jane’s Navy International, 2015
- [42] BASSHAM, B., A., 2003, An Evaluation of Electric Motors for Ship Propulsion,

Master of Science in Electrical Engineering, Naval Postgraduate School (NPS),
Monterey, California, USA

- [43] ZHANG, B, EPSKAMP, T, DOPPELBAUER, M, GREGOR, M, A Comparison of the Transverse, Axial and Radial Flux PM Synchronous Motors for Electric Vehicle, 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)
- [44] KALSI, S, S, Development Status of Superconducting Rotating Machines, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE
- [45] FUGER, R, MATSEKH, A, KELLS, J, A superconducting homopolar motor and generator—new approaches, Superconductor Science and Technology, Volume 29, Number 3
- [46] BOSE, B, K, Power Electronics and Variable Frequency Drives, Wiley-IEEE Press, 1997
- [47] Dungan, R.C., Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill Education, 2002.
- [48] Arrilaga, J., Watson, N.R., Power System Harmonics, John Wiley & Sons, 2003.
- [49] Leão, R., Antunes, F., Sampaio, R., Harmônicos em Sistemas Elétricos, Elsevier, Brasil, 2013.
- [50] Arrilaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R., A.R Wood Power System Harmonics Analysis, John Wiley & Sons, 1997.
- [51] Medina, A., Segundo-Ramirez, J., Ribeiro, P., Xu, W., Lian, K. L., Chang, G. W., Dinavahi, V., and Watson, N. R., Harmonic Analysis in Frequency and Time Domain, IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation
- [52] Institute of Electrical and Electronic Engineers — IEEE, Brown Book™—IEEE Std 399™, Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis, 1997.
- [53] Prikler, L., Høidalen H.K., ATPdraw Version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista — Users' Manual, 2009.
- [54] Prysmian, Cabos Navais, 2016, Disponível em: <http://br.prysmiangroup.com/br/files/navais.pdf>
- [55] Technical guide N° 6 Guide to harmonics with AC drives, ABB drives
- [56] Ådnanes, A.K., Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion, ABB AS Marine, 2003
- [57] Thantirige, K., Rathore, A.K., Panda, S.K., Jayasignhe, G., Zagrodnik, M.A., Gupta, A.K., Medium voltage multilevel converters for ship electric propulsion drives, Proceedings of 2015 International Conference on

Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles —
ESARS 2015(2015), <http://dx.doi.org/10.1109/ESARS.2015.7101463>.

Anexo A –Parâmetros de Entrada no ATPDraw

Para a Configuração 2

A.1 Transformadores Abaixadores

Transformadores Abaixadores					
Primário			Secundário		
Tensão (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Tensão (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
13,8	1,904	19,56	0,254	0,0006	0,0066

A.2 Geradores

Geradores	
Tensão (kV)	Reatância Subtransitória (mH)
13,8	15

A.3 Cabos Elétricos

Cabos elétricos		
	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
Interligação entre geradores e QE-AT	0,3	0,4
Interligação entre QE-AT e QE-1-BT	0,34	0,4
Interligação entre QE-AT e QE-2-BT	0,34	0,4
Interligação entre QE-AT e <i>drives</i>	0,2	0,4

A.4 Injeção de Fontes de Corrente para Retificador de 12 pulsos

Fontes de corrente harmônicas				
	11º harmônica (A)	13º harmônica (A)	23º harmônica (A)	25º harmônica (A)
Velocidade máxima	47,6	45,8	19,7	16,9
Velocidade de Cruzeiro	8,65	8,3	3,6	3

A.5 Injeção de Fontes de Corrente para Retificador de 24 pulsos

Fontes de corrente harmônicas		
	23º harmônica (A)	25º harmônica (A)
Velocidade máxima	29,7	27,4
Velocidade de Cruzeiro	4,7	4,2

A.6 Transformadores Defasadores de 12 pulsos

Transformadores Defasadores 12 Pulsos								
Primário			Secundário			Terciário		
Tensão (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Tensão (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Tensão (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
7,967	0	1,00E-07	1,85	0,012572	0,35017	1,0681	0,0041908	0,11672

A.7 Transformadores Defasadores de 24 pulsos

Transformadores Defasadores 24 Pulsos								
Primário			Secundário			Terciário		
Tensão (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Tensão (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Tensão (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
7,967	0	2,00E-07	1,85	0,025144	0,70034	1,0681	0,008382	0,23344

A.8 Representação da Carga por Fonte de Corrente para 12 Pulsos

Acionamento por meio de retificador de 12 pulsos	
	Fonte de corrente representando a carga (A)
Velocidade máxima	2205,5
Velocidade de Cruzeiro	406

A.9 Representação da Carga por Fonte de Corrente para 24 Pulsos

Acionamento por meio de retificador de 24 pulsos	
	Fonte de corrente representando a carga (A)
Velocidade máxima	2205,5
Velocidade de Cruzeiro	402,3

A.10 Representação da Carga por Resistência Elétrica para 12 Pulsos

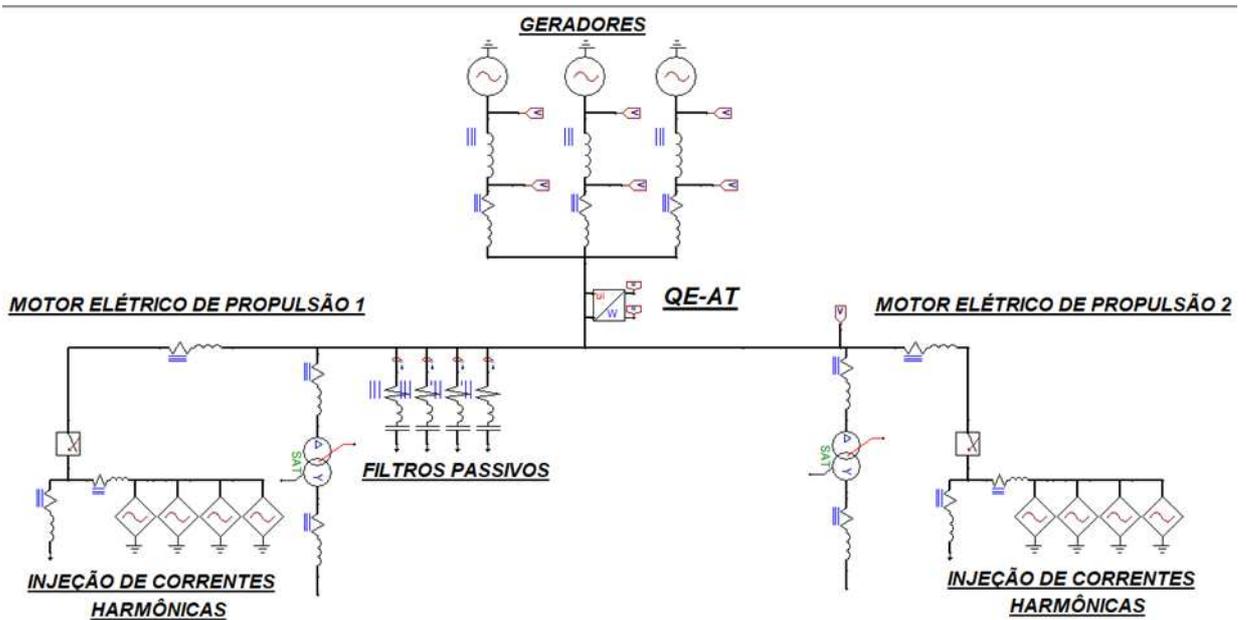
Acionamento por meio de retificador de 12 pulsos	
	Resistência elétrica representando a carga (Ω)
Velocidade máxima	1,997
Velocidade de Cruzeiro	11,68

A.11 Representação da Carga por Resistência Elétrica para 24 Pulsos

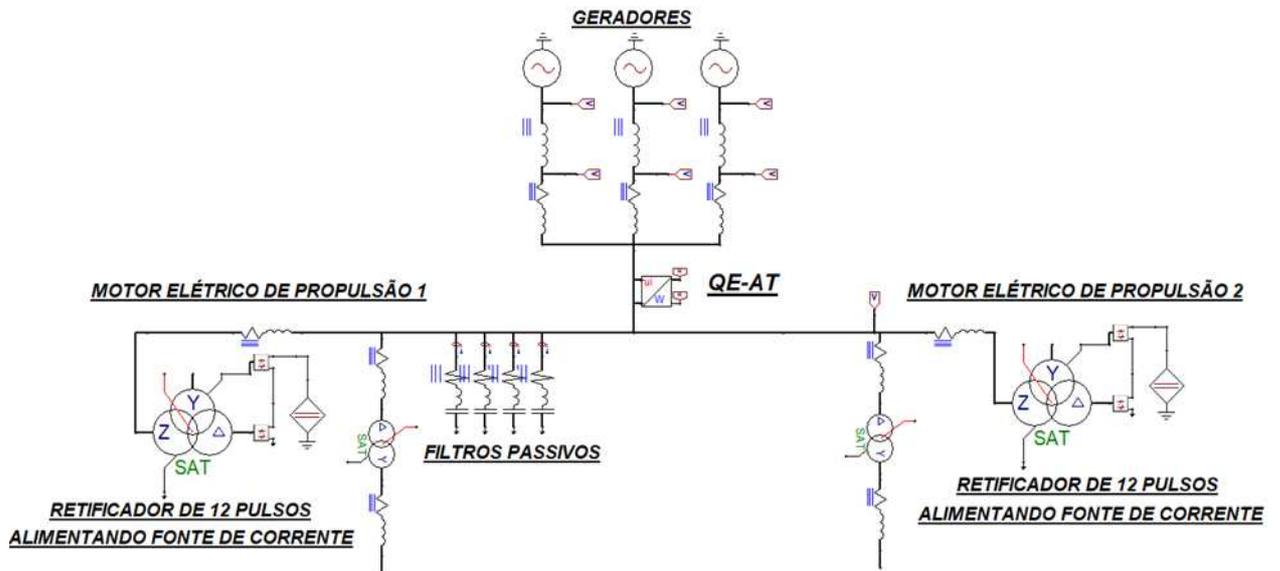
Acionamento por meio de retificador de 24 pulsos	
	Resistência elétrica representando a carga (Ω)
Velocidade máxima	1,997
Velocidade de Cruzeiro	11,85

Anexo B – Implementação do Sistema Elétrico no ATPDraw

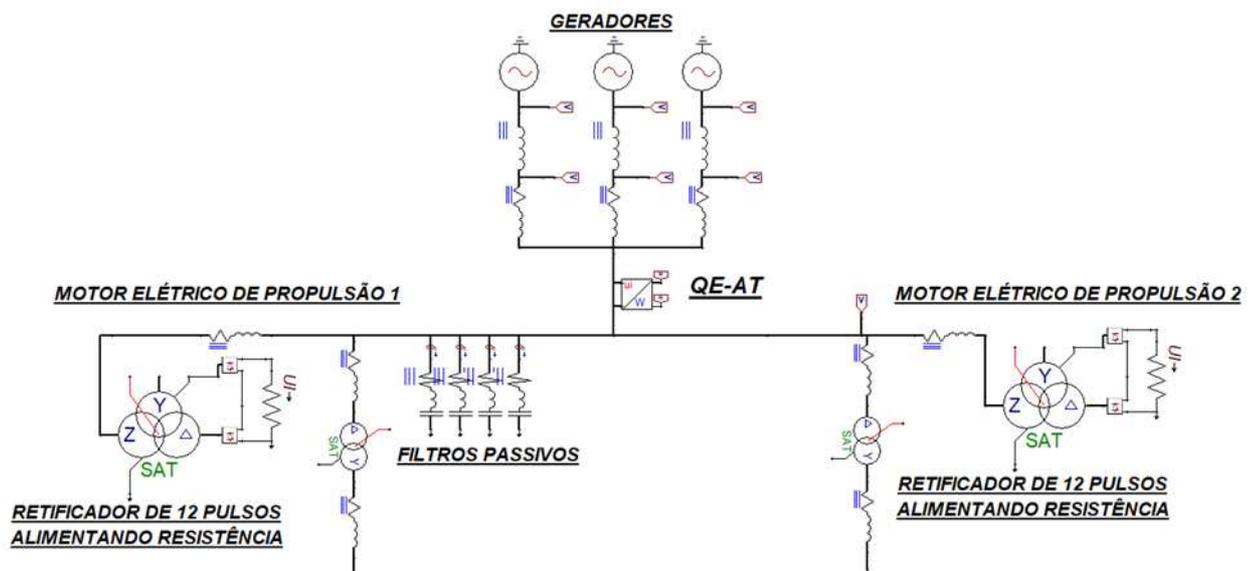
B.1 Modelo da Injeção de Fontes de correntes no ATPDraw



B.2 Modelo do retificador alimentando fonte de corrente representando a carga no ATPDraw



B.3 Modelo do retificador alimentando resistência elétrica representando a carga no ATPDraw



B.4 Modelo do Sistema de Baixa Tensão Implementado no ATPDraw

