

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

LARISSA DE CÁSSIA DOS SANTOS GOUVEIA

AVALIAÇÃO DA TROCA DE TECNOLOGIA DE ILUMINAÇÃO EM EMBARCAÇÕES
MILITARES

NITERÓI, RJ

2018

LARISSA DE CÁSSIA DOS SANTOS
MATRÍCULA: M054.217.005

AVALIAÇÃO DA TROCA DE TECNOLOGIA DE ILUMINAÇÃO EM EMBARCAÇÕES
MILITARES

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

Orientadora: Prof. Márcio Zamboti Fortes, Dr.

Niterói, RJ

2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE

G719a Gouveia, Larissa de Cássia dos Santos
AVALIAÇÃO DA TROCA DE TECNOLOGIA DE ILUMINAÇÃO EM
EMBARCAÇÕES MILITARES / Larissa de Cássia dos Santos Gouveia
; Márcio Zamboti Fortes, orientador. Niterói, 2018.
107 f. : il.

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2018.m.12498489703>

1. LED. 2. Eficiência Energética. 3. Consumo Energia
Elétrica. 4. Navios Militares. 5. Produção intelectual. I.
Título II. Fortes, Márcio Zamboti, orientador. III.
Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia.

CDD -

LARISSA DE CÁSSIA DOS SANTOS GOUVEIA

AVALIAÇÃO DA TROCA DE TECNOLOGIA DE ILUMINAÇÃO EM EMBARCAÇÕES
MILITARES

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

Aprovado em ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcio Zamboti Fortes, DSc.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Felipe Sass, DSc.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Angelo Cesar Colombini, DSc.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura, DSc.

Universidade Federal de São João del-Rei

Niterói, RJ

2018

Este trabalho é dedicado a minha querida mãe, Rita de Cássia, que muito se esforçou para me possibilitar boas oportunidades de estudos, e ao meu marido Miguel Atilla, que esteve do meu lado sempre me apoiando.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, que conduz minha vida e que sempre está presente guiando meus caminhos.

À minha mãe Rita de Cássia, que sempre apoiou meus estudos e nunca me deixou desistir diante das dificuldades impostas pela vida.

Ao meu marido Miguel Átilla, que é meu braço direito e esquerdo na vida, que nesses últimos dois anos entendeu as minhas ausências e meus momentos de stress.

A todos os funcionários e alunos do LABLUX que me apoiaram durante todos os ensaios realizados, sempre dispostos a atender e esclarecer minhas dúvidas.

Aos meus chefes CF (EN) Yuri, CF (EN) Gallego e 1T (EN) Lucas Reis que me apoiaram nos momentos que precisei me ausentar para assistir as aulas e ao meu colega de trabalho e de turma 1T(EN) Thiago Almeida que sempre esteve disposto a ajudar.

E por fim a pessoa que acreditou em mim e no projeto proposto, meu querido orientador Márcio Zamboti Fortes, que foi muito mais que um orientador do mestrado se tornando um exemplo de vida.

RESUMO

A busca pela eficiência e um melhor gerenciamento da energia elétrica em embarcações têm se tornado um assunto constante, principalmente no que diz respeito a navios militares. A missão da Marinha do Brasil é “preparar e empregar o Poder Naval, a fim de contribuir na Defesa da Pátria”, e sua visão de futuro é ser “uma Força moderna, equilibrada e balanceada, e deverá dispor de meios compatíveis com a inserção político-estratégica de nosso país no cenário internacional e, em sintonia com os anseios da sociedade brasileira”. E são nesses anseios que esse trabalho se aplica. Uma maneira eficaz de contribuir para a melhoria da eficiência energética nos navios é a substituição das lâmpadas fluorescentes e incandescentes por lâmpadas de LED (*Light Emitting Diode*). Além do aumento da eficiência, os LED trazem significantes benefícios para a rede elétrica do navio, como por exemplo, a melhoria do fator de potência da instalação e menor impacto na qualidade de energia, além da redução da manutenção devido ao seu maior tempo de vida útil. Porém suas substituições necessitam de estudos, devido as peculiaridades existentes em navios militares, tais como rede elétrica isolada, equipamentos sensíveis a variações de tensões e harmônicas, além de compartimentos com altas temperaturas e riscos de explosão. Neste trabalho serão analisados, de forma detalhada, os benefícios que a utilização do LED traz sobre vários aspectos para os navios da esquadra brasileira. Além dos aspectos econômicos, considerando os investimentos iniciais, economia de combustível da fonte térmica geradora de energia e o tempo de vida útil. Será considerada a aplicação de equipamento de iluminação disponível no mercado brasileiro e uma análise completa em seus aspectos técnicos para aplicação em navios militares, observando-se legislação brasileira e militar.

Palavras-chave: LED, Eficiência Energética, Consumo Energia Elétrica, Navios Militares.

ABSTRACT

The searches for efficiency and better management of electric power in vessels have become a constant subject, especially with respect to military ships. The mission of the Brazilian Navy is "to prepare and employ Naval Power in order to contribute to the Defense of the Motherland", and its vision for the future is to be "a modern, level headed and balanced force, and it must have means compatible with the insertion political-strategic of our country in the international scenario and, in line with the yearnings of the Brazilian society ". And it is in those yearnings that this work applies. An effective way to contribute to the improvement of energy efficiency in ships is the replacement of fluorescent and incandescent light bulbs by LEDs (Light Emitting Diode). In addition to increasing efficiency, LEDs bring significant benefits to the ship's power grid, such as improving the plant's power factor and energy quality, as well as reducing maintenance due to its longer useful life. However, its substitutions require studies, due to the peculiarities that exist in military ships, such as isolated power grid, equipment sensitive to variations of voltages and harmonics, in addition to compartments with high temperatures and risks of explosion. In this work, will be analyze in detail the benefits that the use of LED brings on various aspects for the ships of the Brazilian fleet. In addition to the economic aspects, considering the initial investments, fuel economy of the thermal power source and the useful life. Will be considered the application of available lighting equipment at Brazilian market and a full analysis of technical aspect to application at military ship always considered Brazilian and military law.

Keywords: LED, Energy Efficiency, Electric Power Consumption, Military Ships.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Contextualização Inicial	4
1.4	Estrutura do documento	6
2	Fundamentação teórica	8
2.1	Surgimento das lâmpadas elétricas em Navios.....	8
2.2	Evolução das lâmpadas.....	10
2.3	Aplicação das Lâmpadas LED em Navios	14
3	Metodologia.....	18
3.1	Testes Elétricos.....	18
3.1.1	Curva IES (<i>Illumination Engeneering Society</i> ou Sociedade de Engenharia de Iluminação) 23	
3.1.2	Fluxo Luminoso	23
3.1.3	Eficiência Luminosa	23
3.1.4	Temperatura de Cor	24
3.1.5	Índice de Reprodução de Cor - IRC.....	24
3.1.6	Potência Nominal.....	25
3.1.7	Fator de Potência.....	25
3.1.8	Distorção Harmônica Total (DHT ou <i>Total HarmonicDistortion</i> - THD)	25
3.1.9	Análise de Interferência Eletromagnética.....	26
3.2	Teste Mecânico de Vibração Ambiental.....	31
3.3	Análise da Qualidade de Energia Elétrica	32
4	Descrição do Caso	37
4.1.1	Sistema de Iluminação do Navio	38
4.1.2	Sistema de Iluminação Principal.....	38
4.1.3	Sistema de Iluminação de Emergência	39
4.1.4	Sistema de Luzes de Festa e Antissabotagem.....	40
4.2	Requisitos Gerais do Sistema de Iluminação.....	41
5	Medidas em Laboratório	43
5.1	Teste Elétrico	43
5.1.1	Resultados dos testes elétricos	44
5.2	Testes Mecânicos.....	62
5.2.1	Resultados dos testes mecânicos.....	63
5.3	Resultados obtidos e Análise de Qualidade de Energia.....	63
6	Comparação dos Resultados	66

6.1	Eficiência Energética.....	66
6.2	Reprodução de Cores.....	66
6.3	Comparação de nível de iluminância.....	67
6.4	Comparação da interferência magnética.....	68
6.5	Comparação da Qualidade de Energia Elétrica	68
6.6	Comparação Econômica	69
7	Conclusão.....	73
7.1	Trabalhos Futuros	74
Anexo 1 – Simulação dos níveis de iluminamento dos compartimentos do navio através dos arquivos .ies gerados nos testes e aplicados no <i>software</i> DIALUX		82
Anexo 2 – Simulação da distorção harmônica gerada na rede elétrica do navio no Software ATP.		
92		

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Lâmpada de filamento de carbono [18].....	8
Figura 2 – Navio SS Columbia [17].....	9
Figura 3 – Lucernas de Cerâmica [19].....	10
Figura 4 – Lâmpada de Argand [19].	11
Figura 5 – Lâmpada elétrica de Thomas Edison [19].	12
Figura 6 – Lâmpada Fluorescente [19].	13
Figura 7 – Lâmpada LED [20].	13
Figura 8 – Goniôfotômetro GO2000 [30].	19
Figura 9 – HAAS-2000 [31].....	19
Figura 10 - Fonte de Tensão Pacific [32].....	20
Figura 11 – Watímetro Yokogawa WT-230 [33].....	20
Figura 12 - Pré-seletor RF915B [36].....	21
Figura 13 - LISN-A-16A1P [36].....	21
Figura 14 – Analisador de Espectro S46M3 [36].....	22
Figura 15 – Antena Loop RF300 [36].....	22
Figura 16 – Fluxo luminoso de um lúmen emitido pela fonte luminosa [39].....	23
Figura 17 – Temperaturas de cor típicas [40].	24
Figura 18 – Reprodução de cores e seus índices [38].	24
Figura 19 – Detector de pico [37].	27
Figura 20 – Detector de quase-pico [37].....	28
Figura 21 – <i>Setup</i> dos equipamentos utilizados durante a medição das tensões de perturbação nos terminais de alimentação das luminárias.....	28
Figura 22 – <i>Setup</i> dos equipamentos utilizados durante a medição de perturbações radiadas (campo elétrico) das luminárias.	30
Figura 23 – Equipamento CDN utilizado durante o ensaio de perturbação radiada (campo elétrico).....	31
Figura 24 – Representação do gerador e sua reatância subtransitória utilizado no ATP.....	34
Figura 25 – Representação do transformado utilizado no ATP.....	35
Figura 26 – Representação das cargas lineares no ATP.....	35
Figura 27 – Representação do cabo utilizado no ATP.....	35
Figura 28 – Representação das cargas não lineares utilizado no ATP.....	36
Figura 29 – Teste das luminárias no LABLUX – UFF.....	43

Figura 30 – Curva Polar Luminária Fluorescente	45
Figura 31 – Curva Polar Luminária LED.....	45
Figura 32 – Reprodução de Cor - Lâmpada de LED.....	46
Figura 33 – Reprodução de Cor - Lâmpada de Fluorescente.....	46
Figura 34 – Ensaio de perturbação em terminais de alimentação	49
Figura 35 – Valores de pico da tensão de perturbação gerados pela luminária LED no terminal fase	49
Figura 36 – Valores de pico da tensão de perturbação gerados pela luminária LED no terminal neutro.....	50
Figura 37 – Valores de pico da tensão de perturbação gerados pela luminária fluorescente no terminal fase	51
Figura 38 – Valores de pico da tensão de perturbação gerados pela luminária fluorescente no terminal neutro	52
Figura 39 – Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo Magnético).....	53
Figura 40 – Valores de pico da corrente induzida no eixo X da antena loop da luminária LED..	54
Figura 41 – Valores de pico da corrente induzida no eixo Y da antena loop da luminária LED..	55
Figura 42 – Valores de pico da corrente induzida no eixo Z da antena loop da luminária LED ..	56
Figura 43 – Valores de pico da corrente induzida no eixo X da antena loop da luminária fluorescente	57
Figura 44 – Valores de pico da corrente induzida no eixo Y da antena loop da luminária fluorescente	58
Figura 45 – Valores de pico da corrente induzida no eixo Z da antena loop da luminária fluorescente	59
Figura 46 – Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo Magnético).....	60
Figura 47 – Valores de pico das perturbações eletromagnéticas radiadas geradas pela luminária LED	60
Figura 48 – Valores de pico das perturbações eletromagnéticas radiadas geradas pela luminária fluorescente	61
Figura 49 – Equipamento utilizado no ensaio de vibração	62
Figura 50 – Comparação dos maiores harmônicos gerados na simulação	65
Figura 53 – Rede Elétrica Geral do Navio	92
Figura 54 – Representação dos Geradores	92
Figura 55 – Representação do Quadro Elétrico 1.....	93
Figura 56 – Representação do Quadro Elétrico 2.....	93

Figura 57 – Representação das Luminárias Fluorescentes.....	94
Figura 58 – Representação das Luminárias LEDs	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites das Tensões de Perturbação nos Terminais de Alimentação.....	29
Tabela 2 – Limites de Perturbação Radiada nas Frequências de	30
Tabela 3 – Limites de Tensão nos Terminais em Modo Comum, Método CDN.....	31
Tabela 4 – Deslocamento Vibratório para Vibrações Ambientais.....	32
Tabela 5 – Duração do teste de resistência em uma determinada direção ortogonal em cada frequência de teste.	32
Tabela 6 – Resultados Fotometria: Comparação das Potências.....	44
Tabela 7 – Resultados Fotometria: Comparação fotométrica	44
Tabela 8 – Comparação dos resultados obtidos no DIALUX.....	47
Tabela 9 – Tensões de perturbação gerada pela luminária LED no terminal fase.....	50
Tabela 10 – Tensões de perturbação gerada pela luminária LED no terminal neutro	51
Tabela 11 – Tensões de perturbação gerada pela luminária fluorescente no terminal fase	52
Tabela 12 – Tensões de perturbação gerada pela luminária fluorescente no terminal neutro.....	53
Tabela 13 – Valores da corrente induzida no eixo X da antena loop da luminária LED.....	54
Tabela 14 – Valores da corrente induzida no eixo Y da antena loop da luminária LED.....	55
Tabela 15 – Valores da corrente induzida no eixo Z da antena loop da luminária LED	56
Tabela 16 – Valores da corrente induzida no eixo X da antena loop da luminária fluorescente ..	57
Tabela 17 – Valores da corrente induzida no eixo Y da antena loop da luminária fluorescente ..	58
Tabela 18 – Valores da corrente induzida no eixo Z da antena loop da luminária fluorescente...	59
Tabela 19 – Valores das perturbações eletromagnéticas radiadas geradas pela luminária LED .	61
Tabela 20 – Valores das perturbações eletromagnéticas radiadas geradas pela luminária fluorescente	61
Tabela 21 – Teste de Vibração.....	62
Tabela 22 – Valores dos maiores harmônicos das luminárias obtidos através de ensaios no laboratório	64
Tabela 23 – Cálculo de Sobressalente.....	69
Tabela 24 – Preço da energia elétrica gerada no navio.....	70
Tabela 25 – Análise econômica dos custos gerados com iluminação.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CCM	Centro de Controle e Monitoração
CDN	<i>Coupling/Decoupling Network</i>
COC	Centro de Operação e Combate
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DGE	Diesel Gerador de Emergência
DGP	Diesel Gerador Principal
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
FP	Fator de Potência
GAAS	Arsenieto de Galio
HAZMAT	<i>Hazardous Material</i>
HEDlight	<i>High Efficiency Distributed Lighting</i>
IES	<i>Illumination Engeneering Society</i>
IRC	Índice de Reprodução de Cor
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LISN	<i>Line Impedance Stabilization Network</i>
NAVSEA	<i>Naval Sea Systems Command</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QEP	Quadro Elétrico Principal
RBG	<i>Red-Blue and Green</i>
RMI	<i>Rocky Mountain Institute</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UFF	Universidade Federal Fluminense
VCS	<i>Vibration Control System</i>

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o uso racional de energia vem ganhando ao longo dos anos uma grande importância no segmento da indústria, principalmente na indústria militar naval. As principais Marinhas do mundo, como por exemplo, a Marinha dos Estados Unidos da América, está cada vez mais empenhada em reduzir o consumo de combustível da sua frota, além de torná-la mais ecológica e sustentável [1-2]. A busca pela redução do consumo de combustível nas embarcações justifica-se por diversos fatores destacando como principal deles o fato de ser utilizado óleo diesel como principal fonte de energia, e este energético ser utilizado tanto pela propulsão, quando para a geração de energia elétrica do navio, o que contribui sobremaneira a emissão de poluentes na atmosfera [3]. De forma a reduzir tanto o custo operacional quanto o consumo de combustível da embarcação [4] e conseqüentemente espaço com os tanques de armazenamento [2], são propostas nas literaturas diversas metodologias para melhorar a eficiência e o gerenciamento de energia nas embarcações [5-7].

A substituição das lâmpadas fluorescentes e incandescentes por lâmpadas de LED (*Light Emitting Diode*) é uma forma eficaz de melhorar a eficiência energética [8] nos navios da Marinha do Brasil (MB), uma vez que esse tipo de iluminação oferece uma eficiência luminosa superior em comparação às tecnologias anteriormente aplicadas. Porém, a implementação referente a mudanças ocorrida em qualquer organização grande e estruturada, especialmente na MB, requer pesquisa, desenvolvimento e análise de múltiplas decisões, dependendo da complexidade da mudança ou implementação [7].

Pela análise de demanda de um navio de guerra, a iluminação geral, desconsiderando iluminação de hangar, luzes de navegação e outros tipos de iluminação especial, correspondem a aproximadamente 5% de toda “carga hotel¹”, que inclui sistemas auxiliares, ar condicionado, ventiladores e iluminação [9-10].

Além do significativo aumento na eficiência luminosa, a lâmpada de LED traz consigo vários benefícios em sua utilização. No que diz respeito à qualidade de energia, principalmente em relação à produção de correntes harmônicas, aspecto sensível em redes elétricas de navios devido às características peculiares de sistemas isolados, as lâmpadas LED também possuem um desempenho superior em relação às lâmpadas fluorescentes, tais como

¹Carga hotel de um navio são todas as cargas instaladas no navio exceto as cargas de propulsão.

durabilidade e maior vida útil [11], possibilitando menores custos de manutenção e reposição; qualidade de cor e versatilidade de tons da luz branca; alta eficiência luminosa, pois são fontes de luz pontuais, com menor perda do que as lâmpadas tradicionais [9-13]. Outro benefício do LED é a redução significativa da manutenção, diminuição de sobressalentes e aumento da confiabilidade [12, 14], que pode impactar na possibilidade de reduzir o pessoal de bordo e conseqüentemente a redução do custo operacional do navio.

Uma das principais dificuldades para implementar a iluminação LED em navios da MB é o custo inicial para a adoção da tecnologia em toda a embarcação, pois o valor da lâmpada LED ainda é superior as lâmpadas fluorescentes, apesar de seu custo ser potencialmente diluído no decorrer da vida útil do navio. Um estudo realizado na Marinha Americana [14] reporta o tempo de retorno do investimento das lâmpadas LED para diversas classes de navios de sua frota, devido ao alto custo da aquisição do LED, dependendo da classe do navio o tempo de retorno para o investimento supera os 30 anos de operação, não sendo viável do ponto de vista econômico realizar tal substituição [14].

Outro fator relevante é entender como que essas lâmpadas se comportarão no sistema isolado, no que diz respeito à qualidade de energia elétrica. Teoricamente o LED possui uma distorção harmônica inferior aos das lâmpadas fluorescentes [10, 15], mas as mesmas ainda não foram utilizadas em larga escala em um sistema isolado e sabe-se que dependendo da tecnologia, potência e número de equipamentos aplicados, esta distorção harmônica inicialmente crítica pode ser atenuada [10], uma vez que harmônicos podem comprometer a qualidade de energia de uma instalação [16].

Somando as questões objetivas que relacionam as vantagens e desvantagens da utilização de lâmpadas LED em navios de guerra da MB, há ainda aspectos organizacionais subjetivos. Por se tratar de organização tradicional, novas tecnologias devem ser apresentadas de maneira objetiva de forma a justificar os benefícios que serão obtidos com a mudança [12] e neste sentido pesquisas como esta apresentada pode colaborar na contribuição do entendimento e características de aplicação desta nova tecnologia de iluminação.

1.1 MOTIVAÇÃO

Na MB o assunto que tem tomado à cena em debates é como tornar seus meios mais eficientes e sustentáveis, e uma maneira aparentemente simples de tornar isso possível é a substituição da tecnologia de iluminação dos navios.

Atualmente os navios que compõe a frota da MB, possuem em sua grande maioria, lâmpadas fluorescentes, utilizadas em corredores, camarotes e compartimentos em geral.

Porém, devido às peculiaridades existentes nos navios de guerra, a substituição dessas lâmpadas não é uma tarefa tão simples como substituir uma lâmpada residencial. Deve-se analisar diversos fatores, um deles é avaliar se essa substituição poderia impactar os níveis de distorção harmônica exigida para que não afetassem a operação de equipamentos sensíveis, como o radar. Outro ponto importante a ser analisado é se as lâmpadas poderiam causar interferências eletromagnéticas, requisito que geralmente encarece os valores de aquisição e por fim se as mesmas são capazes de operar com requisitos de vibração impostas no ambiente militar devido a acionamento de alguns equipamentos, assim como o armamento.

Apesar das lâmpadas LED estarem no mercado há algumas décadas, a aplicação na área naval militar ainda é um assunto novo que requer estudos para sua viabilidade, mesmo que do ponto de vista energético seja uma solução com grande potencial.

Os navios possuem diversos pontos que são sensíveis, um deles é o espaço, por se tratar de navios militares, todos os espaços são de grande importância. Mas como que uma lâmpada LED pode interferir nessa questão? Devido às lâmpadas LED terem uma vida útil maior comparada com as lâmpadas fluorescentes, a necessidade de sobressalentes se torna menor, reduzindo assim a necessidade de paíóis dedicados para essa finalidade. Outra consequência que deriva dessa substituição é que as lâmpadas LED não precisam ter um descarte diferenciado como as fluorescentes, devido ao mercúrio que possuem em sua composição. Outro espaço que poderá ser reduzido são os tanques de combustível, que são responsáveis por gerar a energia elétrica de bordo, com a economia gerada devido os LEDs serem mais eficientes, diminuiria assim a quantidade de combustível necessária para a geração [2].

Nesse contexto o trabalho contará com a bibliografia da aplicação dos LED na área militar *offshore*, além de ensaios laboratoriais e simulações através de *softwares* a fim de validar todas as informações obtidas em ensaios com luminárias de fabricação nacional.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade da implementação de iluminação LED em substituição a iluminação fluorescentes existentes atualmente,

considerando apenas a iluminação geral de um navio militar do tipo patrulha, apresentando todas as vantagens e desvantagens que serão geradas com esse tipo de solução. Para atingir esse objetivo, serão realizados testes em luminária existente no mercado nacional a fim de atender a demanda imposta para um ambiente militar naval, observando-se as políticas de segurança da MB. A partir dos ensaios será possível analisar do ponto de vista de consumo de energia, qual o real ganho que será obtido com tal substituição, levando em consideração o custo de aquisição inicial e o custo ao longo da vida útil do meio analisado.

Para atingir o objetivo do trabalho, serão realizados os seguintes testes nas luminárias:

- a) Curva IES (*Illumination Engineering Society*);
- b) Fluxo Luminoso (lm);
- c) Eficiência Luminosa (lm/W);
- d) Temperatura de Cor (K);
- e) Índice de Reprodução de Cor;
- f) Fator de Potência Nominal;
- g) Distorção Harmônica;
- h) Resistência à Vibração;
- i) Análise de Interferência Eletromagnética;

De posse dos resultados obtidos dos testes, será analisada para uma determinada classe de navio a viabilidade da substituição para lâmpadas LED, do ponto de vista econômico, considerando os valores de aquisição e sobressalentes das lâmpadas, e sobre o aspecto da qualidade de energia elétrica (QEE).

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO INICIAL

Este trabalho apresenta uma solução para tornar os navios da esquadra brasileira mais eficiente através da substituição das lâmpadas existentes nos navios por lâmpadas LED. Seu objetivo principal é fornecer um estudo detalhado dos impactos que poderão ocorrer com essa substituição do ponto de vista elétrico, econômico e social.

Como objetivo secundário pretende-se disponibilizar uma série de especificações que essas luminárias deverão possuir para aplicação no mercado militar naval de forma que haja o máximo de eficiência energética e um menor impacto com as atividades executadas pelo navio, parâmetros esses que serão verificados através do *software* para análise de transitório (*Alternative Transient Program - ATP*) que mostrará o comportamento dessas luminárias na rede elétrica real do navio analisado.

Assim, a substituição proposta apresentará as seguintes vantagens:

- Maior eficiência energética, tendo em vista que os LEDs possuem grande eficiência comparada às lâmpadas fluorescentes e incandescentes (principais lâmpadas encontradas nos navios da MB);
- Redução das manutenções e do espaço destinado a sobressalentes, visto que o tempo de vida útil das lâmpadas LED é muito superior às demais lâmpadas;
- Durabilidade em relação ao choque e vibração, principais causas de queima das lâmpadas em navios militares;
- Diminuição da geração de calor durante as operações;
- Diminuição do consumo de combustível, devido à eficiência energética dos LEDs, e como consequência diminuição da emissão de poluentes (dióxido de carbono) no meio ambiente;
- Facilidade de descarte, sendo benéficas ao meio ambiente, ao contrário das fluorescentes que devem ser tratadas como resíduo de material perigoso;
- Em comparação com as lâmpadas fluorescentes, os LEDs são mais bem aplicados em operações que requerem uma assinatura de baixo ruído, pois os mesmos eliminam o som audível gerados pelos reatores das lâmpadas fluorescentes;
- A iluminação de LED trará conforto para a tripulação, pois melhoraria a qualidade da iluminação de bordo;
- Aspectos de QEE que impactem no funcionamento de cargas críticas.

Esta proposta tem o propósito de melhorar e tornar mais eficientes os navios da MB, através da substituição das lâmpadas de bordo.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em sete capítulos, contando com este capítulo introdutório ao tema central deste trabalho, que inclui a caracterização do problema e sua contextualização, bem como objetivos, motivações e contribuições, além da estrutura do mesmo, que será agora apresentada, organizada de forma a proporcionar ao leitor uma sequência lógica dos tópicos apresentados:

- No Capítulo 2, "FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA", são apresentados alguns conceitos com o intuito de introduzir o leitor no tema abordado e ainda apresentar o estado da arte, introduzindo conhecimentos sobre o surgimento das lâmpadas para aplicação naval, a evolução das tecnologias das lâmpadas até o surgimento dos LEDs e por fim a aplicação das lâmpadas de LED na área naval militar.
- O Capítulo 3, "METODOLOGIA", apresenta de forma detalhada todos os testes que serão realizados no laboratório para as luminárias de LED e fluorescente, tanto do ponto de vista elétrico, como no ponto de vista mecânico. Além dos testes realizados no laboratório, também será utilizado o *software* ATP para que sejam analisados os impactos gerados pelos harmônicos de ambas as luminárias na rede elétrica do navio.
- O Capítulo 4, "DESCRIÇÃO DO CASO", dedica-se a apresentar o funcionamento do sistema elétrico do navio e todo o sistema de iluminação presentes na embarcação analisada.
- No Capítulo 5, "MEDIDAS EM LABORATÓRIO", mostram-se os resultados dos testes realizados com base na teoria descrita, telas de interface e resultados obtidos, comparando as duas tecnologias (LED e fluorescente). Nesse capítulo também são consolidados todos os resultados obtidos de forma a subsidiar conclusões.

- No Capítulo 6, "COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS", Comparam-se os resultados obtidos no Capítulo 5 – Medidas em Laboratório e avaliações de QEE obtidas através do *software* ATP no contexto macro da instalação elétrica.
- O Capítulo 7, "CONCLUSÕES", apresenta as vantagens e desvantagens do ponto de vista técnico e econômico da utilização da iluminação LED em substituição as lâmpadas fluorescentes para o navio de pequeno porte da Marinha do Brasil. Nesse capítulo também é possível encontrar as contribuições efetivamente alcançadas e apresentação de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse tópico será visto como ocorreu o surgimento das lâmpadas elétricas aplicadas a navios assim como a evolução das tecnologias das lâmpadas até o conceito dos LEDs. Também será apresentado como começou a aplicação do LED em navios militares.

2.1 SURGIMENTO DAS LÂMPADAS ELÉTRICAS EM NAVIOS

A história das lâmpadas elétricas se cruza com aplicações na área naval, pois ambas foram concebidas pelo inventor e empresário Thomas Edison. Em 21 de outubro de 1879, Thomas Edison obteve sucesso em sua primeira lâmpada, a qual consistiu em um fio de algodão carbonizado como um filamento (Figura 1), instalado em um bulbo de vidro, com todo o ar evacuado. Seu protótipo teve uma duração de 45 horas. No dia seguinte, Edison experimentou o papelão como filamento. O papelão como filamento foi mais bem sucedido, e com isso Edison pode demonstrar em 31 de dezembro de 1879, em *Menlo Park, New Jersey* a primeira aplicação de suas lâmpadas publicamente nas ruas. A vida média dessas lâmpadas foi bem superior a primeira, cerca de 100 horas [17].



Figura 1 - Lâmpada de filamento de carbono [18].

No ano seguinte, Edison continuou com seus experimentos e, apesar do mesmo não ter inventado a lâmpada elétrica, foi através dele que a teoria foi transformada em uma forma viável para aplicação, além de ele ser um dos primeiros a comercializar com sucesso as lâmpadas incandescentes [17].

Foi em 1881, dois anos após a primeira lâmpada incandescente deixar a oficina de Edison, que as mesmas puderam ser aplicadas na área naval. O primeiro navio a possuir essa tecnologia foi o SS Columbia [17].

O SS Columbia foi lançado no estaleiro de Chester, na Pensilvânia, em 24 de fevereiro de 1880, e navegou até Nova York para que pudesse ser equipado com o sistema de iluminação incandescente, além de embarcar carga e passageiro para sua viagem inaugural até Portland, Oregon [17].

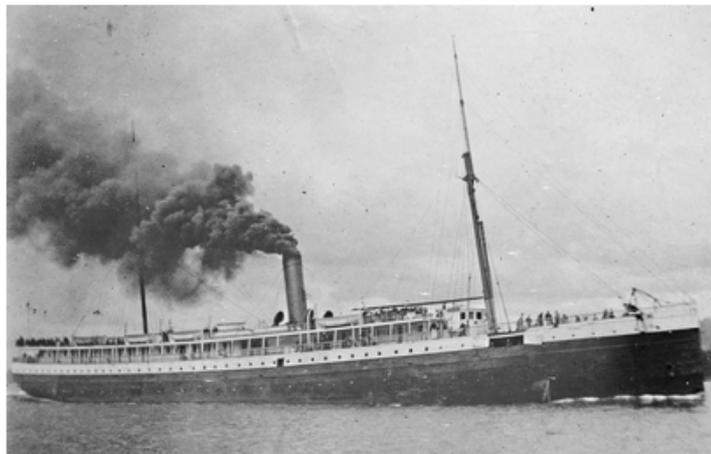


Figura 2 – Navio SS Columbia [17].

Seu sistema de iluminação consistiu em quatro dínamos e um total de 120 lâmpadas incandescentes em vários circuitos. Três dínamos forneceram energia aos circuitos de iluminação incandescentes, enquanto o quarto dínamo foi operado a baixa tensão e usado como excitador para os ímãs de campo dos três dínamos produtores de energia. Os dínamos foram acionados por correia usando energia a vapor dos dois motores do navio. Uma forma utilizada para regular o sistema, já que não havia instrumentos na época para essa finalidade, era verificar o brilho das lâmpadas na praça de máquinas [17].

A fiação do navio era toda isolada com tecido e algodão e depois mergulhada em parafina derretida para proporcionar um grau de impermeabilização. Para os fios em contato com o metal, foi usado um tubo de borracha como meio isolante adicional. A grande maioria dos condutores foi montada na superfície usando grampos, e os fios de pólos positivos e negativos foram pintados com cores diferentes a fim de identificar os mesmos. A eletricidade foi entregue em todo navio por sete circuitos principais e muitas linhas de ramais. Cada

segmento do sistema de distribuição era protegido por fusíveis, consistindo de um pedaço de fio de chumbo em um tubo de vidro montado sobre uma base de madeira [17].

Os soquetes tinham base de madeira e duas tiras de metal que se conectavam aos condutores de distribuição. Devido a esse arranjo, a maioria dos bulbos se encontrava na vertical sendo poucos montados em posição invertida em dispositivos elétricos especialmente projetados. Em caso de falha do sistema de iluminação, lâmpadas a óleo tradicionais foram colocadas a bordo [17].

Os interruptores que controlavam as luzes das cabines dos passageiros estavam localizados em caixas de jacarandá, trancadas do lado de fora das mesmas. Caso algum passageiro necessitasse acioná-las teriam que chamar alguém da tripulação para que as caixas fossem abertas e assim ter acesso ao interruptor [17].

2.2 EVOLUÇÃO DAS LÂMPADAS

Tudo começou com a descoberta do fogo, onde o ser humano pode perceber o quanto a luz poderia auxiliá-lo no desenvolvimento de suas tarefas diárias. Após o homem perceber que poderia promover o fogo sem que houvesse a intervenção da natureza, viu-se a possibilidade de cozimento das carnes nas fogueiras, e conseqüentemente, a gordura vegetal como combustível para alimentar o fogo. Com o armazenamento da gordura em recipientes como pedras, chifres e conchas surge o conceito das lucernas, primeiro tipo de luminárias utilizadas durante milênios (Figura 3) [19].



Figura 3 – Lucernas de Cerâmica [19].

Após milênios, Aime Argand, em 1783, desenvolveu a primeira lâmpada, conhecida como lâmpada de Argand (Figura 4), ela era composta por um pavio inserido no interior de uma chaminé de vidro, por onde passava uma corrente de ar ascendente que auxiliava a combustão, produzindo uma chama estável, de forte intensidade e sem fumaça [19].

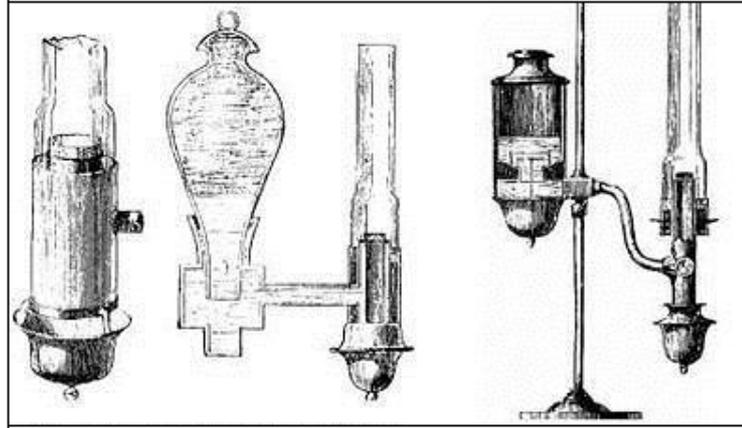


Figura 4 – Lâmpada de Argand [19].

Depois de Argand, Eillian Murdoch descobriu em 1792 que o gás obtido pela destilação do carvão fóssil poderia alimentar o fogo dentro de uma chaminé de vidro. Porém sua invenção tinha vários problemas, tais como, preço, cheiro desagradável e muita fuligem, necessitando constantes manutenções [19].

Cerca de quatro anos depois da lâmpada de Argand, em 1802, o químico inglês Humphrey Davy percebeu que filamentos de carbono postos separadamente entre dois pólos de uma bateria, criavam um arco de luz que futuramente se tornaram uma base para o funcionamento das lâmpadas. Posteriormente, observou-se que filamentos de platina e outros metais, quando submetido à eletricidade, se aqueciam até incandescer e emitir luz [19].

Em 1820, Warren de La Rue colocou o filamento de platina dentro de uma ampola de vidro, e com a quase ausência de ar, junto com a alta resistência da platina ao calor, foi possível que alcançasse altas temperaturas sem que as queimassem imediatamente. No entanto devido ao elevado preço das platinas o projeto foi inviabilizado, fazendo com que diversos outros filamentos fossem testados em substituição a platina [19].

No ano de 1876, o russo Paul Jablochkoff colocou os filamentos de carbono unidos, para que a luz se concentrasse na parte superior, e a nomeou de vela elétrica. E em 1879, Thomas Edison refinou a idéia de Paul Jablochkoff e reduziu a espessura do filamento de carbono, utilizando materiais de baixo custo como um pedaço de fio de algodão impregnada de carvão, fazendo assim com que a mesma ficasse acesa por aproximadamente 45 horas. Devido ao desprendimento das partículas do carvão causar o escurecimento do vidro, Thomas Edison testou outro tipo de filamento feito com bambu, com isso seus resultados foram ainda

melhores, tanto pelo rendimento quanto pela durabilidade, mantendo-as acessas por 600 horas [19].

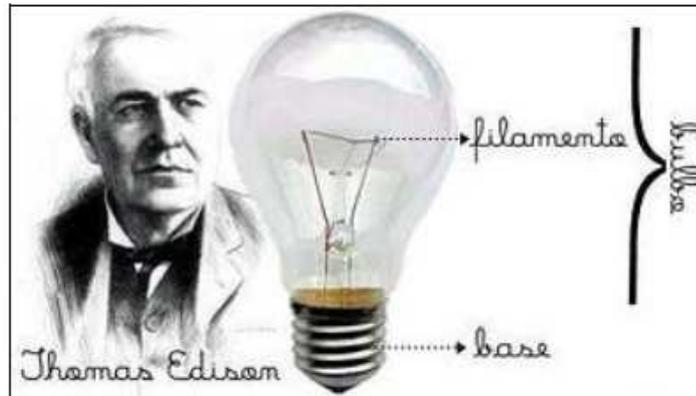


Figura 5–Lâmpada elétrica de Thomas Edison [19].

Foram testados então diversos tipos de filamentos a fim de aprimorar o já existente. Gases inertes foram adicionados dentro dos bulbos de vidros para que aumentassem a vida dos filamentos. Começaram a surgir às chamadas lâmpadas de vapores, e foi em 1901 que Peter Cooper Hewitt descobriu a lâmpada de vapor de mercúrio, evoluindo na década de 30 para lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão e na década de 60 para vapor metálico e vapor de sódio [19].

Em 1909, surgiu um novo tipo de filamento, o tungstênio, que foi utilizado durante toda a fabricação das lâmpadas incandescentes [19].

As lâmpadas halôgenas surgiram logo depois, em 1958, quando para evitar a queima dos filamentos, retirou-se todo o ar da lâmpada enchendo-as com uma mistura de gases inertes e halogênio. Isso permitiu que estas lâmpadas fossem menores e produzissem uma luz mais intensa, além de ter uma maior durabilidade [19].

Em 1938 surgiu um novo conceito de lâmpadas, criadas por Nikola Tesla, as lâmpadas fluorescentes revolucionariam o conceito de lâmpadas eficientes. Essas lâmpadas não possuiriam filamentos para produzir a luz, seu processo seria diferente, pois contariam com partículas de mercúrio que quando energizadas se chocam com os elétrons conduzidos pela energia produzindo assim a luz [19]. Essa luz é intensificada revestindo o tubo de vidro com um material a base de fósforo, que em contato com a radiação produzida pelo mercúrio, produz luz visível, conforme podemos ver na Figura 6.

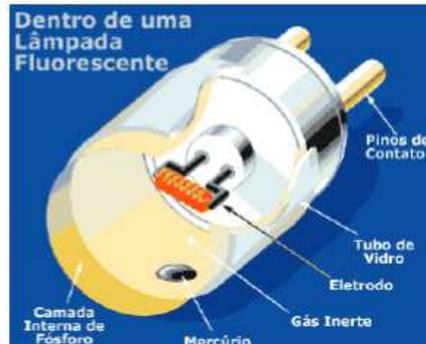


Figura 6 – Lâmpada Fluorescente [19].

Em 1961, dois pesquisadores da *Texas Instruments*, Robert Biard e Gary Pittman revolucionaram o futuro da iluminação descobrindo que o GAAS (Arsenietode Galio), quando percorrido por uma corrente elétrica, emitia uma radiação infravermelha, invisível ao olho nu. Mas foi o cientista Nick Holonyak Jr. da *General Eletric* que obteve uma luz visível vermelha a partir de um LED. Depois de várias pesquisas, em 1971 surge o LED azul, ainda com intensidade luminosa muito baixa. Somente em 1993 que os LEDs alcançaram o setor de iluminação, que ocorreu a descoberta da luz branca, por parte do japonês Shuji Nakamura, proporcionando iluminação ambiente com economia de energia, além de durabilidade e com pouco dano ao meio ambiente [19].

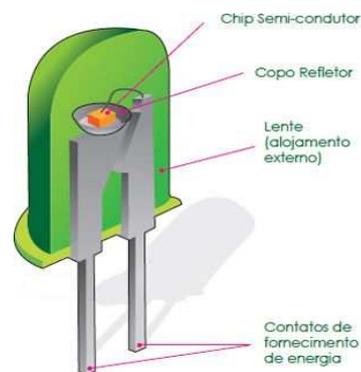


Figura 7 – Lâmpada LED [20].

Os diodos emissores de luz (LEDs) são dispositivos semicondutores que convertem a eletricidade em fótons de luz de frequências variáveis, incluindo o espectro visível. Como a luz é gerada a partir de uma peça sólida de material semicondutor (em oposição a um tubo de vácuo ou gás em lâmpadas incandescentes e fluorescentes tradicionais), a iluminação LED também é chamada de “iluminação de estado sólido” [21].

Devido aos LEDs emitirem luz em uma faixa estreita de comprimentos de onda, a luz que eles produzem não é inerentemente branca (ao contrário da gerada por fontes tradicionais) [21]. A cor da luz LED depende do tipo de material semicondutor usado. No início, a luz LED branca só era possível agrupando os LEDs vermelho, azul e verde (*Red-Blue and Green - RGB*) e controlando a corrente para produzir uma luz branca geral. Em 1993, a *Nichia Corporation* no Japão criou um chip LED azul de índio-gálio com um revestimento de fósforo que mudava de comprimento de onda, permitindo que a luz branca fosse emitida a partir de um único diodo. A descoberta do *chip* LED branco da *Nichia Corporation* iniciou o desenvolvimento contínuo de inúmeras empresas para produzir um produto LED com luz branca de alta qualidade adequada para iluminação geral [21].

2.3 APLICAÇÃO DAS LÂMPADAS LED EM NAVIOS

Os avanços contínuos na tecnologia geral baseada em LED intensificaram o interesse da Marinha Americana em aplicações de bordo, embora essa tecnologia exista em aplicações no setor de iluminação desde 1993, foi em 2002 que a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (*Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA*) iniciou o programa de Iluminação Distribuída de Alta Eficiência (*High Efficiency Distributed Lighting - HEDlight*) [14]. Esse projeto tem o objetivo de aumentar a capacidade de sobrevivência, capacidade de implantação e manutenção de sistemas de iluminação a bordo de um navio [14]. O conceito exigia a iluminação de fontes remotas com uma fonte central de geração de luz acoplada a um sistema de distribuição de fibra ótica para “canalizar” a luz para vários compartimentos de navios. A iluminação LED foi estudada como uma fonte de geração de luz e testes no mar foram conduzidos a bordo de um destróier da Marinha dos EUA [22]. Embora o conceito de fonte remota provavelmente não seja adotado pela Marinha, esforços como o programa *HEDlight* e outras instalações de teste provaram a confiabilidade e a eficácia da instalação de iluminação por LED a bordo dos navios. O comando da Marinha Americana *Naval Sea Systems Command* (NAVSEA) considera a tecnologia LED madura e uma excelente candidata para a transição para toda a frota [23].

Embora a tecnologia LED exista em aplicações no setor de iluminação desde a década de 90 [19], estudos para a aplicação em navios militares começaram há aproximadamente uma década depois, quando a Marinha dos Estados Unidos da América começou a pesquisar a utilização da tecnologia em sua frota [12]. No entanto a adoção da tecnologia não foi muito

aceita pelas autoridades navais, pois até 2015, 90% da frota ainda possuía iluminação incandescentes e fluorescentes [12].

A primeira justificativa utilizada pela Marinha Americana para a substituição da tecnologia de iluminação foi que a iluminação LED é mais eficiente que as tecnologias anteriores, logo a mesma apoia a iniciativa de “Grande Frota Verde”, que é uma iniciativa da Marinha dos Estados Unidos em tornar sua frota mais eficiente. O LED pode ser considerado um “ganho rápido” quando o assunto é custo benefício [12].

Porém somente essa justificativa não é suficiente para que haja a troca das lâmpadas, tendo em vista que é preciso entender que a simples troca de uma lâmpada em um navio não pode ser comparada com a troca de uma lâmpada em uma casa, por exemplo. Com isso a Marinha começou estudos mais aprofundados sobre o assunto e examinou, em primeiro lugar, quanto tempo, em média, demoraria a substituir as lâmpadas individuais.

Para isso mediu-se o tempo da substituição das lâmpadas T12 no porta aviões USS George Washington. A média foi de 86 minutos cada para duas pessoas, totalizando 2,84 horas por lâmpada. Um especialista da NAVSEA utilizou uma média de 4 horas para mudar uma lâmpada individual e com a tecnologia LED esse tempo é reduzido para 2 horas, de uma forma conservadora [15].

Nicholas Dew et. al. [12], pontuou diversas considerações para a substituição das lâmpadas, o primeiro ponto considerado foi o espaço destinado nos navios para armazenamento das lâmpadas sobressalentes. Uma peculiaridade considerada nos projetos de embarcações militares é o espaço, pois cada espaço útil deve ser utilizado para fins de combate. Como as lâmpadas fluorescentes e incandescentes são substituídas com mais frequência, as mesmas necessitam de um maior espaço de armazenamento e, além disso, as lâmpadas fluorescentes tubulares são tratadas como resíduo de material perigoso (*hazardous material – HAZMAT*), devido à quantidade de mercúrio que se encontra em seu interior. Com isso, essas lâmpadas necessitam de mais espaço de armazenamento tendo em vista a necessidade de tratamento do material antes de seu descarte no meio ambiente. As lâmpadas LED aliviam substancialmente esses problemas porque estes dispositivos não são considerados *HAZMAT* e sua longa vida significa que são necessárias poucas peças de reposição.

O segundo ponto considerado é que os LEDs possuem uma vantagem sobre os sistemas de iluminação fluorescentes em algumas aplicações, como por exemplo, operações que requerem uma assinatura de baixo ruído, item muito importante em navios de guerra, em especial nos submarinos, que necessitam de operações sigilosas para que não sejam vistos pelos inimigos. Nessa aplicação, a iluminação LED eliminaria o som audível das lâmpadas fluorescentes, proporcionando assim uma vantagem [12].

Porém a principal justificativa para a mudança da tecnologia é a eficiência energética, esse assunto é abordado por diversas fontes. O secretário da Marinha dos EUA, afirmou que a iluminação LED reduz o uso geral de energia em um navio da Marinha em 2-3% [24]. O maior fornecedor da iluminação LED dos EUA, *Energy Focus*, afirma que o custo com eletricidade e manutenção reduziu em 80% quando comparados com as lâmpadas fluorescentes, economizando assim cerca de 30.600 galões de combustível e mais de 365 toneladas de emissões de CO₂ anualmente [25].

O serviço de pesquisa não classificada do Congresso dos EUA, realizada pelo Instituto Rocky Mountain (*Rocky Mountain Institute - RMI*) sobre o potencial de eficiência energética a bordo do cruzador de mísseis guiados USS Princeton CG-59, informou que a iluminação LED estava entre um pacote de tecnologia rápida com um período de retorno de investimento de menos de dois anos [4]. Este ponto fortaleceu a justificativa de eficiência da tecnologia LED que se baseia do *trade-off* entre o custo de implementação e a economia obtida na sua utilização.

A economia de combustíveis referente à eficiência energética gerada com a troca de tecnologia da iluminação foi analisada por diversas teses na **Escola de Pós-Graduação da Nação dos Estados Unidos da América**, incluindo Cizek [14], Bowerset et. al. [26], e Brooks e Tribble [7].

Nos Estados Unidos, a NAVSEA realizou uma avaliação abrangente na qual aprovou a iluminação LED para todos os navios construídos a partir de 2014, e deixou a decisão da substituição das lâmpadas de navios existentes para seus respectivos comandantes, que deverão avaliar de acordo com o valor inicial e o tempo de operação do navio se fará tal substituição [12].

Tendo em vista a importância em se entender que a substituição das lâmpadas na Marinha são muito mais críticas que em qualquer outro lugar, poucos estudos são encontrados

referentes a essa substituição em outras Marinhas do mundo. Na Marinha Americana, por exemplo, existem apenas dois fornecedores qualificados de lâmpadas LED T12, devido às altas exigências existentes para tal lâmpada em aplicação militar naval [12]. Na Marinha do Brasil tem-se grande interesse da área operativa em aplicar esse tipo de tecnologia nos meios, porém seus estudos ainda estão embrionários perante a Marinha dos EUA.

Este capítulo abordou a primeira aplicação das lâmpadas elétricas em navios, assim como evolução das tecnologias das lâmpadas desde a descoberta do fogo até os dias mais atuais com a aplicação das lâmpadas LED. Foi visto também como surgiu o interesse na aplicação dos LEDs em navios militares, com estudos realizados pela Marinha Americana para aplicações em diversas classes de navios de sua frota.

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de comparar e validar o desempenho das tecnologias de lâmpadas LEDs e fluorescentes, para aplicação no sistema de iluminação principal da embarcação estudada, será realizado testes elétricos e mecânico em laboratório com luminárias de cada tecnologia de fabricação nacional. Além da avaliação de qualidade de energia elétrica através do *software* ATP. Esta abordagem metodológica esta descrita neste capítulo.

3.1 TESTES ELÉTRICOS

Os parâmetros elétricos utilizados na comparação das tecnologias serão medidos através dos seguintes testes no laboratório da Universidade Federal Fluminense (UFF), LABLUX, que possui a acreditação do INMETRO para realização dos ensaios de conformidade:

- Curva IES;
- Fluxo Luminoso (lm);
- Eficiência Luminosa (lm/W);
- Temperatura de Cor (K);
- Índice de Reprodução de Cor;
- Fator de Potência Nominal;
- Distorção Harmônica;
- Análise de Interferência Eletromagnética;

Para a realização dos testes elétricos em laboratório, foram montadas luminárias adequadas para uso naval com as lâmpadas de cada tecnologia a serem comparadas. O primeiro teste foi realizado em uma luminária equipada com duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 20W cada, e a segunda com duas lâmpadas Tuboled de 10W cada. Todos os testes foram realizados de acordo com as portarias do INMETRO recomendadas para avaliação de equipamentos de luminotécnica [27-29]. A tensão de alimentação utilizada na realização dos testes foi de 127V, compatível com a tensão do circuito de alimentação do

sistema de iluminação da embarcação. Os seguintes equipamentos foram utilizados para a realização dos testes fotométricos, obtenção do espectro radiométrico e parâmetros elétricos:

- GO2000 – *Goniophotometer*: dispositivo utilizado para medir a luz emitida pelas luminárias testadas em diferentes ângulos (Figura 8). Esse equipamento é responsável por rotacionar as luminárias verticalmente e horizontalmente criando uma esfera imaginária em torno do centro geométrico. Para que esse ensaio seja realizado o equipamento fica localizado em uma câmara escura e em conjunto com um sensor vai capturando as informações da luminária de forma a gerar suas curvas fotométricas;



Figura 8 – Goniofotômetro GO2000 [30].

- HAAS-2000: aparelho utilizado para testar o fluxo luminoso, eficácia luminosa, coordenada de cromaticidade, temperatura de cor correlacionada, índice de renderização de cor, distorção harmônica dentre outros parâmetros (Figura 9);

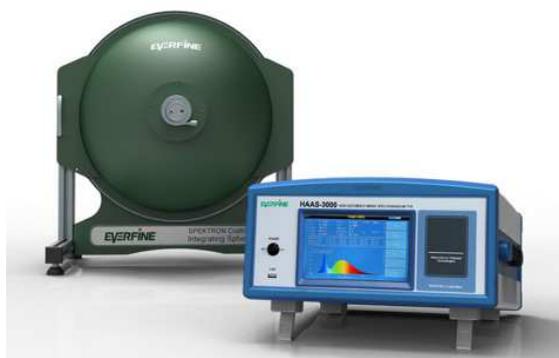


Figura 9 – HAAS-2000 [31].

- Fonte de Tensão *Pacific*: equipamento utilizado para alimentar as luminárias (Figura 10);



Figura 10 - Fonte de Tensão Pacific [32].

- Watímetro Yokogawa WT-230: equipamento utilizado para realizar as medidas elétricas das luminárias testadas (Figura 11).



Figura 11 – Watímetro Yokogawa WT-230 [33].

Além dos testes elétricos que visam medir os parâmetros fotométricos das luminárias, também foram realizados ensaios de interferência eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility* - EMC) com a finalidade de verificar as emissões conduzidas e radiadas pelas luminárias LEDs e fluorescentes, a fim de verificar se as mesmas encontram-se dentro dos limites impostos pelas normas CISPR-15 [34] e MIL-STD 461G [35]. Os seguintes equipamentos foram utilizados para a realização dos testes de compatibilidade eletromagnética:

- Pré-seletor – dispositivo responsável em garantir que a medição do ruído proveniente de uma determinada faixa de frequência, não seja afetada por ruídos de outras frequências. Esse equipamento é um filtro passa-banda que tem a capacidade de bloquear sinais fora da frequência de sintonia tornando

assim as medições mais precisas. O modelo utilizado nos testes foi RF915B (Figura 12);



Figura 12 - Pré-seletor RF915B [36].

- *Line Impedance Stabilization Network (LISN)* – Equipamento responsável por fornecer uma impedância constante aos terminais do equipamento ensaiado em todas as frequências durante a realização do ensaio, esse equipamento também é responsável por isolar o circuito em teste de radiofrequências indesejadas provenientes da rede, além de acoplar a tensão de perturbação ao equipamento de medição [37]. O modelo utilizado foi LISN-A-16A1P (Figura 13);



Figura 13 - LISN-A-16A1P [36].

- *Analizador de Espectro* – Aparelho responsável pela medição de sinais de rádiofrequência. Assim como o osciloscópio fornece um indicador no domínio do tempo, o analisador de espectro fornece um indicador no domínio da frequência. O modelo utilizado foi S46M3 (Figura 14);



Figura 14 – Analisador de Espectro S46M3 [36].

- Antena *Loop* – Equipamento responsável por medir o campo magnético gerado pelas luminárias. Essa antena é formada por três loops circulares de 2 metros de diâmetro cada, de forma a medir a emissividade determinada pela corrente induzida pelo campo magnético gerado pelo equipamento em ensaio que é colocado no centro do loop. O modelo utilizado é o RF300 (Figura 15);



Figura 15 – Antena *Loop* RF300 [36].

- Computador – Utilizado no controle e obtenção de todos os dados medidos utilizando o software EMC Engineer v4.10.

Todos os equipamentos utilizados nesse ensaio são do fabricante Laplace Instruments Ltd.

Nesse contexto serão medidos os parâmetros apresentados nos próximos itens.

3.1.1 CURVA IES (*ILLUMINATION ENGINEERING SOCIETY* OU *SOCIEDADE DE ENGENHARIA DE ILUMINAÇÃO*)

Essa curva é obtida através do ensaio elétrico realizado através do equipamento goniofotometro. Com essa curva pode-se verificar o comportamento de uma determinada luminária em um ambiente virtual da mesma forma que ela se comportará em um ambiente físico real.

A partir do arquivo ies fornecido através da medição em laboratório, é possível simular em *softwares* utilizados para realização de estudos luminotécnicos, como o DIALUX, o comportamento da luminária fluorescente e LED estudadas e com isso verificar seu comportamento em todas as áreas do navio analisado, podendo assim, comparar as tecnologias sem a necessidade da instalação a bordo.

3.1.2 FLUXO LUMINOSO

O fluxo luminoso representa a potência luminosa emitida ou observada (Figura 16), ou ainda, representa a energia emitida ou refletida, por segundo em todas as direções, sob a forma de luz [38]. Sua unidade de medida é o lúmen (lm).

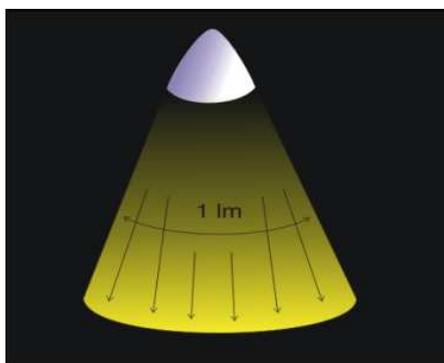


Figura 16 – Fluxo luminoso de um lúmen emitido pela fonte luminosa [39].

3.1.3 EFICIÊNCIA LUMINOSA

É a relação entre o fluxo luminoso emitido em lúmens e a energia elétrica consumida por unidade de tempo em Watts de uma determinada fonte de luz. Quanto maior a eficiência luminosa de uma lâmpada ou equipamento, menor será o seu consumo de energia [38]. Sua unidade é o lúmens/Watt (lm/W).

3.1.4 TEMPERATURA DE COR

Expressa a aparência da cor da luz emitida pela fonte de luz. Sua medida é Kelvin (K). Quanto mais alta a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade de cor da luz, ou seja, quanto mais quente ou fria, não significa temperatura física da lâmpada e sim a tonalidade de cor que ela apresenta ao ambiente [38].

As temperaturas de cores típicas estão apresentadas na Figura 17, nela podemos ver a temperatura de cor desde uma vela até os raios solares, passando pelas lâmpadas incandescentes, halógenas e fluorescentes.

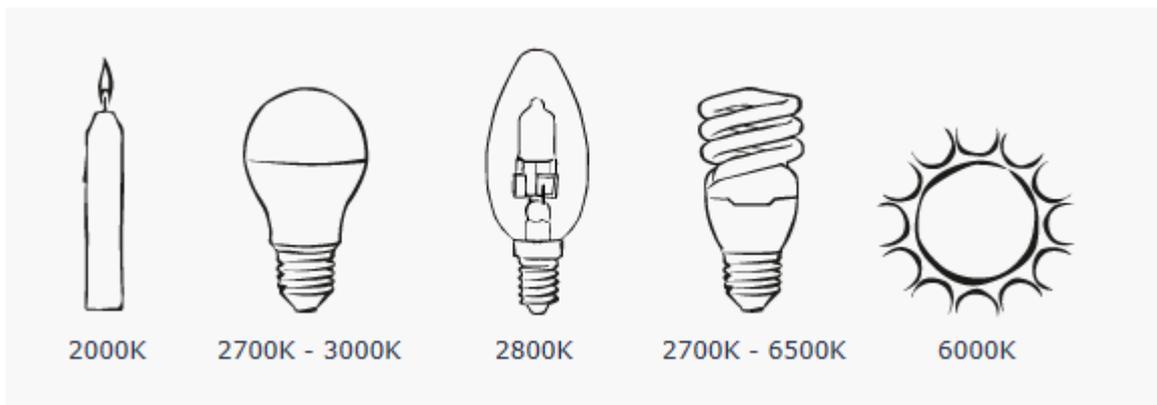


Figura 17 – Temperaturas de cor típicas [40].

3.1.5 ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE COR - IRC

Representa a capacidade de reprodução da cor de um objeto diante de uma fonte de luz. O IRC faz uma correspondência entre a cor real de um objeto e a cor percebida diante da fonte de luz. O IRC varia de 0 a 100% e depende da fonte luminosa e do ambiente a que se destina. Quanto mais alto o IRC, melhor é a fidelidade das cores. A Figura 18 mostra a reprodução de cores e seus respectivos índices [38].

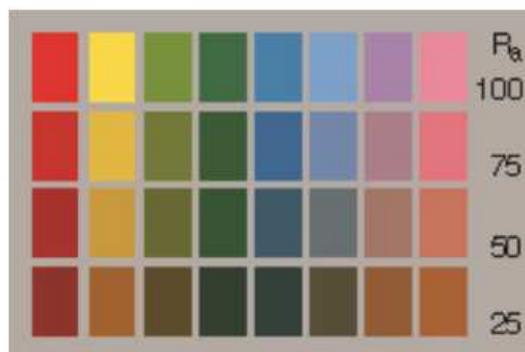


Figura 18 – Reprodução de cores e seus índices [38].

3.1.6 POTÊNCIA NOMINAL

A potência elétrica nominal é a quantidade de energia convertida que pode ser realizado em certo período de tempo, ou seja, é o trabalho pelo tempo. Normalmente a potência elétrica das lâmpadas é dada em Watts (W).

3.1.7 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência nada mais é que a relação entre a potência ativa (W) e a potência total (VA), ou seja, essa relação representa o quanto de energia é entregue e o quanto desta energia entregue é realmente transformada em trabalho.

3.1.8 DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (DHT OU *TOTAL HARMONIC DISTORTION* - THD)

O termo “distorção” pode ser aplicado em muitas áreas da engenharia elétrica. Quando o assunto é qualidade de energia, a “distorção” significa a deformidade da forma de onda da tensão ou corrente alternada senoidal. Quando essas duas grandezas são distorcidas, perdem a sua conformidade senoidal [41].

A distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares existentes no sistema de potência. Um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada, ou seja, enquanto a tensão aplicada é perfeitamente senoidal, a corrente resultante é distorcida. E devido a estas cargas não lineares que ocorrem à maioria das distorções harmônicas em um sistema de energia [42].

Segundo Moya [43], o fenômeno da distorção de sinais, seja de tensão ou de corrente, devido às componentes harmônicas é um inconveniente, tanto para os fornecedores de energia quanto para os consumidores.

De acordo com Ruth Leão et. al [41] os indicadores de harmônicos são definidos como propósito de mensurar a conformidade senoidal da tensão e corrente e o desempenho da instalação.

O parâmetro utilizado para quantificar a distorção harmônica de um determinado sistema é o THD (*Total Harmonic Distortion*) ou distorção harmônica total, e o seu monitoramento é uma questão relevante para que haja à preservação da qualidade de um sistema elétrico [16].

Por se tratar de cargas não lineares, devido aos *drivers* que estão associados tanto às lâmpadas fluorescentes quanto as lâmpadas de LED, a análise de distorção harmônica é um ponto importante para verificar se a rede de distribuição do navio será afetada no quesito qualidade de energia elétrica [10], requisito importante em sistemas isolados.

Em sistemas elétricos gerais, a distorção de tensão harmônica total não deve exceder 5%, medida em qualquer ponto de acoplamento comum, com qualquer distorção de tensão harmônica individual que não exceda 3% do valor da tensão fundamental [44].

3.1.9 ANÁLISE DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

Com a crescente aplicação da eletrônica de potência em diversas áreas das indústrias, que inclui a indústria militar naval, preocupações referentes à qualidade de energia elétrica tem se tornado constante. Uma das maneiras de impactar diretamente a qualidade de energia elétrica é a interferência eletromagnética que determinado equipamento pode gerar em uma rede no qual ele se encontra conectado. Essa interferência pode impedir que determinados aparelhos operem em condições normais, causando um mau funcionamento, e se tratando de navio militar, esse parâmetro se torna muito importante, pois em grandes operações o mau funcionamento, ou até mesmo a falha de um determinado equipamento pode causar um prejuízo muitas vezes irreparável.

Além da interferência nos demais equipamentos de bordo, a interferência eletromagnética pode tornar o navio facilmente detectável pelo inimigo em operações. Muitas dessas interferências são captadas pelos radares dos inimigos tornando um alvo fácil em casos de guerra. Com isso a análise da interferência eletromagnética gerada pelas luminárias também é um fator muito importante a ser verificado, tanto do ponto de vista de eficiência energética, quanto no ponto de vista de operações militares.

Diversas normas são utilizadas para fazer o controle das interferências geradas pelos equipamentos em um navio militar, são elas MIL-STD-461G [35], MIL-STD-462D [45] e MIL-STD463A [46], essas normas são utilizadas pela Marinha Americana e fazem referências as normas internacionais tais como IEC 60533 [47] e IEC 61000 [48].

O teste de EMC faz parte dos ensaios de segurança utilizados para a certificação das lâmpadas de LED, e esses ensaios são realizados segundo a norma ABNT NBR IEC/CISPR-15 [34] que é uma norma internacional que trata dos limites e métodos de medição das rádios

perturbações característica dos equipamentos elétricos de iluminação e similares. Essa norma se aplica para emissões radiadas e conduzidas de distúrbios de radiofrequência provenientes desses equipamentos. A faixa de frequência abrangida pela norma vai de 9kHz a 400GHz [34].

A norma CISPR-15 [34] estabelece que primeiro deve-se utilizar um aparelho para detectar os valores de pico, nas faixas de frequência de 9kHz até 30MHz , para encontrar os maiores valores de perturbações e, em seguida, utilizando as frequências correspondentes dos pontos selecionados, utilizar o equipamento para detectar os valores de quase pico para ser comparada com os limites exigidos na norma.

De acordo com Clayton Paul [37], o detector de pico mostrado no circuito da Figura 19, mede apenas valor máximo. Seu circuito é representado por um retificador seguido de um filtro passa-baixa, que extrai apenas o sinal de maior amplitude, com isso sua análise se torna rápida.

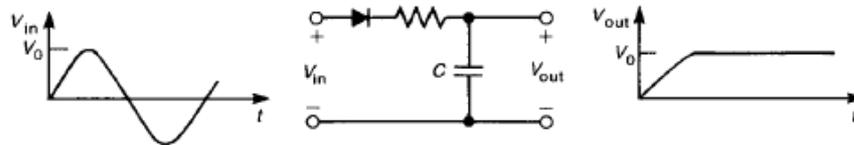


Figura 19 – Detector de pico [37].

Já o detector de quase pico, ainda de acordo com Clayton Paul [37], é utilizado para sinais com alta repetição. Seu circuito apresentado na Figura 20 funciona da seguinte forma: o capacitor começa a carregar até o primeiro pico, depois irá descarregar através do resistor R , logo se esses picos ocorrerem mais rápidos do que a constante de tempo RC , o capacitor não irá descarregar completamente antes do próximo pico. Assim seu sinal irá crescer continuamente até certo limite.

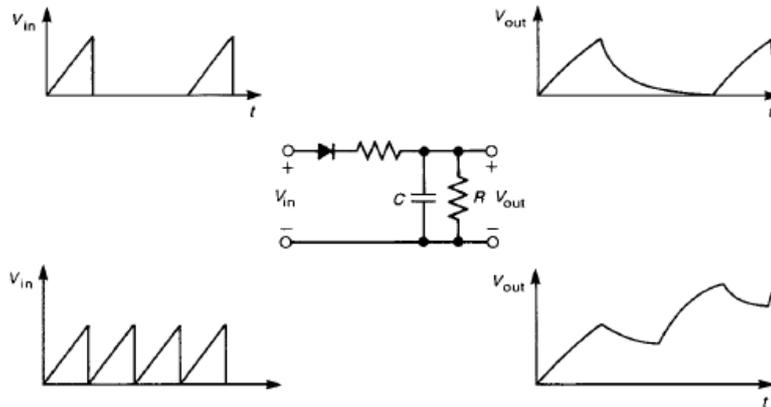


Figura 20 – Detector de quase-pico [37].

O tempo nesse processo é cerca de quatro vezes maior que na detecção de pico. Por esse motivo a norma exige apenas essa medição para os maiores valores encontrados durante a medição de pico, pois caso contrário os testes seriam muito demorados.

A norma [34] define três ensaios para a avaliação da compatibilidade eletromagnética:

a) Tensões de perturbação em terminais de alimentação:

É um ensaio de emissividade conduzida, no qual se mede a tensão de perturbação nos terminais de alimentação das luminárias em uma faixa de frequência de 9 kHz a 30 MHz. Para configuração deste ensaio foram utilizados seguintes equipamentos: LISN, pré-seletor, o analisador de espectro e um computador, estes equipamentos podem ser vistos na Figura 21.



Figura 21 – Configuração dos equipamentos utilizados durante a medição das tensões de perturbação nos terminais de alimentação das luminárias.

Na Tabela 1 são apresentados os limites exigidos pela CISPR-15 [34] para as tensões de perturbação nos terminais de alimentação.

Tabela 1 – Limites das Tensões de Perturbação nos Terminais de Alimentação

Faixa de frequência	Limites (dB μ V)*	
	Quase Pico	Média
9 kHz a 50 kHz	110	-
50 kHz a 150 kHz	90 a 80 **	-
150 kHz a 0,50 MHz	66 a 56 **	56 a 46 **
0,5 MHz a 5 MHz	56	46
5 MHz a 30 MHz	60	50

***Na frequência de transição, o limite inferior se aplica.**

****O limite decresce linearmente com o logaritmo da frequência.**

Fonte: Adaptada de IEC CISPR-15, 2013 [34]

b) Perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo Magnético)

Este ensaio mede a emissividade radiada na faixa de frequência de 9 kHz até 30 MHz através de uma antena *loop* de dois metros de diâmetro. A emissividade é determinada baseada pela corrente induzida pelo campo magnético gerado pelo campo magnético das luminárias colocadas no centro da antena *Loop*.

Esta antena possui três *loops* circulares com dois metros de diâmetro cada e estão mutualmente perpendiculares apoiadas em uma base não metálica. Logo a emissividade pode ser medida em três direções, nos eixos x, y e z. Para configuração deste ensaio foi utilizado seguintes equipamentos: a antena *loop* de 2 metros de diâmetro, o analisador de espectro e um computador.

Os valores medidos devem estar dentro dos limites exigidos pela CISPR-15 [34] conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de Perturbação Radiada nas Frequências de 9 kHz a 30 MHz

Faixa de frequência	Limites para antena loop de 2m de diâmetro (dB μ A)*
9 kHz a 50 kHz	88
70 kHz a 150 kHz	88 a 58 **
150 kHz a 3 MHz	58 a 22 **
3 MHz a 30 MHz	22
<p>*Na frequência de transição, o limite inferior se aplica.</p> <p>**O limite decresce linearmente com o logaritmo da frequência.</p>	

Fonte: Adaptada de IEC CISPR-15, 2013 [34]

c) Perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo elétrico)

Neste ensaio é utilizado o método independente para uma perturbação eletromagnética radiada na faixa de 30 MHz a 300 MHz [34]. Para a configuração deste ensaio é utilizado o *Coupling/Decoupling Network* (CDN), o analisador de espectro, o filtro passa alta conectado ao atenuador e um computador, conforme apresentado na Figura 22.



Figura 22 – Configuração dos equipamentos utilizados durante a medição de perturbações radiadas (campo elétrico) das luminárias.

O CDN é o equipamento utilizado para realizar o acoplamento e o desacoplamento dos circuitos. É no circuito de acoplamento que transfere a energia de um circuito para o outro com uma impedância previamente definida. Já o circuito de desacoplamento é responsável por prevenir que os sinais de teste aplicados nas luminárias afetem outros dispositivos que não estão no ensaio. Na Figura 23 pode ser visto de maneira isolada esse equipamento.



Figura 23 – Equipamento CDN utilizado durante o ensaio de perturbação radiada (campo elétrico).

A Tabela 3 expõe os limites exigidos pela CISPR-15 [34] para este ensaio.

Tabela 3 – Limites de Tensão nos Terminais em Modo Comum, Método CDN.

Faixa de frequência (MHz)	Limites de quase pico (dBμV)*
30 a 100	64 a 54 **
100 a 230	54
230 a 300	61
*Na frequência de transição, o limite inferior se aplica.	
**O limite decresce linearmente com o logaritmo da frequência.	

Fonte: Adaptada de IEC CISPR-15, 2013 [34]

3.2 TESTE MECÂNICO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

Além dos testes elétricos, também foi realizado teste mecânico nas luminárias a fim de verificar se as mesmas suportam limites de vibração impostos pelo ambiente militar naval.

O teste mecânico de vibração ambiental fornece requisitos complementares para a sobrevivência do equipamento a bordo. O teste de vibração ambiental (Tipo1) deve ser utilizado para equipamentos submetidos ao ambiente de vibração encontrado em navios da Marinha com propulsão de hélice convencional. Serão utilizados os parâmetros contidos na Tabela 4 para o teste de vibração [49]:

Tabela 4 – Deslocamento Vibratório para Vibrações Ambientais

Variação da Frequência (Hz)	Amplitude Única (Polegadas)
4 a 15	0,030 ± 0,006
16 a 25	0,020 ± 0,004
26 a 33	0,010 ± 0,002

Fonte: Adaptada de MIL-STD-167-1(SHIPS) [49].

Nos casos em que há múltiplas frequências de proeminência de resposta selecionadas, a duração do teste de vibração em cada frequência deve estar de acordo com a Tabela 5. Se não forem observadas proeminências de resposta nem efeitos no desempenho estrutural/funcional do equipamento, este ensaio deve ser realizado a 33 Hz [49].

Tabela 5 – Duração do teste de resistência em uma determinada direção ortogonal em cada frequência de teste.

Número de frequências de teste de resistência	Duração do tempo de teste em cada frequência	Tempo Total
1	2 horas	2 horas
2	1 hora	2 horas
3	40 minutos	2 horas
4	40 minutos	2 horas 40 minutos
n > 2	40 minutos	40 x n minutos

Fonte: Adaptada de MIL-STD-167-1(SHIPS) [49].

3.3 ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

O *software* ATP é um programa computacional que permite simulação de sistemas elétricos e de controle, com foco na obtenção de dados em regime transitório. O ATP pode ser

utilizado para análise de transientes no sistema elétrico de energia [42], assim como verificar as perturbações derivadas dos harmônicos gerados por uma determinada carga, o THD, que possam causar interferência no bom funcionamento dos demais equipamentos conectados na rede elétrica [16]. Com o objetivo de analisar os parâmetros de qualidade de energia, será simulado com o auxílio da interface gráfica do software ATP, o ATPDRAW, a modelagem da rede elétrica de bordo. Para efeitos de análise dos impactos gerados pela inclusão das luminárias LED no sistema elétrico do navio, será realizada uma comparação da rede atual, luminárias fluorescentes, com a tecnologia proposta, luminárias LEDs. Para isso será reproduzido no ATPDRAW a modelagem do sistema de geração de energia elétrica do navio estudado e a inserção das cargas que representam estas lâmpadas no sistema. Por fim serão analisados os resultados obtidos dos níveis de distorção harmônica do sistema elétrico do navio relacionando com a carga incluída ao sistema.

De acordo com a norma IEEE Std 399-1997 *Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis* [50], o estudo de harmônicos requer o conhecimento das correntes harmônicas que são geradas pelas cargas não lineares. Foram considerados três métodos para se conhecer estas correntes, que são:

- Medir os harmônicos gerados em cada fonte;
- Calcular os harmônicos gerados por uma análise matemática sempre que possível, como em conversores ou compensadores estáticos, e;
- Utilizar valores típicos com base em aplicações semelhantes ou dados publicados.

Neste trabalho foram utilizados os harmônicos medidos em laboratório para as luminárias, e para as demais cargas do sistema utilizaram-se valores típicos com base em aplicações semelhantes.

A partir de valores típicos verificados na literatura [50-51], serão representadas as correntes harmônicas geradas pelas diferentes cargas não lineares presentes no sistema.

A modelagem das cargas não lineares será realizada por injeções de corrente no ponto em que a carga está conectada, na respectiva frequência, conforme descrito em [42].

Para a modelagem dos componentes elétricos do navio foram utilizados os modelos padrão da biblioteca do *software* ATPDRAW conforme a norma IEEE Std 399-1997 [50] os componentes foram modelados da seguinte forma:

a. Geradores:

O gerador tem efeitos significativos das tensões e correntes harmônicas, devido sua impedância ser tipicamente três vezes maior que a dos transformadores utilitários [44].

O gerador pode ser representado por um circuito resistor-indutor simples em série representando a reatância subtransitória com relação X / R (na frequência fundamental) [50]. Para representá-lo no *software* foi utilizado o modelo “*AC source*”, configurado para fornecer tensão de 440V/60Hz ao barramento que alimenta todas as cargas elétricas do navio. Sua reatância subtransitória foi representada pelo modelo “*RLC-3ph*”, conforme Figura 24.

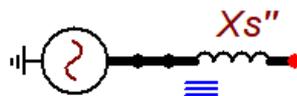


Figura 24 – Representação do gerador e sua reatância subtransitória utilizado no ATP

Os valores utilizados para a reatância subtransitória do gerador foram retirados de catálogo de fabricante de acordo com o modelo utilizado no projeto da embarcação.

b. Transformadores

As perdas nos transformadores dependem dos níveis de pico de fluxo necessário para magnetizar o núcleo do transformador e são desprezíveis em relação aos níveis de corrente harmônica. Essa corrente harmônica aumenta quando o transformador alimenta cargas não lineares [44].

Segundo a norma IEEE Std 399-1997 [50] os transformadores podem ser modelados como um transformador ideal em série com a impedância nominal de dispersão.

No *software* foi escolhido o modelo “*Saturable3 phase*” para representar os transformadores no sistema elétrico do navio, conforme Figura 25.

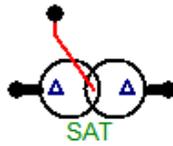


Figura 25 – Representação do transformado utilizado no ATP

Todos os valores utilizados na modelagem do transformador foram retirados do catálogo do fabricante aplicados para a área militar naval.

c. Modelo de Carga

Uma carga agregada é geralmente representada como uma combinação paralela/série de resistências e indutâncias, estimadas a partir da potência de carga da frequência fundamental [50].

As cargas lineares não geram harmônicas, logo foram representadas no programa pelo modelo “*RLC-3ph*”, com os valores respectivos de suas resistências e impedâncias, conforme apresentado na Figura 26.



Figura 26 – Representação das cargas lineares no ATP.

d. Modelo de Cabos

Uma linha ou cabo curto pode ser representado por um circuito resistor/indutor em série representando a resistência e a reatância série da linha [50].

Para representação dos cabos no programa foi modelada uma resistência equivalente através do modelo “*RLC-3ph*”, conforme Figura 27.



Figura 27 – Representação do cabo utilizado no ATP

Para os valores dos cabos também foram utilizados valores de fabricante de cabos para a área naval.

e. Cargas não-lineares

De acordo com a norma IEEE Std 399-1997 [50] para geradores de harmônicos derivados de dispositivos não lineares, dependendo da natureza do dispositivo e da precisão exigida deve-se adotar valores típicos utilizado na maioria dos estudos industriais.

Para os retificadores foram utilizadas as correntes harmônicas de corrente alternada, conforme descrito na norma IEEE Std 399-1997 [50].

Para as lâmpadas fluorescentes e LEDs esses valores foram obtidos através de ensaio em laboratório a fim avaliar de forma mais precisa os impactos dessas lâmpadas na rede em estudo.

Para representar essas cargas no ATP, foram utilizados modelos de “AC Source” para representar os componentes harmônicos de ordens mais altas, configurados com as respectivas frequências, e para representar a componente fundamental utilizou-se o modelo de carga linear, esse conjunto é mostrado na Figura 28.

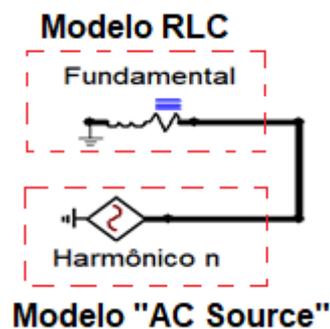


Figura 28 – Representação das cargas não lineares utilizado no ATP

Este capítulo apresentou toda a metodologia que será aplicada tanto nos ensaios em laboratório quanto na simulação proposta para análise de qualidade de energia elétrica realizada através do *software* ATPDRAW. Além disso, também irá auxiliar na análise mais detalhada do ponto de vista econômico da substituição de tecnologia proposta.

4 DESCRIÇÃO DO CASO

Para o presente estudo será utilizado um navio patrulha de aproximadamente 500 toneladas, projetado basicamente para patrulhamento de todo litoral brasileiro, executando diversas tarefas, tais como: em situação de conflito, efetuar a defesa do litoral e em situação de paz, promover a fiscalização contra atividades ilícitas e garantir a segurança do litoral nacional.

Todos os navios que são projetados e construídos no Brasil devem ter um índice de nacionalização de no mínimo 60%. Como partes dos equipamentos utilizados na construção de um navio não são fabricados em território brasileiro, como por exemplo: o sistema de armamento, os demais equipamentos deverão ser produzidos no Brasil.

Atualmente nos navios da esquadra, tanto os nacionais quanto os adquiridos através das marinhas amigas, utilizam luminárias fluorescentes em sua composição. Até então não havia nenhuma empresa nacional que tivesse interesse de desenvolver uma luminária com a tecnologia LED para aplicação em navios militares, pois esse desenvolvimento demandaria um custo elevado devido às peculiaridades impostas pelo meio militar.

A instalação elétrica do navio será projetada para assegurar, em todos os modos de operação, a disponibilidade de energia elétrica necessária aos equipamentos existentes a bordo, em qualidade e quantidade. A energia elétrica é gerada em 450V/60Hz, trifásica, fator de potência de 0,8, através de uma estação geradora denominada Grupos Diesel-Geradores Principais (DGP), constituída de dois grupos geradores de 538 kVA, situados em compartimentos dos geradores e associados ao Quadro Elétrico Principal (QEP). O navio também possui um Grupo Diesel-Gerador de Emergência (DGE), com capacidade de 204 kVA, localizado em compartimento distinto ao DGP.

Como se trata de um navio militar, todo o sistema de geração e distribuição será redundante, de forma que não haja indisponibilidade do sistema em caso de perda de parte da geração.

Para que haja uma maior confiabilidade e flexibilidade do sistema, os quadros elétricos principais são interligados, permitindo que os mesmos recebam energia elétrica de qualquer um dos dois geradores principais, e do gerador de emergência. Essa interligação permite a operação em paralelo dos dois geradores principais. O barramento principal de cada

quadro elétrico é dividido, por meio de um disjuntor, em duas partes, permitindo operar quadro elétrico em regime de planta dividida.

4.1.1 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DO NAVIO

Apesar de o navio estudado ser um navio militar de porte pequeno utilizado para patrulha, o mesmo possui o sistema de iluminação semelhante a qualquer outro navio utilizado pela MB. De uma forma geral o sistema de iluminação é dividido em sistema de iluminação principal, sistema de iluminação de emergência e o sistema de luzes de festa e antissabotagem.

4.1.2 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PRINCIPAL

O sistema de iluminação principal do navio tem o objetivo facilitar o desempenho das tarefas visuais, o movimento no espaço e ajudar na criação de um ambiente visual apropriado. O projeto de iluminação envolve a integração desses aspectos para fornecer iluminação adequada para a segurança e o bem-estar da tripulação, bem como para as várias tarefas executadas a bordo dos navios.

Esse sistema é alimentado em 115V/60Hz, com neutro isolado, fornecido a partir de quadros de distribuição do sistema de iluminação; cada quadro de distribuição principal é alimentado pela distribuição de força principal através de transformadores trifásicos de 440/115V, de potência nominal adequada para a demanda de carga de iluminação e para os vários pequenos serviços prestados. Os quadros de distribuição do sistema de iluminação fornecem alimentação aos quadros de distribuição secundários de iluminação: quadros de distribuição de iluminação interna e externa, antissabotagem e cerimoniais.

Os quadros de distribuição de luz alimentam vários equipamentos, tais como:

- Luminárias fluorescentes;
- Luminárias incandescentes;
- Luminárias incandescentes à prova de explosão;
- Chaves rotativas e reversora;
- Caixas de junção;
- Chaves fim de curso (interruptor de porta);
- Holofotes de sinalização; e
- Tomadas.

No sistema de iluminação principal também se encontra a luz de polícia, conhecida como luz vermelha, e tem a finalidade de preservar a visão adaptada ao escuro, permitir a segurança nas áreas habitáveis e operativas e reduzir a iluminação nas áreas onde possuem acomodação a fim de permitir o melhor conforto da tripulação. Nos navios são utilizadas luzes incandescentes com invólucro vermelho para diminuir a intensidade luminosa e permitir que o navio possa navegar as escuras sem que seja visto pelo inimigo.

4.1.3 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE EMERGÊNCIA

O sistema de iluminação de emergência é previsto para o caso de perda da iluminação principal, visando evitar pânico a bordo, demarcar saídas de emergência e atender aos locais de operação.

Este sistema é composto por luminárias de teto, lanternas automáticas e lanternas portáteis localizadas da seguinte forma:

- a) Luminárias nos compartimentos onde, por exigência funcional, a iluminação contínua é essencial e onde se faz necessária a permanência de pessoal em serviço mesmo em caso de emergência.
- b) Lanternas portáteis distribuídas pelo navio para suplementar as lanternas automáticas. As lanternas portáteis são instaladas em acessos a paióis, passagens de escotilhão, áreas pouco guarnecidas, acessos a compartimentos vitais, tais como compartimento onde as máquinas estão instaladas (praça de máquinas) e compartimento da máquina do leme, em compartimentos operativos tais como Centro de Operação de Combate (COC), Centro de Controle e Monitoração (CCM), passadiço, compartimento dos quadros elétricos, em cada acesso ao convés exposto e, a cada 18m², uma lanterna nas circulações.
- c) Lanternas automáticas distribuídas nos acessos à rota de fuga, no cruzamento dessas rotas, passagens de escotilhão, escada e circulações longas possuem uma lanterna a cada 10 metros e a cada divisão estanque, em áreas de risco para o pessoal, além dos compartimentos habitáveis e compartimentos onde se guardam munições e mantimentos (paiol).

Como esse sistema é utilizado apenas em emergência, sua alimentação será realizada pelos painéis de iluminação de emergência alimentados em 24Vcc, através dos grupos de baterias do navio. As luminárias deverão ser acionadas automaticamente e imediatamente após a perda da iluminação principal do compartimento em que estiverem instaladas. Normalmente, a quantidade de luminárias destinadas à emergência é menor do que o sistema de iluminação principal, tendo em vista que sua utilização é apenas para casos em que o navio já não possui condições operativas normais e está em situação crítica tendo apenas o propósito de esperar socorro.

Os painéis de emergência alimentam as seguintes cargas:

- Caixa de junção;
- Luminárias incandescentes; e
- Luminárias fluorescentes com lâmpadas incandescentes de 24Vcc acoplada.

4.1.4 SISTEMA DE LUZES DE FESTA E ANTISSABOTAGEM

O sistema de luzes de festa tem como objetivo iluminar o navio durante eventos de caráter militar, tais como passagem de comando, saídas para comissões, dentre outros. Já as luzes antissabotagem têm a finalidade de iluminar partes do local de difícil visibilidade e alta probabilidade de acesso de pessoas não autorizadas.

Este sistema é alimentado em 115V/60Hz, através do painel de luzes externas, geralmente localizados no passadiço.

As luzes de festa consistem em lâmpadas incandescentes de 15W, protegidas por meio de grades, afastadas entre si, em extensões de cabos flexíveis. Cada extensão possui, em cada extremidade, um plugue e uma tomada adequada ao mesmo.

A iluminação antissabotagem consiste de projetores, instalados nas extremidades de lanças removíveis, em ambos os bordos do navio, e direcionados para a linha d'água². A quantidade, o espaçamento entre os projetores e o ângulo de inclinação dos mesmos deverão ser tais que, o feixe luminoso assegure uma completa cobertura da superfície da água junto ao casco.

²Linha d'água ou linha de flutuação consiste na linha que separa a parte imersa do casco de um navio (obras vivas) da sua parte não imersa (obras mortas). A linha d'água é definida pela intercepção do plano de superfície da água calma com a superfície exterior do casco.

4.2 REQUISITOS GERAIS DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

De acordo com a norma utilizada pela Marinha do Brasil referente à iluminação principal dos navios de superfície [52], para que o compartimento seja considerado adequadamente iluminado para o tipo de atividade a que se destina, é necessário que o sistema alcance, além do nível de iluminamento médio satisfatório, certos requisitos sobre qualidade da iluminação.

A seleção de níveis de iluminância apropriados para tarefas específicas e espaços marítimos é uma consideração importante no projeto de sistemas de iluminação. De uma forma geral as recomendações de iluminância requeridas para determinadas tarefas visuais realizadas em espaços habitáveis a bordo de um navio são geralmente semelhantes às tarefas encontradas em terra.

Quando se realiza um estudo luminotécnico de um navio, consideram-se para fins de cálculo as características óticas do compartimento, tais como as inúmeras perdas por reflexão, absorção e transmissão nos objetos, teto, antepara etc, que se encontram no percurso, antes de atingir o plano de trabalho. Os fatores de reflexão considerados estão descritos abaixo:

- Teto branco – 75%
- Teto claro – 50%
- Antepara branca – 50%
- Antepara clara – 30%
- Antepara média – 10%
- Piso claro – 30%
- Piso escuro – 10%

Deve-se considerar também uniformidade luminosa satisfatória, para isto as luminárias devem ser localizadas de modo a se obter a máxima iluminação possível sobre a superfície do trabalho, o espaçamento entre as luminárias e anteparas deve ser menor ou igual à metade do espaçamento entre luminárias e devem estar dispostas de modo a evitar sombras sobre as superfícies de trabalhos. Por fim a razão entre o nível de iluminamento máximo (sob as luminárias) e o nível de iluminamento mínimo (entre duas luminárias adjacentes ou em pontos isolados do compartimento) não deve ser maior que dois para um (2:1). Se esse número for maior, deve-se instalar um maior número de luminárias ou rearranjar as mesmas.

O controle de ofuscamento é outro ponto a ser considerado, as luminárias em compartimentos de controle devem ser localizadas de modo que, com operadores em sua posição normal, sejam eliminados reflexos provenientes dos visores dos instrumentos. Quando estes reflexos não podem ser completamente eliminados pelo posicionamento adequado das luminárias ou instrumentos, devem ser instalados anteparos nas luminárias ou nos visores dos instrumentos, ou ainda os visores dos instrumentos devem ser substituídos por outros de material não refletor.

Todos esses requisitos têm a finalidade de tornar o ambiente cromático, ou seja, um ambiente onde as cores estão perfeitamente harmonizadas e adaptadas à função visual ou ao trabalho a ser desenvolvido.

Nesse capítulo foi visto como funciona o sistema elétrico de um navio de pequeno porte da Marinha do Brasil. Também foi apresentado todo o sistema de iluminação da embarcação, mostrando seus requisitos e finalidades de modo a preservar o bem estar da tripulação e cumprir as missões militares que lhe são impostas.

5 MEDIDAS EM LABORATÓRIO

Esse capítulo abordará todos os testes, realizados em laboratório, na qual as luminárias foram submetidas a fim de comparar de maneira mais precisa as duas tecnologias propostas para aplicação na área militar naval. Para essa análise foram testadas lâmpadas consagradas no mercado brasileiro de forma a garantir qualidade nos equipamentos utilizados a bordo do navio.

5.1 TESTE ELÉTRICO

A fim de analisar os parâmetros elétricos de cada luminária estudada, foram feitas medições no Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense - LABLUX

A tensão de alimentação utilizada na realização dos testes foi de 127V, compatível com a tensão do circuito de alimentação do sistema de iluminação da embarcação.

Para fins de comparação, foram testadas duas luminárias com lâmpadas de tecnologias distintas: a primeira medição foi realizada na luminária fluorescente; e a segunda na luminária LEDs. Ambas as luminárias são do mesmo fabricante, distinguindo-se apenas suas lâmpadas. A Figura 29 mostra o momento da medição no goniofotômetro.



Figura 29 – Teste das luminárias no LABLUX – UFF

5.1.1 RESULTADOS DOS TESTES ELÉTRICOS

As medidas elétricas obtidas através dos testes fotométricos podem ser vista nas Tabelas 6 e 7, nelas podem ser observadas que os valores estão dentro dos limites impostos pelas portarias do INMETRO [28-30], com a norma IEC 61000-3-2:2008 [53] e com os padrões de qualidade que se espera para aplicação na área militar naval [54].

Tabela 6 – Resultados da Fotometria: Comparação das Potências

	Fluorescentes (2X20W)	LED (2x10W)	ECONOMIA	Ganho (%)
Quantidade das Luminárias	202		-	-
Potência das Luminárias (W)	37,90	18,60	19,30	49,08%
Potência Ativa Total (W)	7.655,80	3.757,20	3.898,60	
Potência Aparente Total (VA)	7.812,04	3.795,15	4.016,89	
Fator de Potência	0,98	0,99	-	1,01%

Tabela 7 – Resultados da Fotometria: Comparação Fotométrica

	Fluorescentes (2X20W)	LED (2x10W)
Potência Ativa (W)	37,90	18,60
Corrente (mA)	301,00	147,00
Fator de Potência	0,98	0,99
Temperatura de Cor (K)	4853	5279
Índice de Reprodução de Cor (IRC)	0,69	0,84
Fluxo Luminoso (lm)	1738,30	1913,00
Eficiência Luminosa (lm/W)	45,80	102,80
Distorção Harmônica Total (%)	7,20	4,40

Além dos dados medidos, também foram geradas as curvas polares, os espectros das luminárias e os arquivos ies os quais foram incluídos no *software* DIALUX com a finalidade de comparar as duas tecnologias no ponto de vista dos níveis de iluminância. Essas simulações estão apresentadas no Anexo 1 - Simulação dos níveis de iluminação dos compartimentos do navio através dos arquivos ies gerados nos testes e aplicados no *software* DIALUX.

Primeiro será apresentada a distribuição luminosa das luminárias através das curvas polares obtidas durante os ensaios tanto da luminária fluorescente quanto da luminária LED. Na Figura 30 tem-se a curva da luminária fluorescente, nela pode-se ver que a maior parte do seu fluxo flui na direção dos lados, encontrando assim um ângulo de feixe médio igual a 139,4°.

Para as luminárias de LED, Figura 31 tem uma curva um pouco diferente, pois os LEDs possuem uma característica pontual, sendo assim a sua curva tem um comportamento no qual pode-se perceber que seu fluxo flui na direção para baixo, possuindo um ângulo médio um pouco menor das lâmpadas fluorescente, com um valor de 117°.

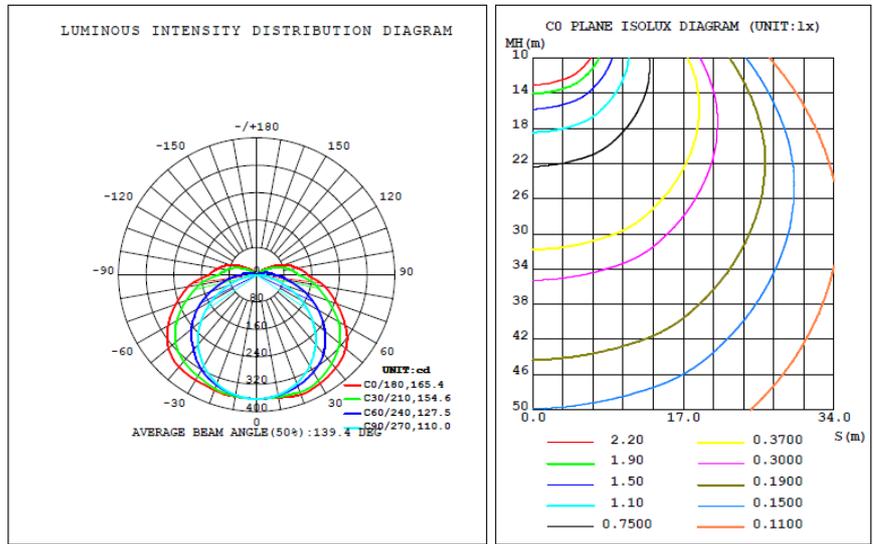


Figura 30 – Curva Polar Luminária Fluorescente

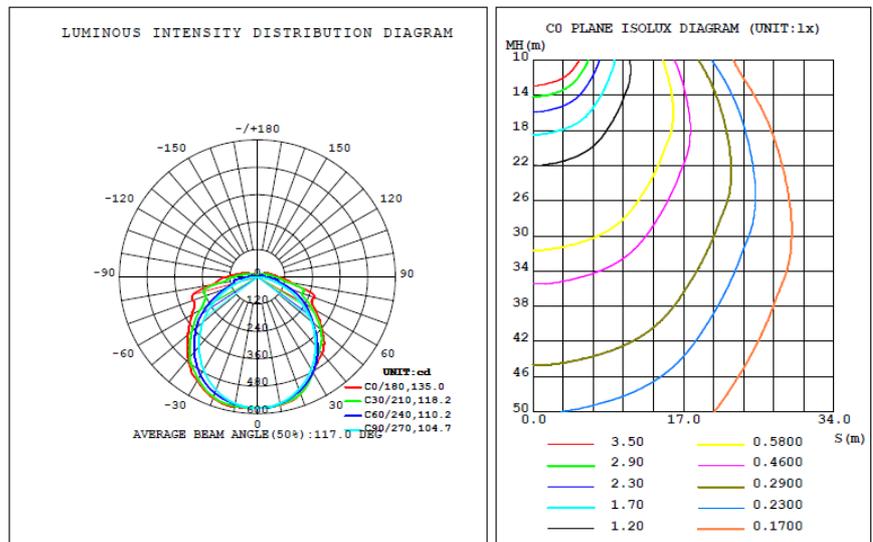


Figura 31 – Curva Polar Luminária LED

Para os dados obtidos no espectro luminoso, a temperatura de cor tanto da luminária fluorescente quanto da luminária LED se enquadra na faixa de 5000K, porém a luminária LED apresenta uma temperatura de cor um pouco superior.

Com relação ao índice de reprodução de cores (IRC), a luminária LED se enquadra na faixa de boa reprodução de cores, superior a 80, enquanto a fluorescente se enquadra na faixa de reprodução de cores razoável, ente 60 e 80 [55-56], isso implica em uma melhor representação das cores em ambientes iluminados por LED. Apesar de em muitos casos a diferença no índice de reprodução de cores não ser facilmente identificado, para alguns ambientes voltados para tarefas específicas, o desempenho com iluminação artificial com um IRC mais elevado pode ser sensivelmente superior.

O espectro de luz do LED é caracterizado pelo azul (450 nm), como mostrado na Figura 32, que é a estrutura básica do LED branco. A outra parte do espectro é formada com a adição de fósforo no LED azul, já o espectro da lâmpada fluorescente, como mostrado na Figura 33, é descontínuo e a curva depende do material luminescente [57].

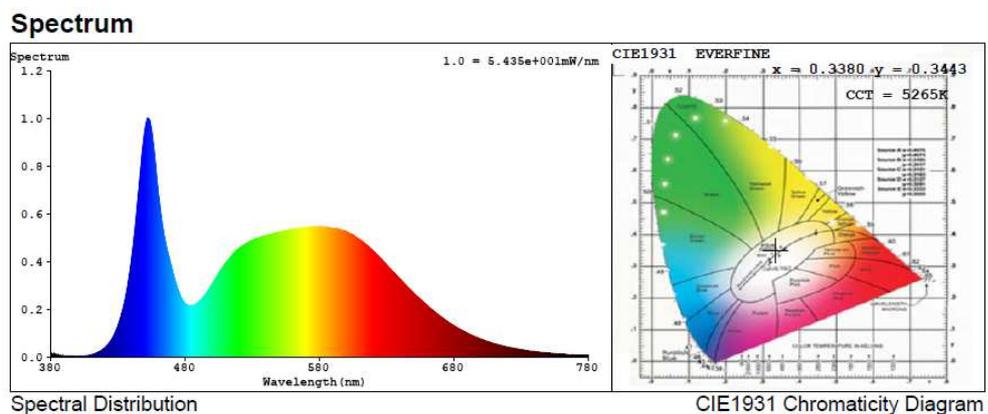


Figura 32 –Reprodução de Cor - Lâmpada de LED

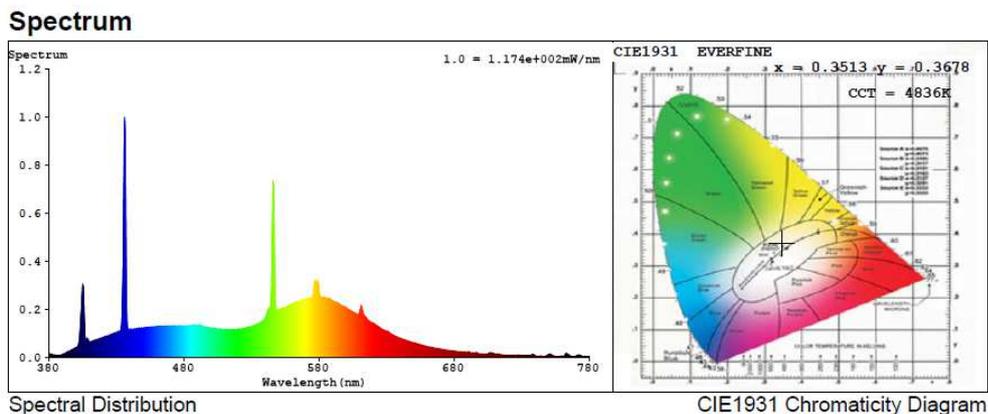


Figura 33 –Reprodução de Cor - Lâmpada de Fluorescente.

Os arquivos ies gerados durante a medição no goniofotômetro foram carregados no *software* DIALUX – Anexo1. Nele foi realizado o estudo para três cenários distintos:

- Cenário 1: Curva ies da luminária com lâmpadas fluorescentes, e quantidade de luminárias calculada de acordo com o nível de iluminamento (lux) exigido por compartimento do navio [52].
- Cenário 2: Curva ies da luminária com lâmpadas LEDs, e a mesma quantidade de luminária utilizadas no cenário 1.
- Cenário 3: Curva ies da luminária com lâmpadas LEDs, e quantidade de luminárias calculada de acordo com o nível de iluminamento (lux) exigido por compartimento do navio [52].

Para cada cenário foi gerado um relatório com a quantidade de luminárias, o fluxo luminoso total das luminárias e das lâmpadas, a potência total e o rendimento luminoso. Esses valores estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação dos resultados obtidos no DIALUX

Cenário	Quantidade de Luminárias	Fluxo Luminoso Total (lúmens) - Lâmpadas	Fluxo Luminoso Total (lúmens) - Luminárias	Potência Total (Watts)	Rendimento luminoso (lúmens/Watts)
1	202	325.624,0	325.220,0	7.676,0	42,4
2	202	371.276,0	371.478,0	3.777,4	98,3
3	188	345.544,0	345.732,0	3.515,6	98,3

No cenário 3 verificou-se que a quantidade de luminárias LEDs necessárias para iluminar uma mesma área foi menor comparada com as luminárias fluorescentes. Este fato se deve ao valor do fluxo luminoso das luminárias LEDs serem aproximadamente 10% maior que o das lâmpadas fluorescentes, conforme apresentado na Tabela 4.

Assim como os parâmetros elétricos medidos no LABLUX, também foram realizadas as medidas dos parâmetros de EMC de cada luminária estudada. Os ensaios foram realizados utilizando a norma internacional CISPR-15 - Limites e métodos de medição das radioperturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares [34]. Esse ensaio visa avaliar a capacidade das luminárias de operar de acordo com suas

características operacionais, no seu ambiente eletromagnético, sem impor perturbações fora das tolerâncias admitidas pelos demais equipamentos instalados no navio.

Esse teste é um dos requisitos de segurança impostos pelo INMETRO [28] para a certificação das lâmpadas de LED comercializadas no Brasil, porém não são impostos os mesmos requisitos para as lâmpadas fluorescentes. Todavia nesse trabalho iremos avaliar as duas tecnologias do ponto de vista do EMC a fim de comparar as vantagens e desvantagens da substituição das luminárias de bordo.

Os seguintes equipamentos foram utilizados para a realização os ensaios compatibilidade eletromagnética, obtenção das perturbações eletromagnéticas conduzidas e irradiadas:

- Analisador de Espectro;
- Pré-seletor;
- *Line Impedance Stabilization Network (LISN)* ;
- Antena Loop;
- *Coupling/Decoupling Network (CDN)*;
- Atenuador de 6dBs 50 Ω ;
- Filtro passa alta;e
- Computador.

A norma [34] define três ensaios para a avaliação da compatibilidade eletromagnética:

- a) Tensões de perturbação em terminais de alimentação

Para analisar as tensões de perturbação nos terminais das luminárias, utilizou-se um aparelho para detectar o pico, nas faixas de 9 kHz até 30 MHz. Após a medição foram selecionados maiores valores de picos de tensão de perturbação para as luminárias. Em seguida, utilizando as frequências correspondentes dos pontos selecionados, foram obtidas através dos detectores de quase pico e média, as tensões de perturbação para que pudesse ser comparada com os limites exigidas na norma CISPR-15 [34]. Esse procedimento foi realizado

tanto para o terminal neutro, quanto para o terminal fase das luminárias. A Figura 34 apresenta o momento do ensaio.



Figura 34 – Ensaio de perturbação em terminais de alimentação

Os gráficos com os valores de pico das tensões de perturbação nos terminais fase e neutro das luminárias testadas nos ensaios estão apresentadas nas Figuras 35 e 36 para a luminária LED e nas Figuras 37 e 38 para a luminária fluorescente. Também podem ser vistos os valores de quase pico nas Tabelas 9 e 10 referentes à luminária LED e nas Tabelas 11 e 12 para a luminária fluorescente.

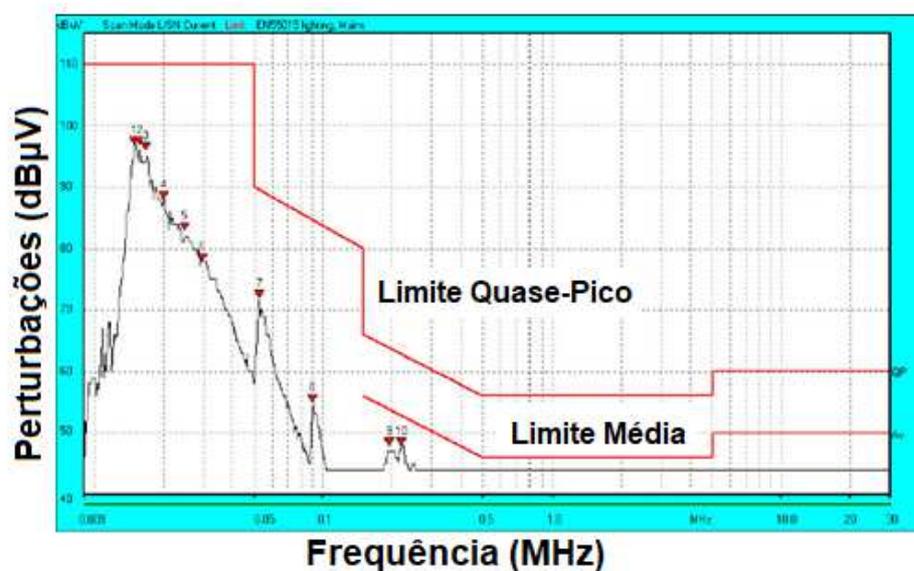


Figura 35 – Valores de pico da tensão de perturbação gerados pela luminária LED no terminal fase.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 9 – Tensões de perturbação gerada pela luminária LED no terminal fase

Frequência (kHz)	Quase Pico (dB μ V)		Média (dB μ V)	
	Medido	Margem	Medido	Margem
14,94	44	66	44	156
15,66	44	66	44	156
16,78	44	66	44	156
20	44	66	44	156
24,73	45	65	44	156
29,77	46	64	44	156
52,38	71	19	68	132
89,92	52	33	49	151
195,3	47	17	44	10
20,2	44	19	44	9

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

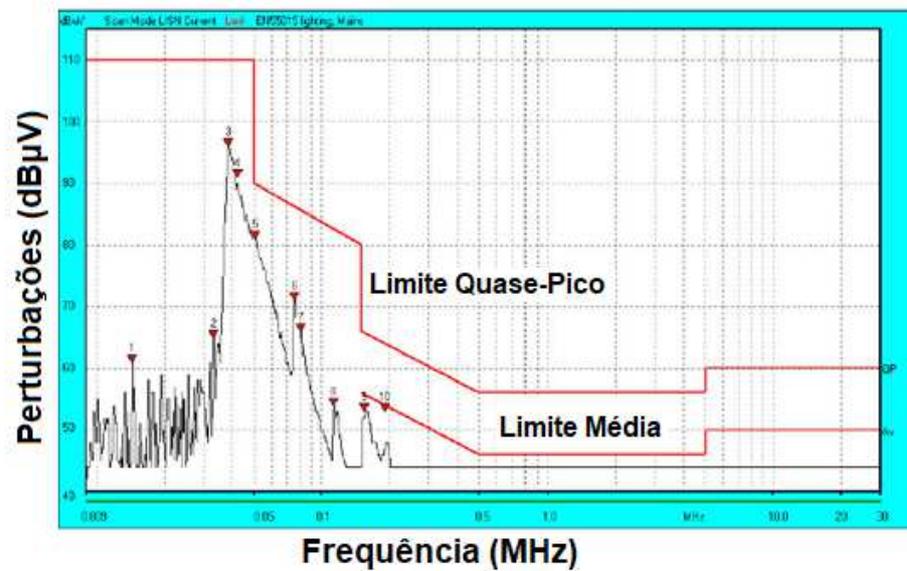


Figura 36 – Valores de pico da tensão de perturbação gerados pela luminária LED no terminal neutro.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 10 – Tensões de perturbação gerada pela luminária LED no terminal neutro

Frequência (kHz)	Quase Pico (dB μ V)		Média (dB μ V)	
	Medido	Margem	Medido	Margem
14,4	44	66	44	156
32,9	50	60	48	152
38,29	86	24	83	117
42,04	79	31	76	124
50,63	73	17	70	130
75,25	63	23	59	141
80,93	58	28	55	145
113,3	50	33	48	152
155,1	51	15	46	10
190,6	47	17	44	10

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

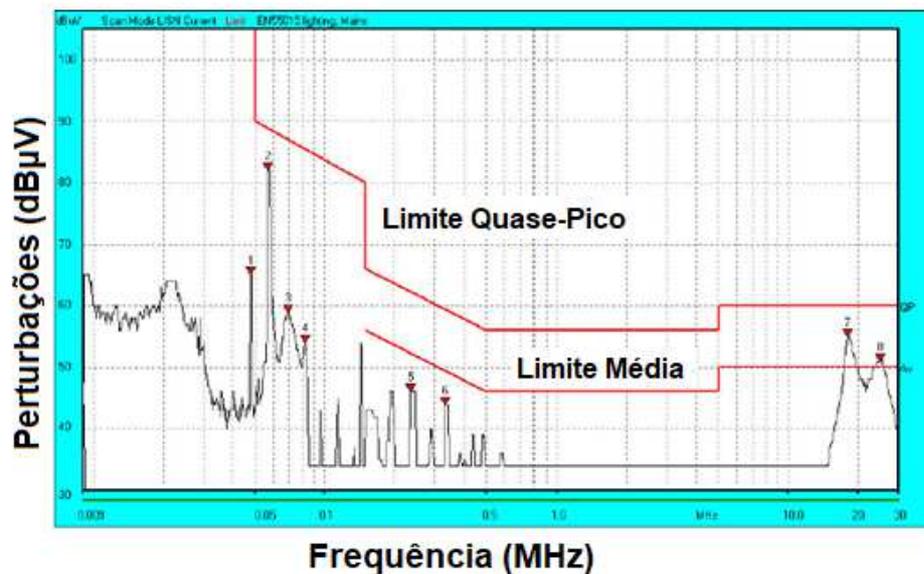


Figura 37 – Valores de pico da tensão de perturbação gerados pela luminária fluorescente no terminal fase.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 11 – Tensões de perturbação gerada pela luminária fluorescente no terminal fase

Frequência (kHz)	Quase Pico (dB μ V)		Média (dB μ V)	
	Medido	Margem	Medido	Margem
47,73	64	46	64	136
56,74	50	39	47	153
69,27	53	34	50	150
82,01	47	38	44	156
235,6	45	17	44	8
332	43	16	42	7
18.130	50	10	43	7
24.910	47	13	40	10

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

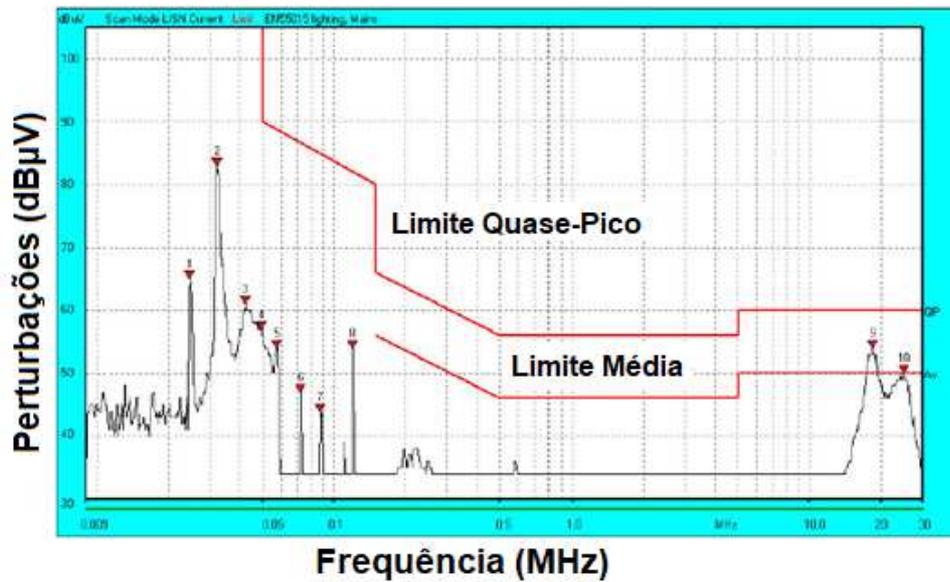


Figura 38–Valores de pico da tensão de perturbação gerados pela luminária fluorescente no terminal neutro.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 12 – Tensões de perturbação gerada pela luminária fluorescente no terminal neutro

Frequência (kHz)	Quase Pico (dB μ V)		Média (dB μ V)	
	Medido	Margem	Medido	Margem
24,63	52	58	49	151
31,9	41	69	39	161
42,42	38	72	36	164
49,18	38	72	37	163
57,28	67	22	63	137
72,31	53	34	50	150
86,82	34	51	34	166
119,9	34	48	34	166
18.440	50	10	42	8
24.970	46	14	39	11

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

b) Perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo Magnético)

Para analisar as perturbações eletromagnéticas radiadas das luminárias, foi utilizado um aparelho para detectar o pico, nas faixas de 9 kHz até 30 MHz. Após a medição foram selecionados os maiores valores de picos dessas perturbações. Em seguida, utilizando as frequências correspondentes dos pontos selecionados, foram obtidos através dos detectores de quase pico, os valores das perturbações para que pudessem ser comparadas com os limites exigido na norma CISPR-15 [34]. Na Figura 39, pode ser vista a luminária no momento do ensaio.



Figura 39 – Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo Magnético).

Os gráficos com os valores de pico das perturbações eletromagnéticas radiadas nas direções x, y e z das luminárias testadas nos ensaios estão apresentadas nas Figuras 40 à 42 para a luminária LED e nas Figuras 43 à 45 para a luminária fluorescente. Também podem ser vistos os valores de quase pico nas Tabelas 13 à 15 referentes à luminária LED e nas Tabelas 16 à 18 para a luminária fluorescente.

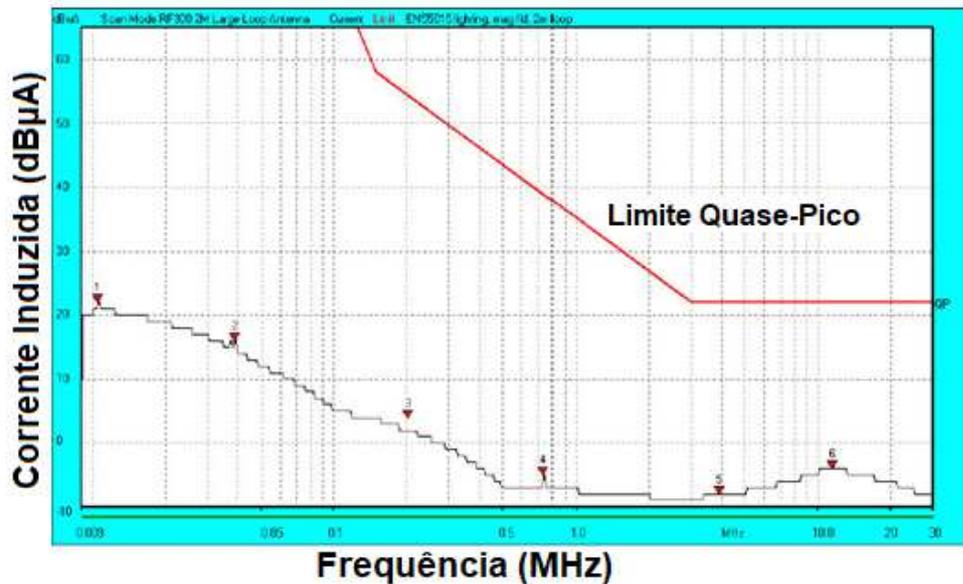


Figura 40 – Valores de pico da corrente induzida no eixo X da antena loop da luminária LED.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 13 – Valores da corrente induzida no eixo X da antena loop da luminária LED

Frequência (kHz)	Quase Pico (dBµA)	
	Medido	Margem
10,51	21	67
38,76	15	73
202,1	2	52
734,8	-7	46
3.893	-8	30
11.470	-4	26

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

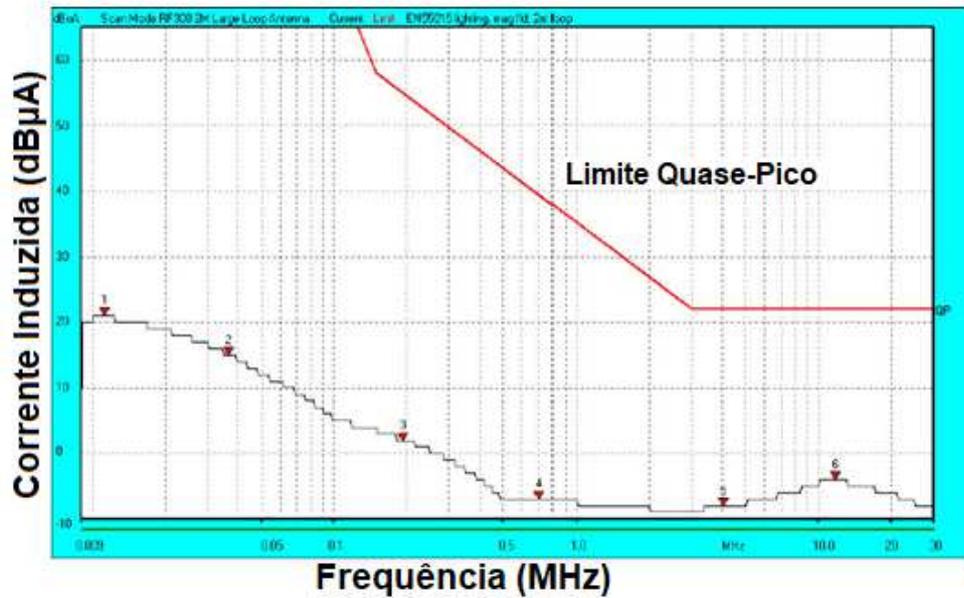


Figura 41 – Valores de pico da corrente induzida no eixo Y da antena loop da luminária LED.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 14 – Valores da corrente induzida no eixo Y da antena loop da luminária LED

Frequência (kHz)	Quase Pico (dBµA)	
	Medido	Margem
11,19	21	67
36,7	15	73
193,4	2	53
703,2	-7	46
4.044	-8	30
11.800	-4	26

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

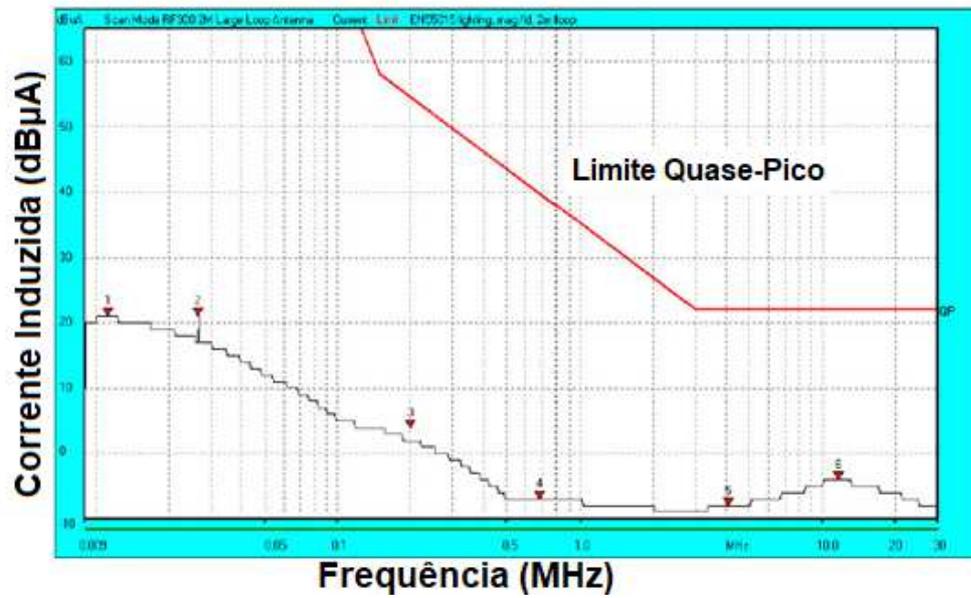


Figura 42 – Valores de pico da corrente induzida no eixo Z da antena loop da luminária LED.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 15 – Valores da corrente induzida no eixo Z da antena loop da luminária LED

Frequência (kHz)	Quase Pico (dBµA)	
	Medido	Margem
11,26	21	67
26,49	17	71
200	2	53
683,3	-7	47
4.081	-8	30
11.690	-4	26

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

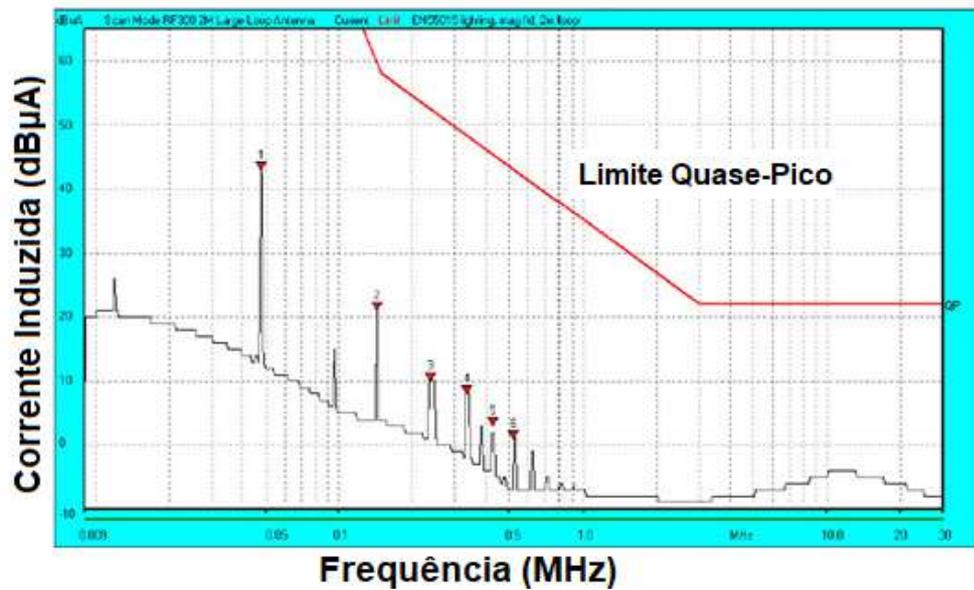


Figura 43– Valores de pico da corrente induzida no eixo X da antena loop da luminária fluorescente.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 16 – Valores da corrente induzida no eixo X da antena loop da luminária fluorescente

Frequência (kHz)	Quase Pico (dBµA)	
	Medido	Margem
47,67	42	46
142,8	20	40
237,5	9	43
333,4	7	41
428,3	0	45
520,6	-1	44

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

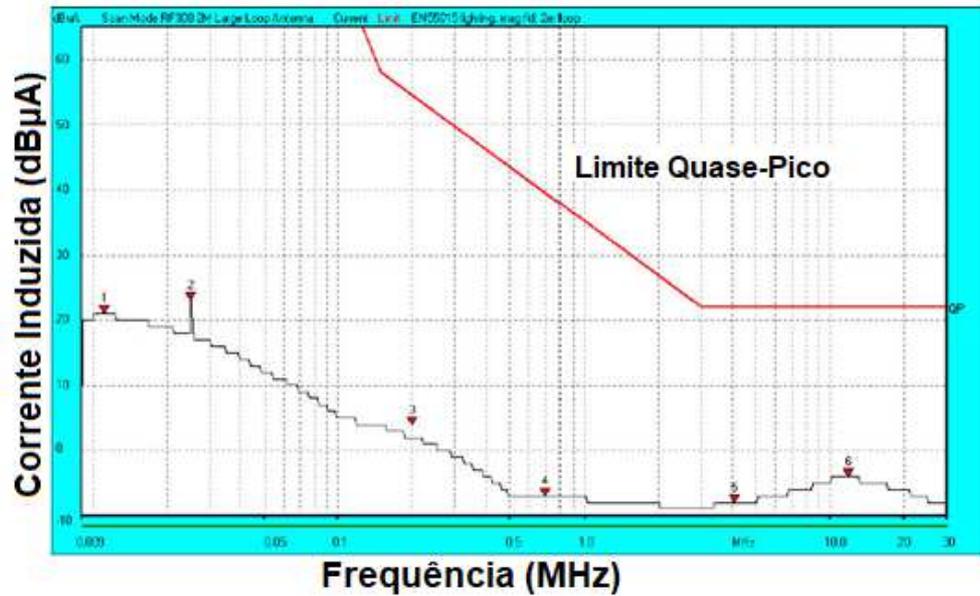


Figura 44 – Valores de pico da corrente induzida no eixo Y da antena loop da luminária fluorescente.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 17 – Valores da corrente induzida no eixo Y da antena loop da luminária fluorescente

Frequência (kHz)	Quase Pico (dBµA)	
	Medido	Margem
11,15	21	67
24,89	18	70
199,2	2	53
699,5	-7	46
4.082	-8	30
11.920	-4	26

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

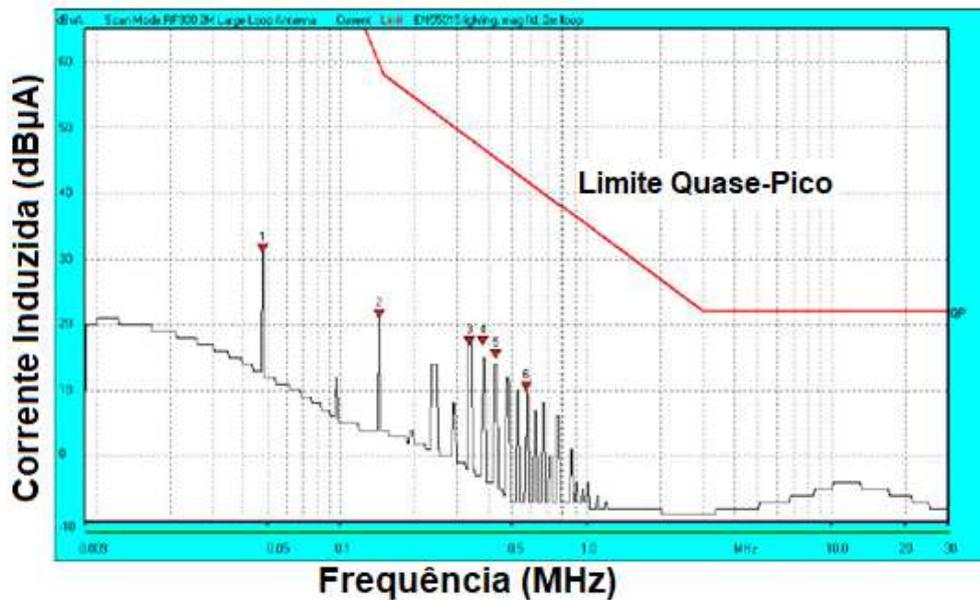


Figura 45 – Valores de pico da corrente induzida no eixo Z da antena loop da luminária fluorescente.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 18 – Valores da corrente induzida no eixo Z da antena loop da luminária fluorescente

Frequência (kHz)	Quase Pico (dBµA)	
	Medido	Margem
47,7	30	58
142,9	20	40
333,4	15	33
380,5	14	33
428,4	11	34
570,1	10	32

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

c) Perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo elétrico)

Para analisar as perturbações eletromagnéticas radiadas na faixa de 30 MHz a 300 MHz das luminárias, foi utilizado um aparelho para detectar o pico. Após a medição foram selecionados os maiores valores de picos dessas perturbações. Em seguida, utilizando as frequências correspondentes dos pontos selecionados, foram obtidos através dos detectores de quase pico, os valores das perturbações para que pudessem ser comparados com os limites exigidas na norma CISPR-15 [34]. A Figura 46 mostra a luminária no momento do ensaio.



Figura 46 – Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas (Campo Magnético)

Os gráficos com os valores de pico das perturbações eletromagnéticas radiadas nas faixas de 30 MHz a 300 MHz das luminárias testadas nos ensaios estão apresentadas na Figura 47 para a luminária LED e na Figura 48 para a luminária fluorescente. Também podem ser vistos os valores de quase pico na Tabela 19 referente à luminária LED e na Tabela 20 para a luminária fluorescente.

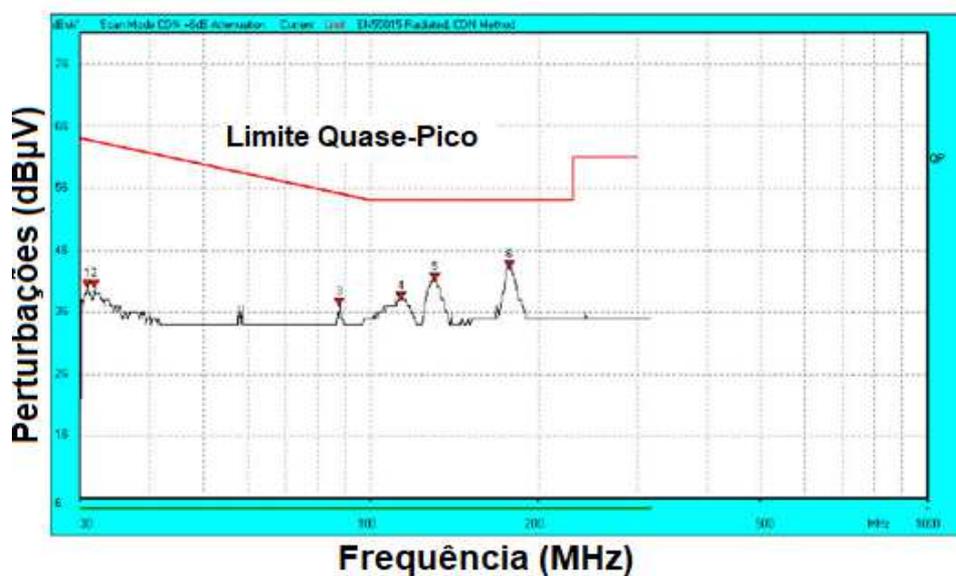


Figura 47 – Valores de pico das perturbações eletromagnéticas radiadas geradas pela luminária LED.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 19 – Valores das perturbações eletromagnéticas radiadas geradas pela luminária LED

Frequência (MHz)	Quase Pico (dB μ V)	
	Medido	Margem
30.85	37	27
31.85	37	27
87.75	34	21
113.08	36	18
130.06	38	16
177.25	41	13

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

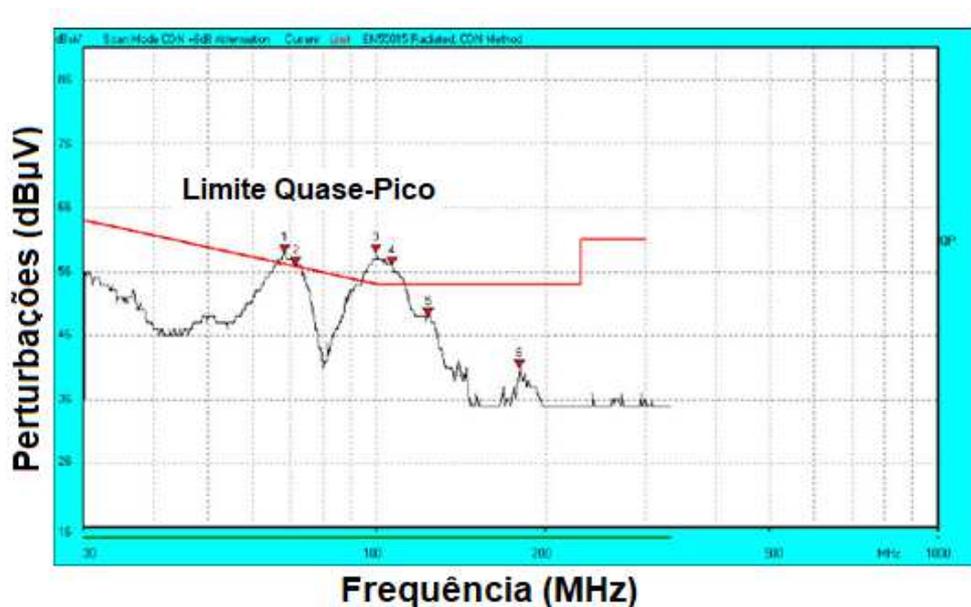


Figura 48 – Valores de pico das perturbações eletromagnéticas radiadas geradas pela luminária fluorescente.

Fonte: Gerado pelo software EMC Engineer

Tabela 20 – Valores das perturbações eletromagnéticas radiadas geradas pela luminária fluorescente

Frequência (MHz)	Quase Pico (dB μ V)	
	Medido	Margem
68.33	56	1
71.59	54	3
99.85	55	-1
106.50	54	0
123.65	47	7
180.02	39	15

Fonte: Adaptado do relatório gerado pelo software EMC Engineer

5.2 TESTES MECÂNICOS

O teste de vibração foi realizado no LABLUX de acordo com o estabelecido na norma MIL-STD-167-1(SHIPS) – *Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment* do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da America [49].

Para esse teste foi utilizado dois equipamentos: um para controlar os níveis de vibração (*Vibration Control System – VCS*) para as frequências estipuladas em norma [49] e outro conectado ao VCS utilizado para fixar as luminária e reproduzir as vibrações setadas no VCS. Esses equipamentos podem ser vistos na Figura 49.



Figura 49 – Equipamento utilizado no ensaio de vibração

Para uma melhor representação dos resultados obtidos nesse ensaio, foi criada através dos valores das frequências aplicadas nas luminárias, a Tabela 21, que representa o estado das luminárias após o teste de vibração.

Tabela 21 – Teste de Vibração

Variação da Frequência (Hz)	LED (2X10W)		Fluorescente (2X20W)	
	Funcionamento	Dano	Funcionamento	Dano
4 a 15	Ok	Sem dano	Ok	Sem dano
16 a 25	Ok	Sem dano	Ok	Sem dano
26 a 33	Ok	Sem dano	Ok	Sem dano

O campo funcionamento onde está escrito “Ok”, significa que após os ensaios de vibração a luminária está em pleno funcionamento, acendendo normalmente, sem perda de iluminação. No campo dano, onde está escrito “sem dano” representa que a luminária não apresentou avarias após o ensaio de vibração.

5.2.1 RESULTADOS DOS TESTES MECÂNICOS

Neste ensaio são aplicadas as frequências estipuladas na norma, através do equipamento VCS diretamente nas luminárias testadas e após isso, verifica se as luminárias encontram-se em pleno funcionamento sem avarias.

Tanto para a luminária LED quanto para a luminária fluorescente não foram verificados problemas de funcionamento e/ou dano ao equipamento após o teste de vibração, estando ambas aptas para serem aplicadas na área militar naval pelo requisito de vibração.

5.3 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA

Para que pudesse ser realizada uma comparação do ponto de vista de qualidade de energia elétrica no sistema do navio, foi modelada no *software* ATP toda a planta do sistema de geração e distribuição, incluindo as cargas lineares e não lineares – conforme apresentado no Anexo 2 - Simulação da Distorção Harmônica Gerada na Rede Elétrica do Navio no *Software* ATP.

A primeira simulação realizada no ATPDRAW representa o sistema elétrico do navio atual, ou seja, são utilizadas as luminárias fluorescentes para representar o sistema principal de iluminação da embarcação.

Já na segunda simulação, a fim de comparar as tecnologias apresentadas, foram utilizadas às luminárias LED, representando todo o sistema de iluminação principal do navio.

Conforme visto no capítulo 3, para a modelagem dos componentes do circuito do navio utilizou-se à norma IEEE Std 399-1997 [50].

As luminárias foram representadas pelo modelo de carga não linear, utilizando os valores dos maiores harmônicos obtidos através dos ensaios realizados no LABLUX, conforme apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Valores dos maiores harmônicos das luminárias obtidos através de ensaios no laboratório

Ordem Harmônica	Frequência (Hz)	THD LED (%)	THD Fluorescente (%)
FUNDAMENTAL	60	4,4	7,2
3	180	1,8	0,8
5	300	0,7	5,7
7	420	1,0	2,6
9	540	1,4	1,1
11	660	0,8	1,8
13	780	1,0	0,6
15	900	0,9	0,5
17	1020	0,9	1,6
19	1140	0,9	0,4
23	1380	0,7	1,1
33	1980	0,8	0,1

Com esses de harmônicos incluídos no *software*, foram simulados os comportamentos de ambas as tecnologias no sistema elétrico do navio.

No gráfico da Figura 50 pode ser vista a comparação da distorção harmônica gerada por cada lâmpada no sistema do navio. O eixo “X” representa as maiores ordens harmônicas encontradas na simulação, e o eixo “Y” representa o valor percentual da distorção em relação à componente fundamental.

Na primeira simulação, utilizando a luminária fluorescente, obteve-se um valor de THD na ordem de 0,31651%, e na segunda simulação, com a luminária LED, o valor de THD do sistema elétrico foi de 0,2786%, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 50. Conforme esperado, a luminária fluorescente teve um maior impacto na distorção harmônica total do sistema elétrico do navio, visto que o THD dessa lâmpada já apresentou um valor superior nos ensaios em laboratório comparada com o LED.

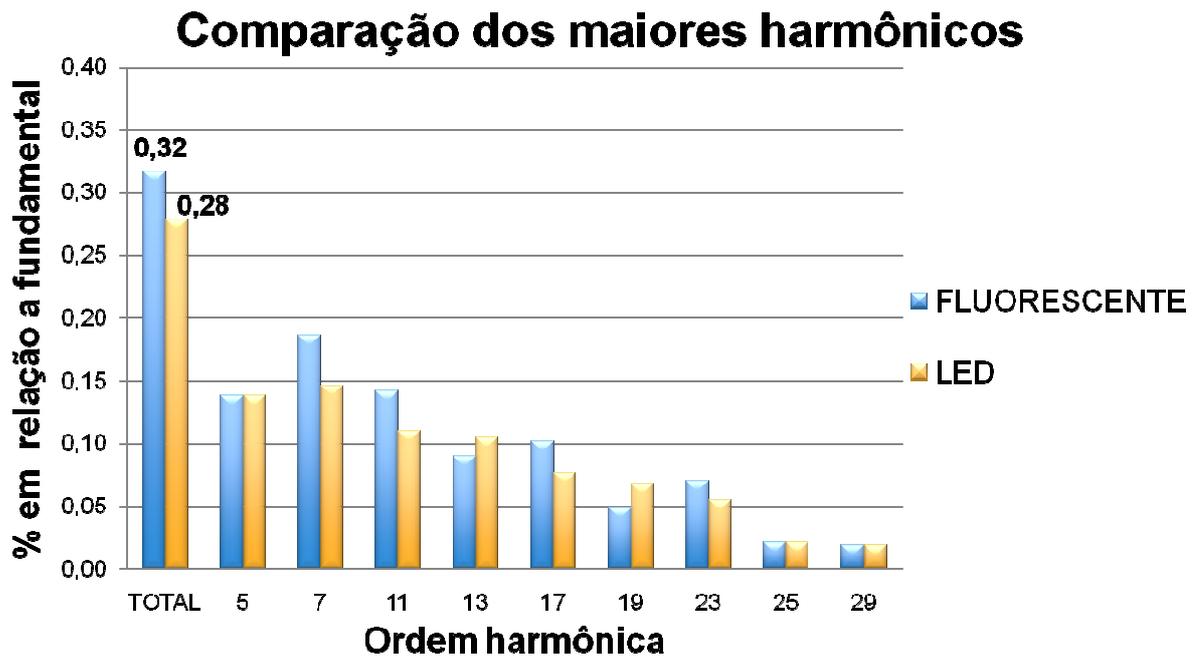


Figura 50 – Comparação dos maiores harmônicos gerados na simulação

Conforme podemos perceber a lâmpada fluorescente teve maiores valores de distorção na 7^a, 11^a, 17^a e 23^a, enquanto que o LED apresentou valores maiores na 13^a e 19^a. Com esses valores podemos perceber como as lâmpadas influenciam o sistema elétrico do navio, tendo em vista que as maiores harmônicas do sistema elétrico do navio estão semelhantes às maiores harmônicas obtidas nos testes das luminárias.

Neste capítulo foram obtidos os resultados dos ensaios propostos, através desses resultados será possível realizar uma análise mais detalhada das tecnologias, de forma que seja proposta a melhor opção de custo benefício para a Marinha do Brasil.

6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos no capítulo anterior, será realizada uma análise geral sobre diversos pontos de vistas com a finalidade de comparar as tecnologias LED e fluorescente aplicado em uma embarcação militar.

Esse capítulo será dividido em tópicos com resultados obtidos para que a comparação seja vista detalhadamente sobre diversos aspectos.

6.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para essa análise será levada em consideração os valores medidos para o fator de potência (FP) e as eficiências luminosas de cada uma das luminárias testadas.

Apesar de um bom desempenho da luminária fluorescente em relação ao fator de potência, conforme pôde ser visto na Tabela 6, o valor ainda é menor comparado com a tecnologia da luminária LED. Quanto mais próximo do valor unitário estiver o fator de potência de uma embarcação, o gerador do navio irá operar em um ponto de maior eficiência e por consequência diminuirá os níveis de emissão de poluentes [8].

Outro ponto que demonstra que a luminária LED é mais eficiente comparada com a fluorescente é a eficiência luminosa (lm/W), demonstrada na Tabela 7, onde se pode perceber que com uma potência elétrica menor, a luminária LED tem uma maior eficiência luminosa, ou seja, ela consegue iluminar uma área maior com menos gasto de energia elétrica tornando-se assim mais eficiente do ponto de vista energético.

Logo com os parâmetros analisados nesse tópico as luminárias LED levam vantagens quando comparadas com as fluorescentes, pois essa última apesar de ainda ser muito utilizada nas embarcações militares não é tão eficiente energeticamente.

6.2 REPRODUÇÃO DE CORES

Apesar de ambas as luminárias apresentarem temperatura de cor próxima de 5000K, a luminária LED apresentou uma temperatura de cor de quase 10% acima da fluorescente. A temperatura de cor está diretamente relacionada ao conforto visual e a percepção de determinadas tonalidades, sendo assim quanto maior a temperatura de cor, mais fidelíssima se torna os objetos [57].

Além disso, como visto nas Figuras 32 e 33, as lâmpadas LEDs possuem uma distribuição mais uniforme de todas as cores, apenas distoando na cor azul, que se trata de uma característica construtiva do LED branco. Ao contrário, a lâmpada fluorescente possui uma distribuição não uniforme das cores, limitando assim a aplicação desse tipo de lâmpadas em determinados locais.

Com relação ao Índice de Reprodução de Cor (IRC), a luminária LED possui um IRC de 84, conforme visto na Tabela 7, com isso a mesma se enquadra na faixa onde se tem uma boa reprodução de cores, superiores a 80, já a luminária fluorescente se enquadra na faixa de reprodução de cor razoável, pois seu IRC foi igual a 69, ficando entre 60 e 80 [56].

A luminária LED apresentou mais uma vez índices superiores à fluorescente, tanto no IRC, quanto na temperatura de cor onde a luminária LED também apresentou um valor relativamente maior comparado com a fluorescente. Sabendo-se que a temperatura de cor está relacionada com o conforto visual, e que quanto maior a temperatura de cor, maior a irritabilidade e maior o índice de atenção na execução de tarefas, pode-se concluir que a luminária LED pode ser mais bem utilizada em ambientes onde é necessária uma maior atenção, assim como ambientes de trabalho. Logo a luminária LED seria melhor aplicada no meio naval, onde se requer atenção dos tripulantes durante as viagens e exercícios de combate.

6.3 COMPARAÇÃO DE NÍVEL DE ILUMINÂNCIA

Para que fosse possível realizar uma comparação dos níveis de iluminâncias geradas pelas tecnologias testadas, foi utilizada a curva ies obtida durante os ensaios no laboratório em um *software* computacional – DIALUX. Com a curva ies correspondente a cada luminária testada e os parâmetros exigidos em norma [52], foi possível realizar uma simulação de como se comportariam as luminárias nos compartimentos do navio, conforme pode ser visto no Anexo 1.

Através dos resultados obtidos no *software* DIALUX e apresentados na Tabela 8, pode-se analisar que de acordo com os níveis de iluminâncias exigidos em norma, os LEDs necessitam de uma quantidade menor de luminárias distribuídas no navio, pois além de possuir um fluxo luminoso maior, possui também uma eficiência luminosa de 49,08% maior comparada com a luminária fluorescente.

Além disso, pode ser visto no Anexo 1 que a distribuição luminosa do LED é melhor pois no cenários 2 pode-se perceber que para os compartimentos analisados o valor de iluminância média é maior quando comparada com o cenário 1, onde foram utilizadas luminárias fluorescentes.

Com isso as luminárias LEDs se mostraram mais eficientes também no aspecto de iluminância, pois além de utilizarem uma menor quantidade de luminária para iluminar um mesmo compartimento, essa quantidade ainda possui uma melhor distribuição luminosa.

6.4 COMPARAÇÃO DA INTERFERÊNCIA MAGNÉTICA

Nos testes de EMC, verificou-se que embora as lâmpadas de LED possuam valores de pico da tensão de perturbação gerados no terminal neutro, Figura 31, muito próximos das curvas estabelecidas na norma [34], a mesma está dentro dos valores estabelecidos, não ocasionando problemas para o requisito de interferência magnética.

As lâmpadas fluorescentes não são obrigadas a realizar os testes de interferência eletromagnética para sua certificação, porém nesse trabalho foram realizados somente para fins de comparação, e assim verificou-se que essas lâmpadas apresentaram valores de perturbações eletromagnéticas radiada pelo campo elétrico acima dos valores permitidos pela norma CISPR-15 [34], conforme visto na Tabela 20.

Logo, as lâmpadas LED mais uma vez apresentaram um desempenho melhor que as fluorescentes nas interferências eletromagnéticas geradas, requisito muito importante em navios militares, pois além de afetar a qualidade de energia elétrica, também afeta operações militares nas quais os navios precisam ficar quase que indetectáveis perante ao inimigo.

6.5 COMPARAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Através dos valores dos harmônicos obtidos nos ensaios elétricos no LABLUX, foi simulado no *software* ATP o comportamento das lâmpadas no sistema elétrico do navio para que pudessem ser verificados os impactos que poderiam ocorrer na qualidade de energia elétrica de bordo.

Por se tratar de um navio pequeno, aproximadamente 500 toneladas, a qualidade de energia elétrica não é um grande problema, visto que o sistema de distribuição dessa

embarcação possui poucas cargas não lineares, que são os grandes causadores dos harmônicos no sistema.

Com isso verificou-se que os resultados obtidos não causam maiores problemas para essa classe de navio, que tem como limite de distorção harmônica 5% [44], contudo, pode-se perceber que as lâmpadas fluorescentes obtiveram um desempenho inferior às lâmpadas LED, apresentando um valor de THD igual a 0,31651% comparado com o THD de 0,2786% das lâmpadas LED.

6.6 COMPARAÇÃO ECONÔMICA

Nessa comparação, foram levantados os valores de mercado das lâmpadas, a vida útil delas e o valor do combustível utilizado na geração de energia elétrica do navio. Uma vez que todos os fatores de custo individuais são calculados, eles são somados para calcular o custo total do ciclo de vida do sistema de iluminação ao longo dos 30 anos de vida de um navio da Marinha típico.

Primeiro, sabendo a vida útil das lâmpadas (em horas), foi possível calcular a quantidade de sobressalentes necessários ao longo da vida do navio. Para esses cálculos foi considerado que o sistema de iluminação do navio terá um fator de utilização de 80% e irá operar 24 horas, 365 dias durante 30 anos. Esses cálculos podem ser vistos na Tabela 23.

Tabela 23 – Cálculo de Sobressalente

Tipo de Lâmpada	Potência (W)	Fator Utilização	Quantidade Luminárias	Operação (Horas)	Quantidade de trocas de lâmpadas - Ciclo Operação do Navio (30 anos)
LED	18,20	0,8	202	7008	8,00
Fluorescente	37,90				21,00

Para o cálculo do consumo de combustível, primeiro verifica-se pelo modelo do gerador, qual seria o seu consumo, através da seguinte fórmula:

$$V = (P_B \cdot b_e) \quad (1)$$

Onde:

V – Volume de combustível (litros)

P_B – Potência do motor na velocidade requerida (kW)

b_e – Consumo específico (kg/kWh)

Com o volume calculado é possível verificar o custo em reais (R\$) de energia elétrica do navio através da fórmula:

$$\text{Valor Consumo de Energia (R\$)} = \frac{\left(\frac{P_B}{V}\right)}{\text{Preço do litro}} \quad (2)$$

Tabela 24–Preço da energia elétrica gerada no navio

P _B (kW)	b _e (kg/kWh)	Volume (L)	kWh/L	Preço do litro (R\$)	Valor Consumo de Energia (R\$)
382,5	0,2201	84,19	4,54	3,28	1,39

Por fim, com os dados obtidos é possível analisar do ponto de vista econômico os custos totais de consumo de energia e sobressalente ao longo do ciclo de vida do navio. Essa análise pode ser vista na Tabela 25.

Primeiro calcula-se o valor de investimento inicial para aquisição das luminárias, os valores utilizados foram obtidos através de orçamento do fornecedor. Esses valores demonstram que a tecnologia LEDs requer um investimento inicial de 33% a mais quando comparadas com a tecnologia fluorescente.

Para o cálculo da quantidade de sobressalente utilizou-se os valores obtidos na Tabela 23, onde leva em consideração a vida útil estimada para cada tipo de lâmpada utilizada. De posse da quantidade de trocas necessárias para cada tipo de lâmpada, pegou-se esse valor e multiplicou pelo valor, em reais, de mercado de cada lâmpada de forma a obter o custo com as lâmpadas sobressalentes necessárias para o navio. Além disso, para verificar o valor do custo com o sobressalente ao longo dos 30 anos de operação do navio é utilizada a fórmula matemática para o cálculo do valor futuro.

$$VF = VP. (1 + i)^n \quad (3)$$

Onde:

VF – Valor Futuro (R\$)

V – Valor Futuro (R\$)

i – Taxa de Juros (12% ao ano)

n – Número de Período (30 anos)

Para obter o valor do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação principal do navio foi utilizado o valor encontrado do custo de energia elétrica multiplicado pela potência elétrica consumida pelo sistema de iluminação principal. Com o valor do consumo anual, também foi gerado uma estimativa, utilizando a fórmula da equação (2) para o consumo para o ciclo de operação do navio.

Tabela 25 – Análise econômica dos custos gerados com iluminação

	Fluorescentes (2X20W)	LED (2X10W)	VARIAÇÃO
Custo Inicial do Navio (R\$)	14.140,00	42.420,00	28.280,00
Vida útil (horas)	10.000,00	25.000,00	15.000,00
Consumo de Energia (kWh) - Ciclo de Operação Anual	53.651,85	25.764,21	27.887,64
Custo de energia (R\$) - - Ciclo de Operação Anual	74.317,45	35.688,06	38.629,39
Custo de energia (R\$) - - Ciclo de Operação Ciclo de Vida	2.226.544,95	1.069.211,56	1.157.333,39
Custo de Lâmpadas Sobressalentes (R\$)	148.470,00	169.680,00	21.210,00
Custo de Lâmpadas Sobressalentes (R\$) - Ciclo de Operação do Navio	4.448.149,64	5.083.599,59	635.449,95
Custo de Energia e Lâmpadas Sobressalentes (R\$) - Ciclo de Operação do Navio	6.674.694,58	6.152.811,14	521.883,44

Através dos valores obtidos na Tabela 25 verifica-se que apesar do custo inicial do LED ser aproximadamente 33% maior, seu custo inicial é diluído ao longo do ciclo de vida do navio devido os LEDs consumirem em torno de 50% menos energia elétrica e por possuírem uma vida útil 40% maior que as lâmpadas fluorescentes.

Nesse capítulo foi possível perceber a superioridade das luminárias LED sobre os aspectos técnicos e econômicos, ou seja, apesar do elevado custo inicial esse valor é diluído durante todo o ciclo de operação do navio, além de ser uma tecnologia com um menor impacto ambiental.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou as implicações sobre aspectos técnicos e econômicos, para um navio patrulha de pequeno porte da Marinha do Brasil, da substituição da tecnologia de iluminação das lâmpadas fluorescente, que é atualmente utilizado em toda frota por lâmpadas LED que apresentam um ótimo desempenho técnico e econômico.

Os benefícios inerentes à utilização da tecnologia LED de embarcações foram evidenciados a partir de testes realizados em ambas as tecnologias. O primeiro fator verificado foi que com a utilização das lâmpadas de LEDs, a potência referente à iluminação reduz em 49,08%, impactando diretamente na geração de energia elétrica, que demandará menos combustível para suprir as cargas elétricas da embarcação.

Nos resultados obtidos nos ensaios fotométricos também foram evidenciados a superioridade dos LED, pois esta tecnologia apresentou uma melhor temperatura de cor, índice de reprodução de cor, eficiência luminosa, fluxo luminoso, fator de potência e menores índices de distorção harmônica. Esses fatores demonstram que as lâmpadas LEDs trazem um melhor conforto visual para a tripulação, além de uma fidelização dos objetos, ponto importante quando se trata de um navio de guerra, onde existem locais em que há uma necessidade de execução de trabalhos que requerem atenção e certeza para que não haja erros durante a execução das tarefas.

Apesar da característica pontual da distribuição da intensidade luminosa dos LEDs, as curvas polares quando vistas no *software* DIALUX tornam possível perceber que para os limites impostos por norma é necessário um menor número de luminárias LEDs para iluminar uma mesma área. Outro ponto observado foi que sobre aspecto de rendimento luminoso (lm/W), a luminária LED apresentou rendimento aproximadamente 50% maior quando comparada com as lâmpadas fluorescentes deixando assim os LEDs em vantagem também sobre esse aspecto.

Quanto ao ensaio de interferência eletromagnética, a luminária LED não ultrapassou nenhum limite imposto pela norma [58], diferente da luminária fluorescente que seria reprovada no ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas, onde obtiveram resultados superiores aos impostos pela norma CISPR-15 [34]. Através desses resultados é possível perceber mais uma vez que o LED obteve um bom resultado quando comparado com a luminária fluorescente, e este aspecto é de grande importância para navios militares, onde a

interferência eletromagnética deve ser a menor possível para que a mesma não seja detectada por inimigo quando em situação de operação em patrulha ou combate.

Para o teste de vibração, ambas as tecnologias obtiveram o mesmo resultado e não apresentaram problemas de funcionamento nem tão pouco dano nas luminárias.

Na análise de qualidade de energia, embora a luminária fluorescente possuir um THD aproximadamente 40% maior que a luminária LED, quando avaliamos utilizando o *software* ATP à inclusão das luminárias na rede elétrica geral do navio, a distorção no sistema não causa grande problema do ponto de vista de qualidade de energia elétrica. Porém ainda assim a distorção da luminária fluorescente é aproximadamente 12% maior que o LED. Com isso pode-se dizer que sobre o aspecto de qualidade de energia elétrica a luminária LED causa uma menor distorção harmônica no sistema do navio, melhorando assim a qualidade da tensão no aspecto relacionado ao fornecimento e à disponibilidade da energia elétrica de bordo.

Apesar da demanda de energia elétrica do sistema de iluminação principal ser cerca de 5% da demanda total do navio, e o custo inicial de aquisição das luminárias LED ser elevado comparado com as luminárias fluorescentes, concluí-se que do ponto de vista econômico ao longo da vida útil do navio esse custo é diluído, pois com essa substituição seu custo operacional, incluindo consumo de combustível e sobressalentes, no final dos 30 anos de operação é menor 10% quando comparado com a operação com as luminárias fluorescentes.

Sendo assim, para o navio em que o estudo de caso se baseou, a troca do sistema de iluminação trará vários benefícios caso sua implementação seja realizada.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

A busca por meios mais eficientes tem se tornando um grande desafio em diversos segmentos industriais, assim como a indústria militar naval, que tem um grande potencial do ponto de vista energético.

Este trabalho é apenas um começo de como transformar a frota dos navios da Marinha do Brasil em navios mais eficientes. O sistema de iluminação representa 5% da demanda elétrica de um navio, restam ainda 95% de carga com potencial de redução. Grande parte dessas cargas é encontrada em motores, que muitas vezes possuem um baixo rendimento. Aumentar o rendimento desses motores significa reduzir a energia gasta para mantê-los em funcionamento.

Como trabalhos futuros vislumbram-se além da avaliação da aplicação de novas tecnologias de motores em embarcações militares, estudos mais detalhados com respeito a impacto de drives no sistema de distribuição, avaliação de novas tecnologias de proteção com limitadores supercondutores resistivos, aplicação de fios/cabos supercondutores no sistema de distribuição que poderiam impactar diretamente com melhoria da densidade de corrente conduzida por seção transversal, entre outros.

Além disso, ainda dentro do tema lâmpadas LED, pode-se verificar o comportamento sobre o efeito da tensão nos barramentos dos quadros elétricos quando inserido essa tecnologia na rede elétrica do navio.

Bibliografia

- [1] MCCOY, M. Reducing Fleet Energy Consumption. **NAVSEA**. [S.l], 2012. Disponível em:< <http://navysustainability.dodlive.mil/files/2012/01/NAVSEA-Shipboard-Efficiencies-Currents-Summer-12.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2018.
- [2] MORTON, J.F., TRUVER, S.C. The Great Green Fleet Naval Warfighting Imperatives for Energy Security. **Defense AT&L**, nov./dec. 2011. Disponível em:< http://www.gryphonlc.com/images/Morton_Truver_GreenFleet_DAUATL.pdf>. Acesso em: 21 maio 2018.
- [3] ANEXO I : regras para a prevenção da poluição por óleo. **MARPOL**, [S.l], 1973-1978. Disponível em: <https://www.ccaimo.mar.mil.br/sites/default/files/marpol_anexo1-11ago.pdf>. Acesso em: 10 abr 2018.
- [4] LOVINS, A. B. et al. **Energy efficiency survey aboard USS princeton CG-59**. Rocky Mountain Institute, 2001. Disponível em: <https://www.rmi.org/wp-content/uploads/2017/06/RMI_Energy_Efficiency_Survey_Aboard_2001.pdf> Acesso em: 23 abr. 2018.
- [5] SARRIS, E. **Naval Ship Propulsion and Electric Power System Selection for Optimal Fuel Consumption**. Naval Engineer and Master of Science in Engineering and Management at the Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, jun., 2011.
- [6] BOVERI, A. et al. Stochastic approach for power generation optimal design and scheduling on ships. **Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe) 2017 IEEE PES**, Torino, 2017,p. 1-6.
- [7] BROOKS, M. S.; TRIBBLE, A. L.Stakeholder values and perspectives when implementing led lights on navy ships. Master of business administration from the Naval Postgraduate School, jun., 2014
- [8] OLIVEIRA, G. S. et al. Power quality of LED lamps. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP)**, 17 out. 2016.

- [9] FREYMILLER , A. T. **LED shipboard lighting**: a comparative analysis, Master of business administration from the Naval Postgraduate School, dez., 2009.
- [10] BRAVO, R. J.; ABED , N. Y. **Experimental Evaluation of the Harmonic Behavior of LED Light Bul.** IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, Canada, jul. 2013.
- [11] KIJKANJANAPAIBOON, K.; KRETSCHMER, T. W.; CHEN, L. LED's Luminous Flux Lifetime Prediction Using a Hybrid Numerical Approach. International conference on thermal, mechanical and multi-physics simulation and experiments in microelectronics and microsystems, 2015.
- [12] DEW, N.; ATEN, K.; FERRER G. How many admirals does it take to change a light bulb? Organizational innovation, energy efficiency, and the United States Navy's battle over LED lighting. **Energy Research & Social Science**, n. 27, 2017.
- [13] MOURA, M., MOTA; A., NOYA, M. Considerações e análises em projetos de iluminação utilizando a tecnologia LED.In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, ago., 2015.
- [14] CIZEK, C. J. Shipboard LED lighting a business case analysis, Master of Business Administration, Naval Postgraduate School, Monterey. **Naval Postgraduate School**, California, dez., 2009.
- [15] SOLÀ , J. C.; SALICHS, M. Study and Characterization of Waveforms From Low-Watt (<25 W) Compact Fluorescent Lamps With Electronic Ballasts. **IEEE transactions on power delivery**, [S.l.], v. 22, n. 4, out.,2007.
- [16] RODRIGUES, T. A. et al. Impact of Electric Propulsion on the Electric Power Quality of Vessels. **Electric Power Systems Research**, v.155, p. 350-362, fev. 2018.
- [17] SULZBERGER, C. First Edison Lights at Sea: the SS Columbia Story, 1880-1907 [History]. **IEEE Power and Energy Magazine**, [S.l.], v. 13, p. 92-101, jan.-fev., 2015.

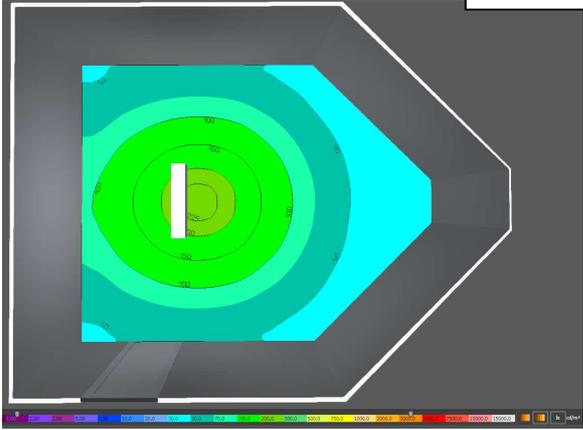
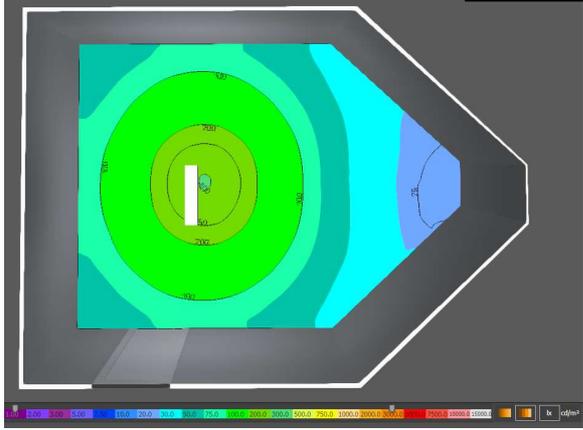
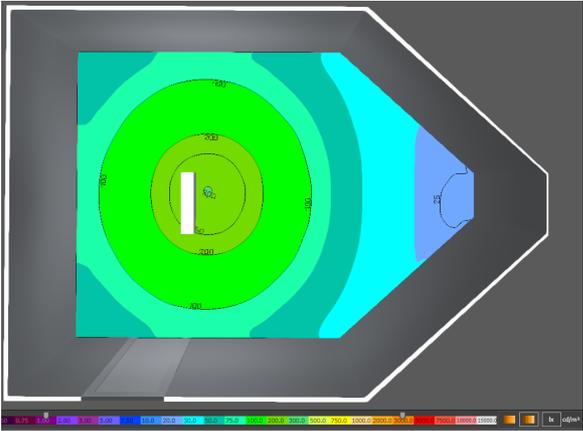
- [18] BEDI, J., Thomas Edison's Inventive Life. Disponível em:<<http://invention.si.edu/thomas-edisons-inventive-life>>. Acesso em: 22 jul. 2018.
- [19] WANDERLEY, T.C. A evolução das lâmpadas e a grande revolução dos LEDs. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, 8 ed., v. 01/2014, dez., 2014.
- [20] CONEXLED. Disponível em:<<https://www.conexled.com.br/sobre/led/>>. Acesso em: 22 jul. 2018.
- [21] GEREFFI, G.; LOWE, M. Manufacturing Climate Solutions: LED Lighting. **Manugacturing Climate Solution; CiteSeerrX**, [S.l], 2008.
- [22] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). (2009) HEDlight. Disponível em:<[https://www.darpa.mil/attachments/\(2G8\)%20Global%20Nav%20-%20About%20Us%20-%20Budget%20-%20Budget%20Entries%20%20FY%2009%20\(Approved\).pdf](https://www.darpa.mil/attachments/(2G8)%20Global%20Nav%20-%20About%20Us%20-%20Budget%20-%20Budget%20Entries%20%20FY%2009%20(Approved).pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2018.
- [23] DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-DTL-16377J**: Detail specification fixtures, lighting and associated parts, 30 jun. 2014.
- [24] C. HARRESS, Navy secretary ray mabus outlines a more self-Sufficient, efficient future for the fleet, **International Business Times**, maio 2014. Disponível em:<<http://www.ibtimes.com/navy-secretary-ray-mabus-outlines-more-self-sufficient-efficient-future-fleet-1589620>> Acesso em: 20 abr. 2018.
- [25] Energy Focus, U.S. Navy Case Study, 2018. Disponível em:<<https://www.energyfocus.com/resource/mission-ready-navy/>> Acesso em: 22 abr. 2018.
- [26] BOWERS P. et. al. Analyzing Liefcycle Lighting Costs on Hospital Ship USNS Comfort NPS Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey CA, 2013.
- [27] Brasil. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL-INMETRO, Portaria nº. 489, de 8 de dezembro de 2010.

- [28] Brasil. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL-INMETRO, Portaria nº. 389, de 25 de agosto de 2014.
- [29] Brasil. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL-INMETRO, Portaria nº. 143, de 13 de março de 2015.
- [30] Regent Lighting Solutions. Disponível em: <<https://regentlight.co.za/about-us/photometric-testing/>>, Acesso em: 22 jul. 2018.
- [31] LED Professional. Disponível em: <<https://www.led-professional.com/products/led-production-test-equipment/the-world-leading-high-accuracy-arrayspectroradiometer-haas-2000-3000>>, Acesso em: 22 jul. 2018.
- [32] Direct Industry. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/pacific-power-source/product-25051-121999.html>>, Acesso em: 22 jul. 2018.
- [33] YOKOGAWA. Disponível em: <<https://tmi.yokogawa.com/br/solutions/products/power-analyzers/wt210wt230-digital-power-meters/>>, Acesso em: 22 jul. 2018.
- [34] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC CISPR-15**, Limits and Methods of Measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment, 2013.
- [35] DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-STD-461-G**: Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 11 dez. 2015.
- [36] Laplace Instruments LTD. Disponível em: <<https://www.laplace.co.uk>>, Acesso em: 22 jul. 2018.
- [37] PAUL, C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [38] PROCEL. Manual de Iluminação. Rio de Janeiro, Ago. 2011.

- [39] Fluxo luminoso. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluxo_luminoso.jpg> Acesso em: 22 jul. 2018.
- [40] PHILIPS. Temperatura de Cor. Disponível em: <<https://www.philips.com.br/c-m-li/advice-on-lighting-ideas/light-bulb-color-temperature>> Acesso em: 22 jul. 2018.
- [41] LEÃO, R.P.S., et al. Harmônicos em Sistemas Elétricos, Elsevier, 2014
- [42] DUGAN, R.C., et al. Electrical Power Systems Quality, 2.ed., McGraw-Hill, 2004
- [43] MOYA, S. E. et. al. Frequency and Total Harmonic Distortion Estimation Based on Adaptive Filters, IEEE Latin America Transactions, vol. 11, nº. 1, fev. 2013.
- [44] American Bureau of Shipping — ABS, Guidance Notes on Control of Harmonics in Electrical Power Systems, 2006.
- [45] DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-STD-462D**: Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics, 11 january 1993.
- [46] DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-STD463A**: Definitions and System of Units, Electromagnetic Interference and Electromagnetic Compatibility Technology, 01 june 1977.
- [47] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60533:2015**, Electrical and electronic installations in ships - Electromagnetic compatibility (EMC) - Ships with a metallic hull.
- [48] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000**, Electromagnetic Compatibility (Emc).
- [49] DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-STD-167-1(SHIPS)**:Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment, 2 november 2005.
- [50] **IEEE Std 399-1997**. IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis.
- [51] ARRILAGA, J.; WATSON, N. R. Power system harmonics.2 ed.,University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003.

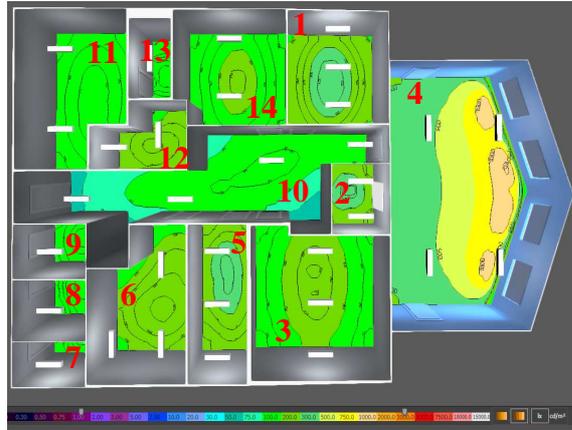
- [52] American Bureau of Shipping — ABS, Guide for Crew Habitability on Offshore Installations, 2016.
- [53] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-2:2008**, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).
- [54] DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-STD-1399/300A**: Interface Standard for Shipboard Systems (Section 300a) Electric Power, Alternating Current, 13 out. 1987.
- [55] DA COSTA, G. J. C. Iluminação Econômica, 4.ed, EDIPUCRS, Porto Alegre 2006.
- [56] FREITAS, P.C.F., Luminotécnica E Lâmpadas Elétricas, Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica. Disponível em: <<http://www.ceap.br/material/MAT1511201005209.pdf>> Acesso em 22 jul. 2018.
- [57] BALEJA, R., SUMPICH, J., BOS, P., HELSTYNOVA, B., SOKANSKY, K., NOVAK, T., Comparison of LED Properties, Compact Fluorescent Bulbs and Bulbs in Residential Areas, **16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**, 2015.
- [58] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-4-7: 2007** Electromagnetic Compatibility (EMC) - General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, 2007.

ANEXO 1 – SIMULAÇÃO DOS NÍVEIS DE ILUMINAMENTO DOS COMPARTIMENTOS DO NAVIO ATRAVÉS DOS ARQUIVOS .IES GERADOS NOS TESTES E APLICADOS NO SOFTWARE DIALUX

CONVÉS 02	
CENÁRIO 1	 <p>Média = 90,4 lux</p>
CENÁRIO 2	 <p>Média = 104 lux</p>
CENÁRIO 3	 <p>Média = 104 lux</p>

CONVÉS 01

CENÁRIO 1



CENÁRIO 2



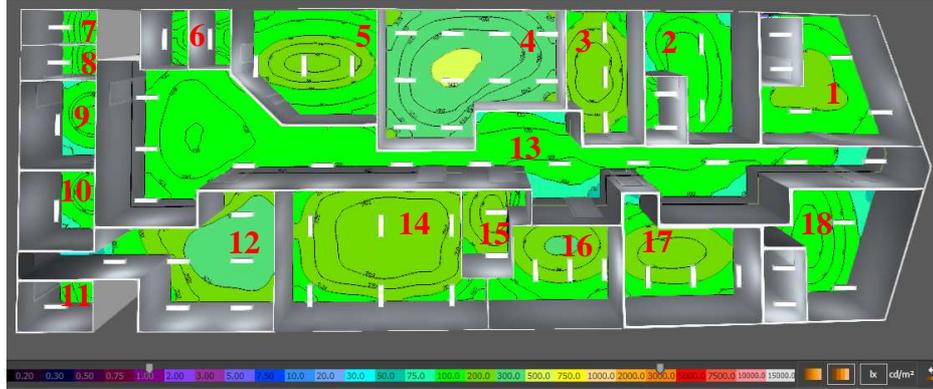
CENÁRIO 3



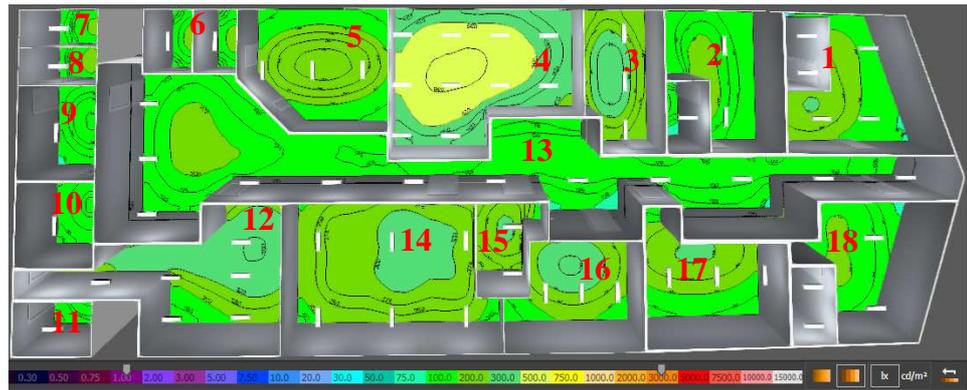
CONVÉS 01							
		CENÁRIO 01		CENÁRIO 02		CENÁRIO 03	
Compartimento	Illuminamento Médio Requerido (Lux)	Quantidade Luminárias	Illuminamento Médio (Lux)	Quantidade Luminárias	Illuminamento Médio (Lux)	Quantidade Luminárias	Illuminamento Médio (Lux)
1	200	3	273	3	326	2	223
2	200	2	295	2	362	2	362
3	150	3	192	3	226	2	156
4	500	4	565	4	598	4	598
5	200	3	283	3	322	2	227
6	200	3	224	3	273	3	273
7	50	1	161	1	192	1	192
8	100	1	146	1	177	1	177
9	100	1	151	1	186	1	186
10	100	4	103	4	131	4	131
11	100	2	147	2	169	2	169
12	200	2	234	2	274	2	274
13	100	1	149	1	188	1	188
14	100	2	174	2	205	1	109

CONVÉS 1

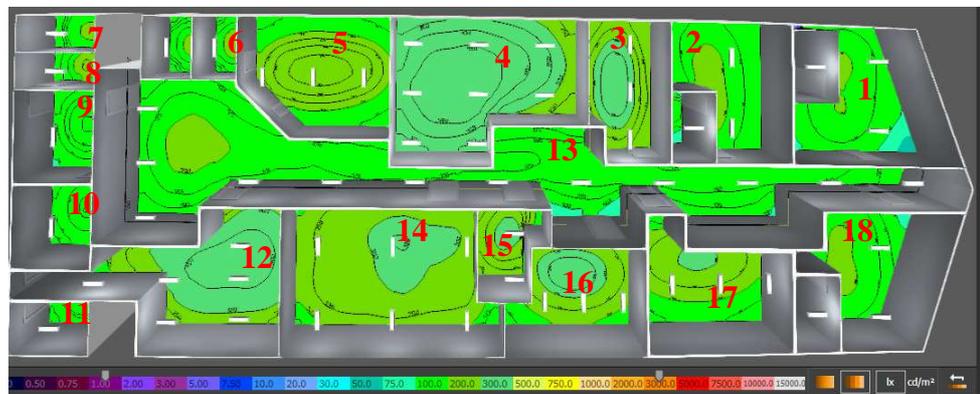
CENÁRIO 1



CENÁRIO 2



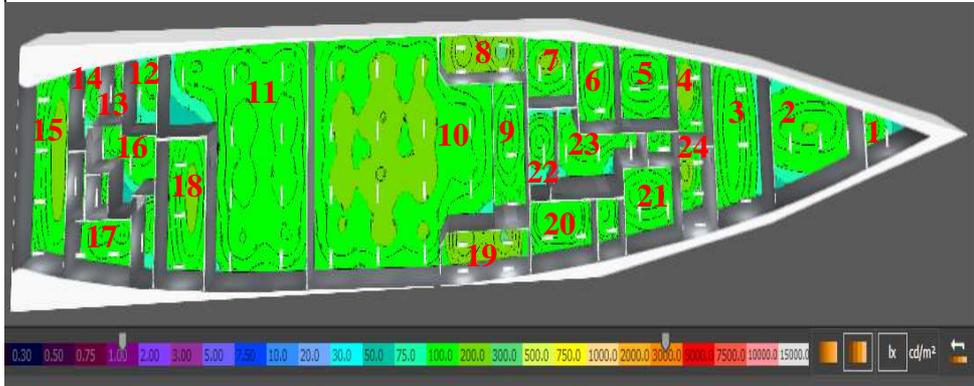
CENÁRIO 3



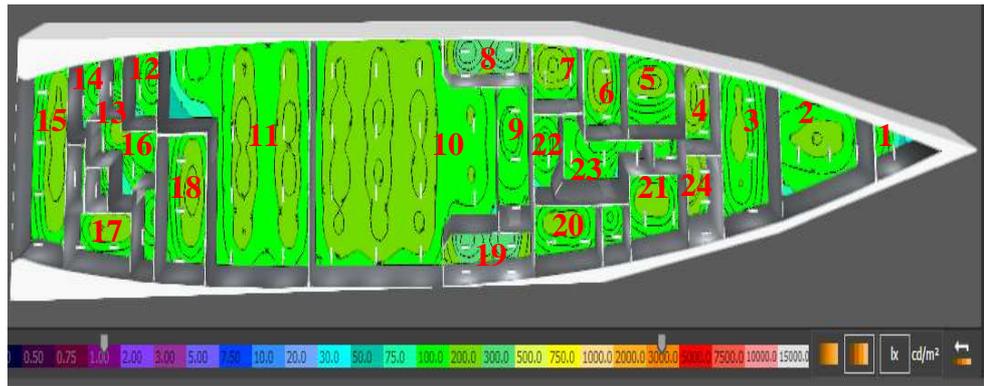
CONVÉS 1							
		CENÁRIO 01		CENÁRIO 02		CENÁRIO 03	
Compartimento	Iluminamento Médio Requerido (Lux)	Quantidade Luminárias	Iluminamento Médio (Lux)	Quantidade Luminárias	Iluminamento Médio (Lux)	Quantidade Luminárias	Iluminamento Médio (Lux)
1	100	5	175	5	199	3	146
2	100	4	149	4	175	3	130
3	200	3	227	3	281	3	281
4	300	10	418	10	498	8	396
5	150	3	187	3	219	3	219
6	100	1	155	1	188	1	188
7	100	1	149	1	183	1	183
8	100	1	152	1	188	1	188
9	100	1	115	1	137	1	137
10	100	1	117	1	142	1	142
11	100	1	140	1	168	1	168
12	200	6	236	6	292	6	292
13	100	11	128	11	161	11	161
14	200	6	230	6	267	6	267
15	200	2	223	2	262	2	262
16	200	3	216	3	216	3	216
17	150	3	195	3	221	2	151
18	100	4	150	4	176	3	130

CONVÉS 2

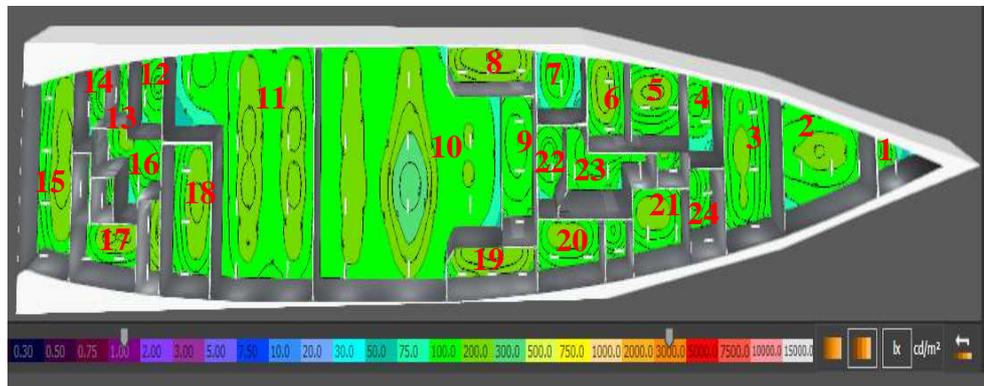
CENÁRIO 1



CENÁRIO 2



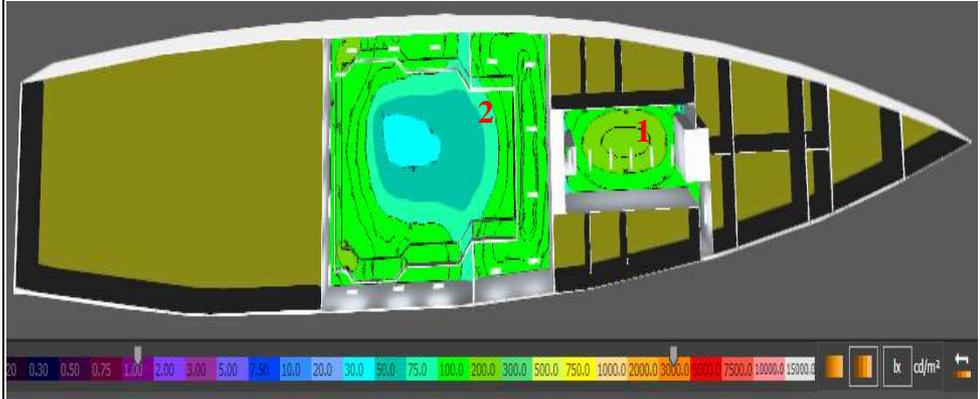
CENÁRIO 3



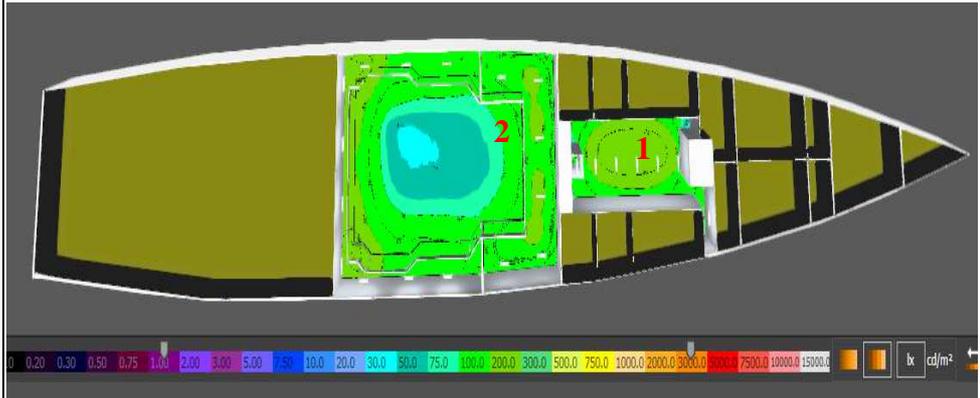
CONVÉS 2							
		CENÁRIO 01		CENÁRIO 02		CENÁRIO 03	
Compartimento	Iluminamento Médio Requerido (Lux)	Quantidade Luminárias	Iluminamento Médio (Lux)	Quantidade Luminárias	Iluminamento Médio (Lux)	Quantidade Luminárias	Iluminamento Médio (Lux)
1	100	1	110	1	129	1	129
2	100	3	137	3	157	3	157
3	100	3	138	3	159	3	159
4	100	2	182	2	213	1	115
5	100	2	143	2	170	2	170
6	100	2	160	2	187	2	187
7	100	2	174	2	204	1	109
8	200	4	252	4	311	3	237
9	100	3	141	3	161	3	161
10	150	14	185	14	215	10	185
11	100	9	150	9	176	9	176
12	100	1	105	1	123	1	123
13	100	1	134	1	134	1	134
14	100	1	110	1	131	1	131
15	150	4	165	4	187	4	187
16	100	2	143	2	164	2	164
17	100	2	149	2	182	2	182
18	100	3	157	3	179	3	179
19	200	4	250	4	308	3	237
20	100	2	144	2	175	2	175
21	100	2	148	2	172	2	172

CONVÉS 3

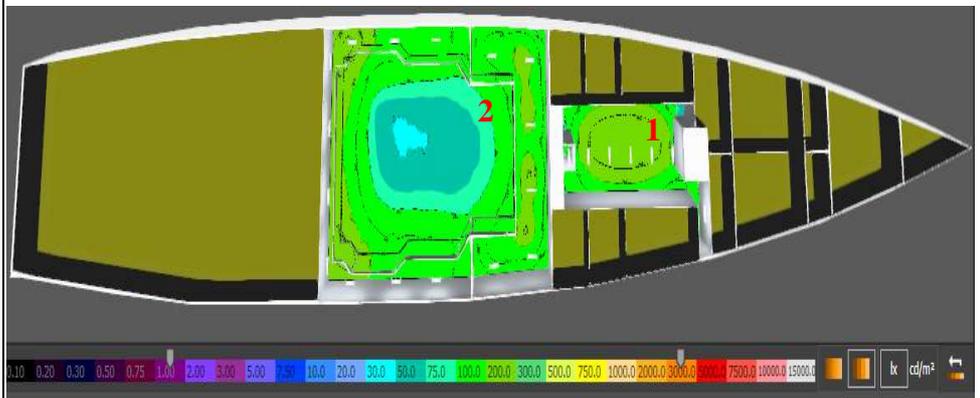
CENÁRIO 1



CENÁRIO 2



CENÁRIO 3



CONVÉS 3							
		CENÁRIO 01		CENÁRIO 02		CENÁRIO 03	
1	Compartimento						
	Iluminamento Médio Requerido (Lux)	150	179	179	202	202	202
2		100	156	156	192	192	192
	Quantidade Luminárias	5	5	5	5	5	5
	Iluminamento Médio (Lux)	179	156	156	192	192	192
	Quantidade Luminárias	16	16	16	16	16	16
	Iluminamento Médio (Lux)	156	192	192	192	192	192

ANEXO 2 – SIMULAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA GERADA NA REDE ELÉTRICA DO NAVIO NO SOFTWARE ATP.

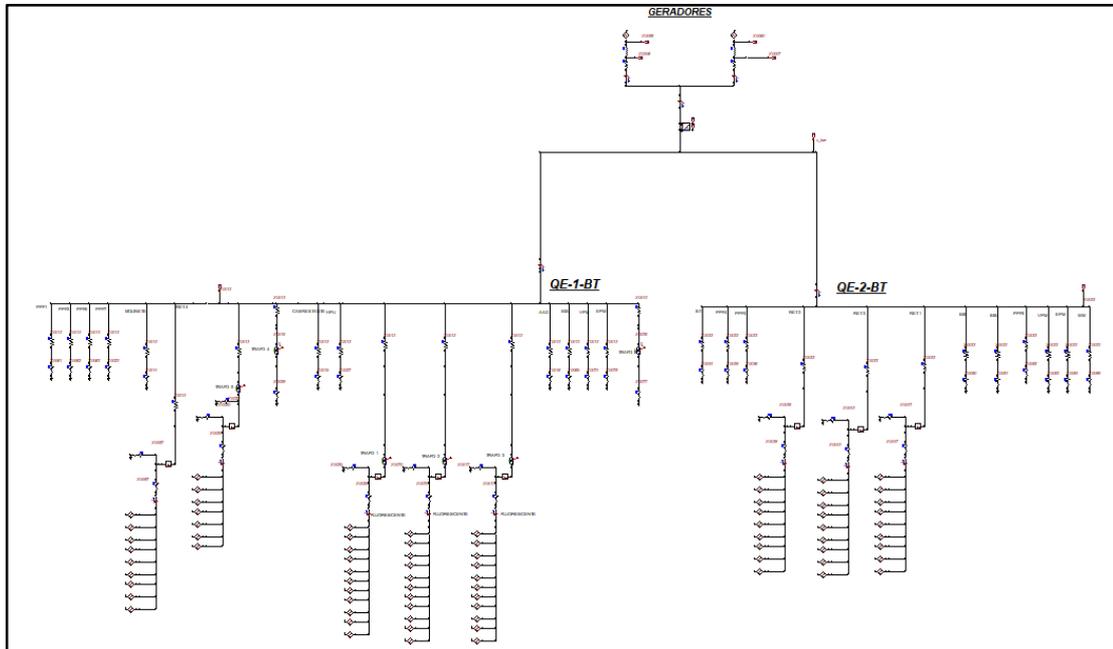


Figura 51 – Rede Elétrica Geral do Navio

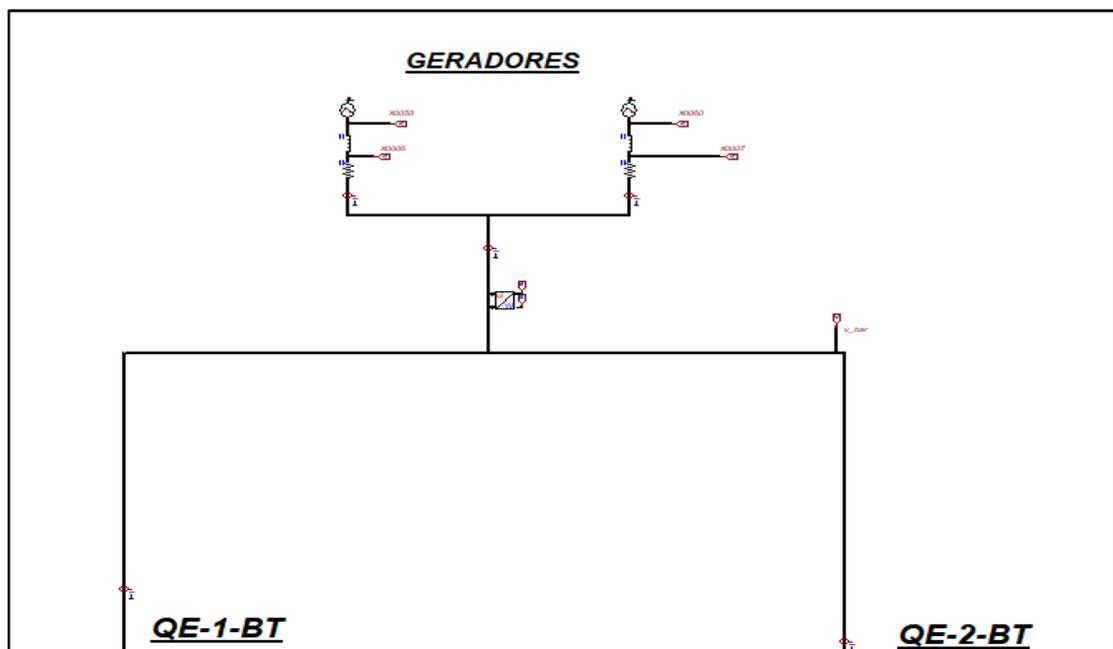


Figura 52 – Representação dos Geradores

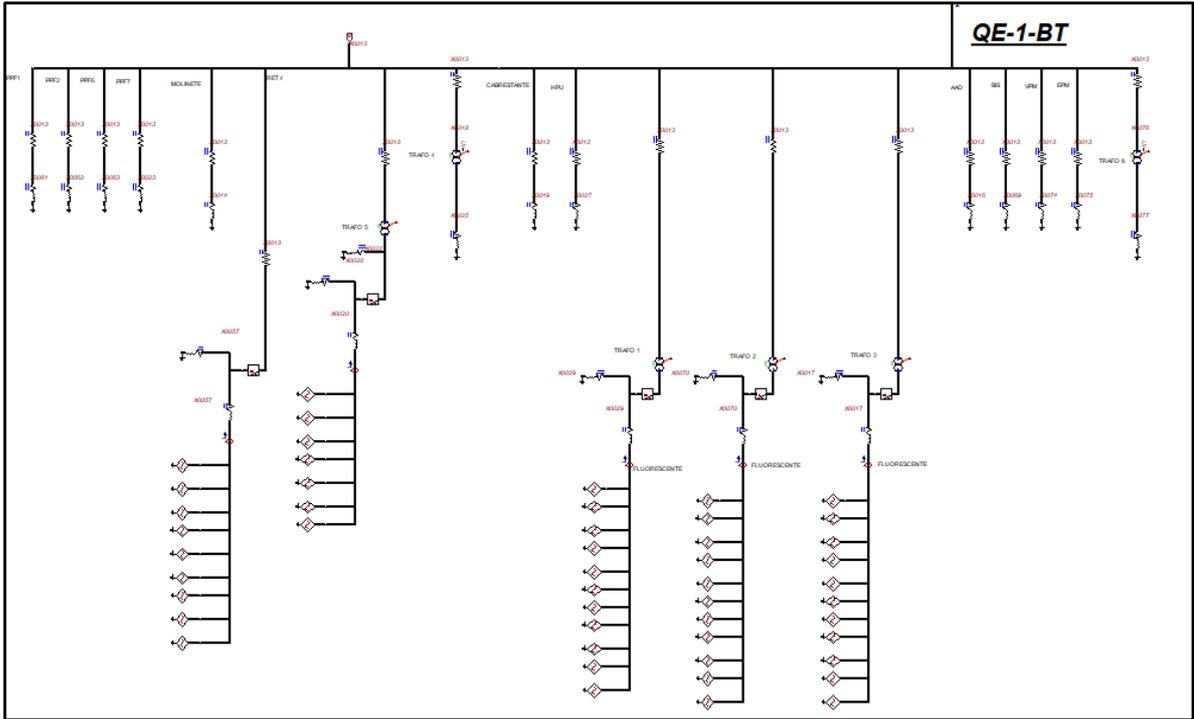


Figura 53 – Representação do Quadro Elétrico 1

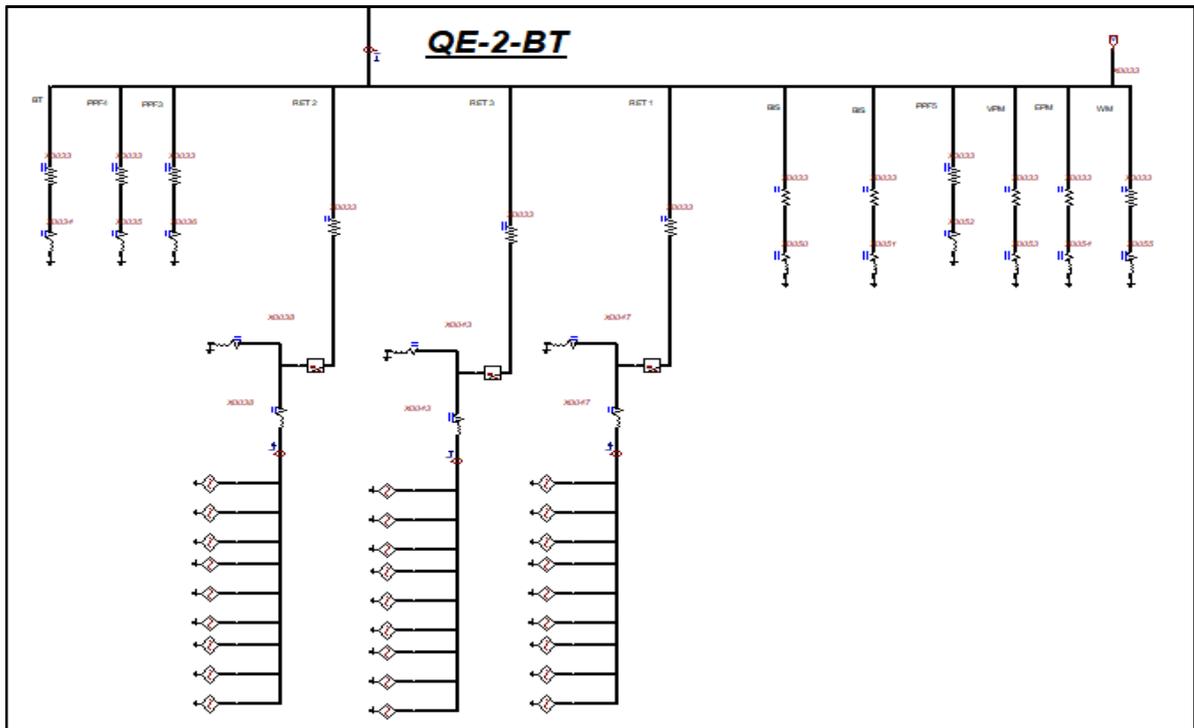


Figura 54 – Representação do Quadro Elétrico 2

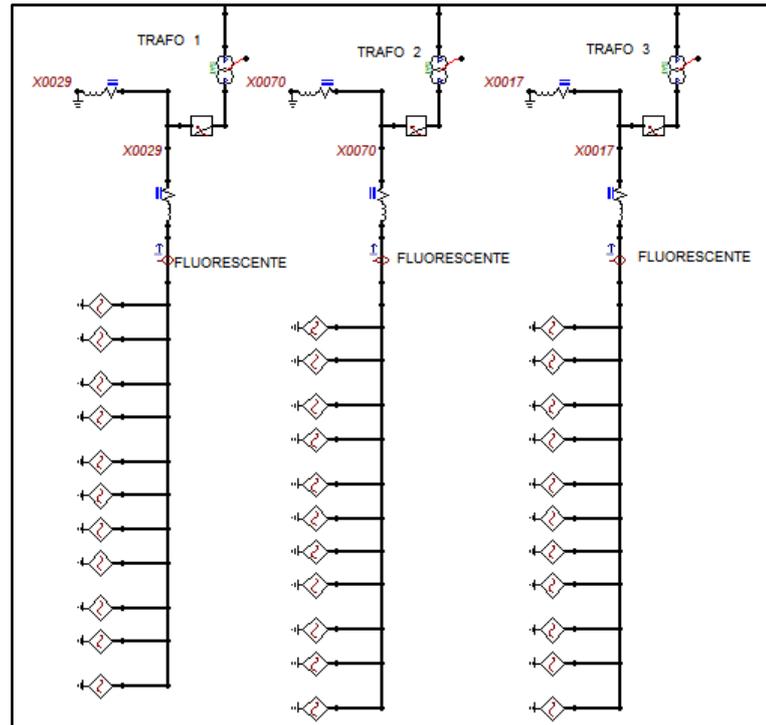


Figura 55 – Representação das Luminárias Fluorescentes

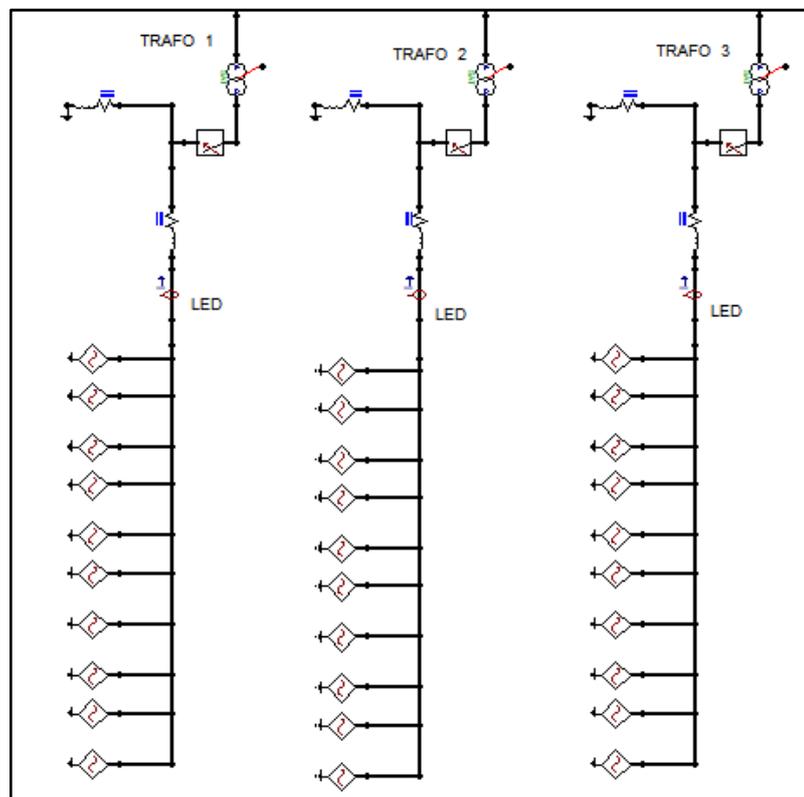


Figura 56 – Representação das Luminárias LEDs