

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

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM**  
**SISTEMA DE CONTROLE E ELETRICIDADE DE NAVIOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA E ANÁLISE DAS FRAGATAS CLASSE**  
**“NITERÓI”.**



**PRIMEIRO-TENENTE LUIZ EDUARDO DE BRITO MARINHO NASCIMENTO SILVA**

Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE LUIZ EDUARDO DE BRITO MARINHO NASCIMENTO SILVA

SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA E ANÁLISE DAS FRAGATAS CLASSE  
“NITERÓI”.

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

Orientadores:

D.Sc. Elkin Ferney Rodriguez Velandia

ETM José Ricardo Passos Filho

CC (EN) Carlos Antonio Zaccaro de Mattos Neto

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE LUIZ EDUARDO DE BRITO MARINHO NASCIMENTO SILVA

SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA E ANÁLISE DAS FRAGATAS CLASSE  
“NITERÓI”.

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

Aprovada em 21/11/2023

Banca Examinadora:

Elkin Ferney Rodriguez Velandia, D.Sc. – UFRJ \_\_\_\_\_

José Ricardo Passos Filho, ETM – DEN \_\_\_\_\_

CC (EN) Carlos Antonio Zaccaro de Mattos Neto, M.Sc. - DEN \_\_\_\_\_

Dedico o trabalho à minha esposa, Bruna, e aos meus filhos, Maria, Pedro e Heitor que são a razão da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por estar sempre ao meu lado, dando-me força e coragem para enfrentar meus objetivos de cabeça erguida.

A minha esposa e melhor amiga, Bruna Gonçalves, que cuida do nosso lar e dos nossos filhos incansavelmente, e que constantemente me incentiva a ser um profissional e uma pessoa melhor. Sou grato pelo amor e carinho que tem por mim.

A meus filhos, Maria de Brito, Pedro de Brito e Heitor de Brito, que são os responsáveis pelo meu sucesso pessoal e profissional. Agradeço a eles por ter me tornado uma pessoa melhor e descobrir o real propósito de ser pai. Dedico a dar o melhor de mim, tudo por vocês.

A minha mãe, que renunciou ao conforto de sua casa, mais uma vez, para nos ajudar a cuidar da casa, nos inúmeros momentos em que estive ausente, focado no trabalho e nos estudos.

À minha avó, que agora está nos braços de Deus. Ela foi pessoa que mais me incentivou a ingressar na Marinha e, mesmo depois de eu ter passado no concurso sempre fez questão de me ajudar, cuidando com muito carinho de mim e das minhas fardas. Sou grato a tudo que fez por mim e sempre serei. Um exemplo de mulher batalhadora e guerreira que nunca se deixou abater pelas dificuldades da vida e sempre esteve disposta a ajudar os outros, independentemente de quem fosse. Obrigado por ter moldado meu caráter.

Aos meus irmãos mais novos, Anna Júlia e Bernardo, e à minha afilhada, Eduarda, que, indiretamente, me incentivam a estudar mais, para que eu possa mostrar a eles que o mundo não está perdido e que, por meio dos estudos, eles podem realizar seus sonhos.

Ao meu pai que durante o curso me ajudou a compreender algumas matérias devido ao seu conhecimento em física e eletricidade. Além de ser um exemplo de profissionalismo no trabalho.

Aos meus familiares maternos, que são minhas referências de união, amor e respeito. Sou grato por inúmeros momentos em que renunciaram ao seu tempo para estar ao meu lado e me apoiar na conquista dos meus objetivos. Se hoje me esforço para ser um exemplo às novas gerações da família, é graças ao exemplo que vocês foram para mim.

Aos meus orientadores, D.Sc. Elkin e ETM José Ricardo, pelo incentivo e pela dedicação do seu tempo para me ajudar na conclusão deste trabalho.

Ao meu Coordenador, César Lampe, e todos os professores da UFRJ que ministraram o curso de Sistema de Controle e Eletricidade de Navios (SCELN), agradeço pelos ensinamentos e pela qualidade técnicas das aulas proferidas.

“Uma pessoa será tão feliz quanto  
sua mente decidir.”

Abraham Lincoln

# SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA E ANÁLISE DAS FRAGATAS CLASSE “NITERÓI”.

## **Resumo**

A corrosão é um problema e um desafio comum para toda embarcação que possui componentes de metal em sua estrutura, e é preocupante para a Marinha do Brasil, cuja frota emprega majoritariamente materiais metálicos em sua estrutura. Nesse contexto, manter os meios navais em operação e garantir sua longevidade se torna uma preocupação. Neste cenário, este trabalho de pesquisa visa estudar a análise da eficiência do sistema de proteção catódica atualmente em uso, examinando seus principais equipamentos e avaliando sua relevância no contexto atual. O estudo realiza uma análise comparativa entre o sistema de proteção por corrente impressa e o sistema de proteção catódica galvânica. A análise abrange uma avaliação das principais vantagens e desvantagens de cada sistema, com o intuito de determinar qual deles melhor atende aos padrões estabelecidos pelas Fragatas Classe “Niterói”.

**Palavras- chave:** Proteção Catódica, Proteção Catódica por Corrente Impressa, Fragata Classe “Niterói”, ICCP e Sistema de Proteção Catódica.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Navio HMS Samarang. ....	13
<b>Figura 2</b> - Fragata Classe “Niterói”. ....	14
<b>Figura 3</b> - Barco com corrosão severa. ....	15
<b>Figura 4</b> - Ciclo dos metais.....	19
<b>Figura 5</b> - Pilha de aeração diferencial.....	20
<b>Figura 6</b> - Processo de corrosão do Ferro sob a ação da água.....	21
<b>Figura 7</b> - Anodo de sacrifício.....	24
<b>Figura 8</b> - Sistema de PCCI.....	25
<b>Figura 9</b> - Cubículo mestre e escravo. ....	29
<b>Figura 10</b> - Aterramento do eixo da propulsão.....	30
<b>Figura 12</b> - Modelagem de um navio cargueiro. ....	34
<b>Figura 13</b> - Modelagem da popa de um navio cargueiro. ....	35

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Anodos permanentes do sistema de PCCI. ....	37
--	----

## **LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

AMRJ	Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DDP	Diferença de Potencial
FCN	Fragata Classe “Niterói”
MB	Marinha do Brasil
MODTEC	Modificação Técnica
PC	Proteção Catódica
PCCI	Proteção Catódica por Corrente Impressa
PCG	Proteção Catódica Galvânica
SPC	Sistema de Proteção Catódica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 Contextualização do problema</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2 Justificativa</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>16</b>
1.3.1 Objetivo geral.....	16
1.3.2 Objetivos específicos .....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Princípio da corrosão</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2 Processos de corrosão em ambientes marinhos</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Fatores que influenciam na taxa de velocidade de corrosão</b> .....	<b>21</b>
2.3.1 Salinidade .....	22
2.3.2 Condutividade .....	22
2.3.3 Oxigênio dissolvido.....	22
2.3.4 pH.....	23
2.3.5 Fatores físicos .....	23
<b>2.4 Métodos de prevenção à corrosão</b> .....	<b>23</b>
2.4.1 Proteção catódica galvânica.....	24
2.4.2 Proteção catódica por corrente impressa .....	25
2.4.2.1 Eletrodo de referência.....	25
2.4.2.2 Retificador de corrente .....	26
2.4.2.3 Anodos inertes ou permanentes .....	26
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1 Classificação da pesquisa</b> .....	<b>27</b>
3.1.1 Quanto aos fins.....	27

3.1.2 Quanto aos meios .....	27
<b>4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS ESTUDOS .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Descrição do funcionamento da PC nas FCN .....</b>	<b>28</b>
4.1.1 Eletrodo de referência .....	28
4.1.2 Circuito de controle .....	29
4.1.3 Anodos permanentes .....	30
4.1.4 Aterramento .....	30
<b>4.2 Comparação entre a proteção catódica por corrente impressa e a proteção catódica galvânica.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3 Estudo dos equipamentos do sistema de proteção catódica por corrente impressa...</b>	<b>32</b>
4.3.1 Eletrodo de referência .....	32
4.3.2 Circuito de controle (retificadores de corrente).....	33
4.3.3 Anodos permanentes .....	36
4.3.4 Aterramento .....	38
4.3.5 Análise Documental .....	39
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>5.1 Considerações Finais.....</b>	<b>41</b>
<b>5.2 Sugestões para futuros trabalhos.....</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIA .....</b>	<b>43</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na construção naval global impulsionou um crescimento nos meios navais de estruturas metálicas. No entanto, a exposição dessas estruturas ao ambiente marinho deu origem a um fenômeno químico conhecido como corrosão, no qual, acarreta a deterioração das estruturas metálicas.

A corrosão é um processo de deterioração de materiais metálicos, causados por reações químicas com elementos não-metálicos, como oxigênio, enxofres e outros agentes corrosivos, resultando na perda gradual das suas características metálicas, como sua resistência, brilho e condutividade elétrica (Morgan; Engineers, 1987).

A corrosão ganhou relevância com a introdução de técnicas modernas de fundição, acompanhada pelo uso de carvão e óleo, resultando na contaminação por enxofre, agora reconhecida como uma causa significativa de corrosão do ferro. Com o aumento do uso de metais, surgiu uma dúvida se a deterioração ocorria no metal ou na atmosfera. No século XVIII, o problema de corrosão tornou-se evidente, e foi somente no século XIX que iniciou-se uma busca a fim de solucionar os problemas causados pela corrosão (Morgan; Engineers, 1987).

Em 1824, Sir Humphry Davy apresentou estudos à *Royal Society*, em Londres, revelando maneiras de reduzir a corrosão em estruturas subterrâneas. Houve um teste prático em 1824 no navio HMS Samarang, primeiro navio a aplicar a Proteção Catódica (PC) na estrutura do casco, ilustrado na figura 1. O teste utilizou anodos de sacrifício de ferro presos à linha d'água, conseguindo diminuir a corrosão do cobre no casco (Paul, 2016).

**Figura 1** - Navio HMS Samarang.



Fonte: G; REEVE; REEVE (1848).

Michael Faraday, aluno de Davy, também desempenhou um papel importante na história, continuando os estudos após a morte de seu mentor, em 1834, Faraday estabeleceu uma conexão entre a perda de peso causada pela corrosão e a corrente elétrica. Essa descoberta lançou as bases para a futura implementação da PC, que é um processo que previne a corrosão de metais ao sacrificar um metal mais reativo para proteger o metal principal (Morgan; Engineers, 1987; Paul, 2016).

Thomas Edison, em 1890, experimentou aplicar PC por corrente em navios, mas faltavam recursos para o sucesso, quase cem anos após a inovação de Davy. Apenas em 1928 a PC foi adotada em oleodutos nos EUA, expandindo-se nos anos 1930 para proteção de serviços subterrâneos e gasodutos de aço (Paul, 2016).

No Brasil, o emprego da PC teve origem na década de 1960 com a criação do oleoduto entre Rio de Janeiro e Belo Horizonte. Desde então, essa técnica se expandiu consideravelmente, sendo aplicada em diversos setores industriais, incluindo mineração, energia elétrica, distribuição de gás, entre outros (SILVA, 2011).

O trabalho tem como propósito descrever o funcionamento dos principais componentes do sistema de PC das Fragatas Classe "Niterói" (FCN) e analisar as principais vantagens e desvantagens do sistema de proteção adotado atualmente e compará-lo com outro sistema de proteção, a fim de identificar a melhor técnica para mitigar os efeitos da corrosão.

A figura 2 ilustra uma das seis FCN, conhecida como Fragata "Constituição", que foi incorporada à Frota da Marinha do Brasil (MB) em 1977.

**Figura 2** - Fragata Classe "Niterói".



Fonte: Galante (2018).

A abordagem englobará uma revisão bibliográfica, visando fornecer uma compreensão abrangente dos aspectos técnicos relacionados à PC. Portanto, será possível sugerir melhorias no sistema de proteção das Fragatas, levando em consideração os parâmetros de eficácia operacional.

## 1.1 Contextualização do problema

Embarcações, sejam navios de carga, petroleiros ou militares, estão constantemente expostos a ambientes marinhos corrosivos, nos quais a água salgada e seus íons condutores criam condições ideais para a corrosão de estruturas metálicas. Essa corrosão pode resultar em desgaste, falhas estruturais e elevados custos de manutenção e reparos. A PC se destaca como uma solução importante para evitar esses problemas, preservando a integridade das embarcações e prolongando sua vida útil.

A Figura 3 representa uma embarcação que ficou encalhada por um longo período, resultando em danos severos à estrutura por ocasião da corrosão.

**Figura 3** - Barco com corrosão severa.



Fonte: Redação (2021).

Nesse cenário, é fundamental compreender que uma operação segura e eficiente das embarcações depende diretamente da eficácia da PC. A falta de cumprimento adequado dessas medidas de proteção pode não apenas comprometer a operacionalidade das embarcações, mas também acarretar sérios riscos à segurança e aumentar os custos operacionais e de manutenção, além de reduzir o tempo de vida útil dos meios navais. Portanto, a manutenção regular, o monitoramento do potencial eletroquímico e a substituição tempestiva de anodos são práticas indispensáveis para garantir a durabilidade e a confiabilidade das embarcações em ambientes corrosivos.

## **1.2 Justificativa**

Ao analisar os dados disponibilizados pelo *Stockholm International Peace Research Institute* (SIPRI), é evidente um aumento anual nos recursos alocados às forças armadas no mundo. No Brasil, os recursos alocados às forças armadas são contrabalançados pelos elevados gastos com a administração pública, resultando em uma progressiva redução nos investimentos operacionais das forças armadas brasileira em comparação com as nações de maior projeção global. Diante do cenário atual, é necessário que as embarcações da MB meçam esforços para manter seus sistemas de proteção catódica (SPC) em ótimas condições de funcionamento, visando a redução de despesas com manutenção e permitindo uma adaptação às novas condições orçamentárias sem prejudicar a qualidade da manutenção (TIAN *et al.*, 2023).

## **1.3 Objetivos**

Avaliar a capacidade do SPC nas FCN e identificar se o seu sistema atual está conforme o orientado pela literatura, visando a segurança e vida útil dos navios.

### **1.3.1 Objetivo geral.**

Apresentar o SPC atualmente empregado nas FCN e compará-lo com o sistema de proteção alternativo disponível. Estudando a eficácia do sistema vigente e determinando se é

possível otimizá-lo ou se há necessidade de adotar uma solução melhor em termos de proteção.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Analisar se as FCN estão empregando um sistema apropriado em consonância com os requisitos da MB, apresentar as vantagens e desvantagens em relação a outro sistema de proteção, e por fim, sugerir oportunidades de melhorias ou substituição no sistema de PC existente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A técnica da PC desempenha um papel importante na prevenção da corrosão, atuando como um complemento à proteção principal do casco da embarcação, que é o seu revestimento de pintura. Seu objetivo é impedir a corrosão do aço, especialmente quando ocorrem falhas na integridade do esquema de pintura (MARINHA DO BRASIL, 2019).

Existem quatro tipos principais de corrosão: química, eletroquímica, eletrolítica e galvânica. Dentre eles, a corrosão que mais impacta a estrutura de um navio é a corrosão eletroquímica, uma vez que embarcações são feitas de metais e estão submersas em um eletrólito, tais como a água salgada ou doce (Gomes, 1995).

A ação corrosiva varia conforme o ambiente de exposição do material, exibindo características únicas em diferentes meios corrosivos e, às vezes, até dentro do mesmo meio. Fatores específicos podem maximizar ou acentuar o processo de corrosão. Dentre os principais meios corrosivos que influenciam esse processo, incluem-se a atmosfera, águas naturais, solos e produtos químicos. No âmbito naval, as águas naturais, que abrangem tanto água salgada quanto doce, têm um impacto relevante na corrosão de embarcações (Marques; Ribeiro; Araújo, 2007).

O SPC possibilita a defesa contra o processo corrosivo que afeta estruturas metálicas imersas em meios corrosivos. No contexto naval, existem dois tipos de PC: o sistema de Proteção Catódica Galvânica (PCG), originalmente desenvolvido por Sir Humphry Davy, que se baseia no princípio das pilhas galvânicas e o sistema de Proteção Catódica por Corrente Impressa (PCCI), que utiliza o princípio das células eletrolíticas.

### 2.1 Princípio da corrosão

A corrosão é um processo pelo qual materiais, especialmente metais, sofrem decomposição, perdendo energia devido à ação química ou eletroquímica do ambiente em que estão inseridos, além disto, este é um fenômeno inverso aos processos metalúrgicos, nos quais os metais são obtidos a partir de minerais (Costa, 2016).

No âmbito dos processos de corrosão, ocorre uma interação química entre os metais e elementos não-metálicos presentes no meio ambiente, sendo o oxigênio exemplo relevante.

Essa interação resulta na formação de compostos que assemelham-se aos minerais naturais dos quais os materiais metálicos foram originalmente extraídos (Costa, 2016).

Contudo, a corrosão é um processo no qual os materiais metálicos reagem com os elementos presentes no ambiente, levando à formação de compostos que prejudicam sua integridade e propriedades. Esse processo é influenciado por diversos fatores ambientais (Costa, 2016).

A figura 4 ilustra de forma sintetizada o conceito de corrosão associado ao processo metalúrgico, também conhecido como ciclo dos metais. Na metalurgia, aplica-se energia ao composto (minério) para que possamos obter o metal, entretanto, a corrosão é um processo espontâneo em que o metal perde energia para o meio externo, retornando à sua forma original de minério.

**Figura 4** - Ciclo dos metais.



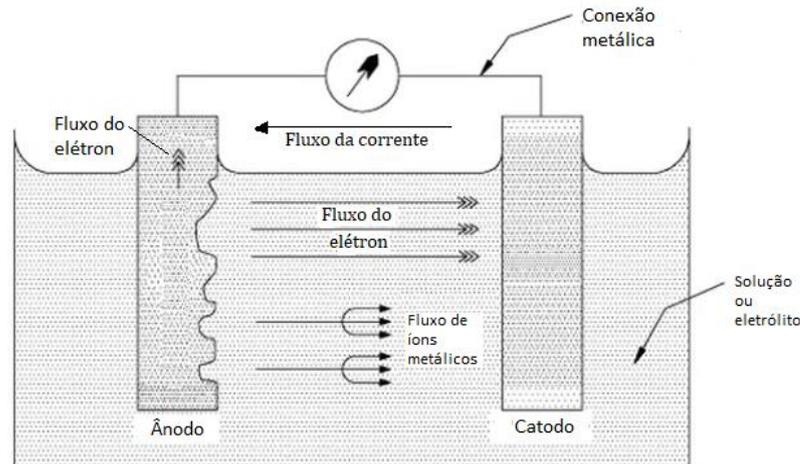
Fonte: Unknown (2016).

## 2.2 Processos de corrosão em ambientes marinhos

Inicialmente, para entender o processo de corrosão é necessário distinguir a ação do anodo e do cátodo e que ambos estão conectados entre si. O anodo é o eletrodo onde ocorre a perda de massa do material através da oxidação, liberando íons metálicos positivos para o eletrólito e permitindo o fluxo de corrente elétrica, conforme ilustrado na figura 5. Já o cátodo é o eletrodo onde ocorre a redução, que consiste em um processo de ganho de elétrons, além

de ser o ponto de saída da corrente do eletrólito. Isto é, ocorre um fluxo de elétrons do anodo em direção ao cátodo, possibilitando um fluxo de corrente que se move do cátodo para o anodo (Pinheiro; Silva, 2015).

**Figura 5** - Pilha de aeração diferencial.



Fonte: Mathur (2021).

Através da reação química (1) identifica-se que a perda de massa está diretamente ligada à corrente elétrica, uma descoberta de Faraday. No exemplo abaixo, o metal em questão é o Ferro (Fe), o qual passa pelo processo de oxidação e, como resultado, perde dois elétrons ( $e$ ). Assim como o Fe, outros metais passam pelo mesmo processo de oxidação, perdendo massa e cedendo elétrons (Pinheiro; Silva, 2015).



Na reação química (2) observa-se que o meio aquoso viabiliza o processo de redução do cátion, o que facilita a aquisição de elétrons (Pinheiro; Silva, 2015).



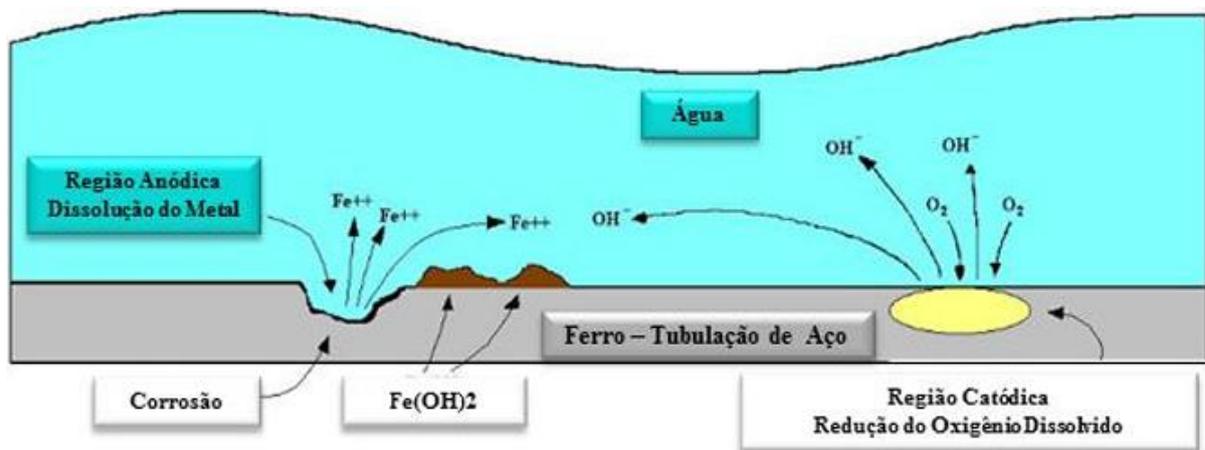
As reações químicas (1) e (2) têm como resultado a condução dos íons negativos de hidroxila ( $OH^{-}$ ) da região catódica para a região anódica através da água do mar. Nesse ambiente, ocorre a combinação dos  $OH^{-}$  com os íons positivos de ferro ( $Fe^{++}$ ), formando o composto hidróxido ferroso [ $Fe(OH)_2$ ]. A reação química (3) exemplifica esse processo químico (DEnsM, 1977).



Resumidamente, o metal quando submerso em meio aquoso perde energia para o meio, e os elétrons resultante desta decomposição química seguem em direção ao cátion, originando uma corrente de corrosão e o átomo metálico se liga aos íons hidroxila presente na água. As reações químicas entre átomos metálicos e íons de hidroxila proporcionam um processo de corrosão. No caso de materiais com composição de ferro, esse processo específico é conhecido como ferrugem, onde o hidróxido ferroso quando oxidado pelo oxigênio dissolvido da origem ao Hidróxido de Ferro  $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ .

A figura 6 ilustra o processo de corrosão do ferro sob a ação da água, onde retrata o processo de corrosão da tubulação de aço que perde  $\text{Fe}^{++}$  para a água, região anódica, e a liberação de  $\text{OH}^-$  e captação de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) pela região catódica.

**Figura 6** - Processo de corrosão do Ferro sob a ação da água.



Fonte: Lima (2015).

### 2.3 Fatores que influenciam na taxa de velocidade de corrosão

A corrosão de metais em ambientes marinhos é um fenômeno destrutivo que pode causar danos estruturais às embarcações. Compreender os fatores que influenciam na taxa de velocidade de corrosão é essencial para prevenir perdas econômicas e garantir a segurança de operações marítimas. Esses fatores incluem a salinidade da água, condutividade, oxigênio dissolvido, pH e fatores físicos como velocidade do fluxo da água, marés e temperatura (Hou *et al.*, 2018).

### 2.3.1 Salinidade

A água do mar é conhecida por sua alta salinidade devido à presença de sais dissolvidos. Essa salinidade afeta diretamente a condutividade elétrica da água e a quantidade de oxigênio dissolvido. Com o aumento da salinidade, a condutividade elétrica da água aumenta, mas o teor de oxigênio dissolvido diminui. Isso é importante porque a corrosão é um processo eletroquímico que envolve a transferência de elétrons. A alta condutividade elétrica facilita essa transferência, acelerando a corrosão. No entanto, a presença de íons de cálcio e magnésio na água do mar pode ter um efeito protetor, retardando o processo de corrosão (Hou *et al.*, 2018).

### 2.3.2 Condutividade

A água do mar é um eletrólito altamente condutivo, o que a torna um ambiente propício para a corrosão. Essa alta condutividade não apenas facilita a corrosão microscópica nas superfícies metálicas, mas também desencadeia reações macroscópicas, acelerando ainda mais o processo corrosivo. À medida que a condutividade aumenta, a taxa de corrosão, tanto a nível microscópico quanto macroscópico, tende a se intensificar (Hou *et al.*, 2018).

### 2.3.3 Oxigênio dissolvido

A quantidade de oxigênio dissolvido na água do mar desempenha um papel importante na corrosão. Quanto maior a concentração de oxigênio na água, maior é o potencial elétrico do metal, o que acelera a corrosão. No entanto, alguns metais, como o alumínio e o aço inoxidável têm a capacidade de formar uma camada de óxido protetora em suas superfícies quando expostos ao oxigênio. Essa camada atua como uma barreira que protege o metal contra a corrosão, tornando-o mais resistente (Hou *et al.*, 2018).

### 2.3.4 pH

O pH da água do mar contribui para inibir a corrosão do aço. No entanto, é importante notar que, devido à influência da fotossíntese, as águas superficiais do mar podem ser mais corrosivas do que as águas mais profundas, mesmo com um pH mais elevado. Isso ocorre porque a fotossíntese aumenta a quantidade de oxigênio dissolvido na superfície, acelerando a corrosão (Hou *et al.*, 2018).

### 2.3.5 Fatores físicos

A velocidade do fluxo da água e a temperatura são exemplos de fatores físicos. A maior velocidade do fluxo da água facilita a difusão do oxigênio, aumentando a taxa de corrosão. Portanto, quanto maior for a velocidade do navio, maior será a taxa de corrosão, tornando a estrutura do navio mais susceptível aos efeitos corrosivos do ambiente marinho. De acordo com a temperatura da água do mar, caso esteja mais alta, geralmente, acelera a corrosão, já em temperaturas extremamente altas, a solubilidade do oxigênio na água do mar pode diminuir, resultando em uma redução na corrosão (Hou *et al.*, 2018).

## 2.4 Métodos de prevenção à corrosão

A técnica de PC busca equilibrar o potencial elétrico entre o metal a ser protegido e um metal anódico selecionado. Isso reduz o fluxo de corrente corrosiva, garantindo que apenas o metal anódico seja corroído, protegendo assim o metal a ser preservado (MARINHA DO BRASIL, 2019).

Devido à sua salinidade, pH e outros componentes, a água do mar possui um meio corrosivo e complexo que influencia as taxas de corrosão do metal. Embarcações militares e comerciais com estruturas metálicas buscam aumentar a durabilidade de seus meios navais através de técnicas como a PC e o revestimento de pintura. O revestimento de pintura é a principal defesa contra a corrosão, enquanto o SPC age como complemento. Esse sistema inclui duas técnicas: PCG e PCCI (MARINHA DO BRASIL, 2019).

A aplicação de tintas anticorrosivas para revestir as estruturas metálicas em meios navais desempenha um papel importante na criação de uma barreira física entre o metal e os agentes corrosivos. Neste método de revestimento por pintura, além de econômico e eficaz, destaca-se pela facilidade na aplicação e manutenção, tornando-se, assim, uma escolha altamente viável para a proteção dessas estruturas metálicas (Cotting, 2015).

#### 2.4.1 Proteção catódica galvânica

O Sistema de PCG, também conhecido como proteção por anodo de sacrifício, envolve a utilização de metais (anodos de sacrifício) com potencial eletroquímico inferior ao das estruturas metálicas das embarcações. Esses anodos são posicionados de modo a estar submersos no calado mínimo, conectados ao casco. Além disso, os anodos de sacrifício são projetados em formatos hidrodinâmicos para reduzir a resistência ao avanço do navio. Essa técnica visa preservar as estruturas metálicas, pois os anodos sacrificam-se ao corroer-se em vez do casco da embarcação (MARINHA DO BRASIL, 2019).

A figura 7 representa um navio docado com três anodos de sacrifício, sendo o anodo antigo posicionado à esquerda e os dois recentemente instalados à direita (Cardoso, 2020).

**Figura 7** - Anodo de sacrifício.



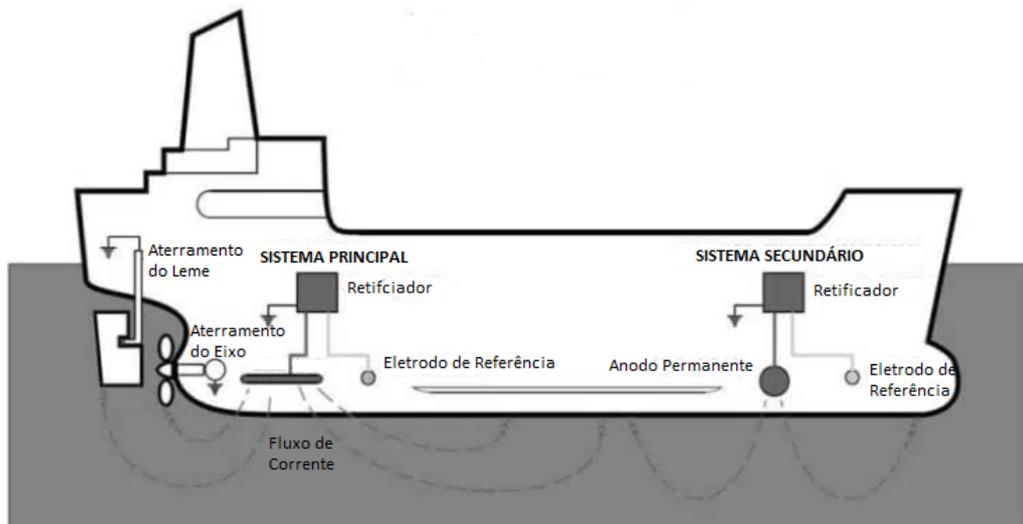
Fonte: Cardoso (2020).

## 2.4.2 Proteção catódica por corrente impressa

O Sistema de PCCI é uma técnica avançada para reduzir a corrosão. Neste sistema, uma corrente contínua controlável contrária à corrente corrosiva é aplicada ao casco do navio, permitindo que o meio naval se adapte às condições corrosivas. Ao contrário do método PCG, o PCCI é mais complexo e inclui componentes específicos, como eletrodo de referência, retificador de corrente, sistema de aterramento e anodos permanentes (MARINHA DO BRASIL, 2019).

A figura 8 ilustra os principais equipamentos do sistema de PCCI no interior de um navio. Este navio possui dois sistemas de proteção interligados, o sistema principal e o sistema secundário, sendo cada um responsável por uma área específica do navio, em virtude do potencial elétrico da região popa ser superior ao potencial elétrico das demais regiões do navio.

**Figura 8** - Sistema de PCCI.



Fonte: Mathur (2021).

### 2.4.2.1 Eletrodo de referência

Os eletrodos de referência são dispositivos fixados ao casco das embarcações, com a importante função de coletar o potencial elétrico do casco em relação ao eletrólito. Esse sinal coletado será utilizado como referência e então transmitido a um retificador de corrente, o

qual o utiliza os dados coletados pelo eletrodo para analisar se o nível de PC da estrutura está adequado. Essas células, conhecida como eletrodo de referência, possuem uma vida útil de pelo menos dez anos e podem ser posicionadas em áreas críticas. É essencial a vedação de todas as penetrações de elementos do sistema externos ao casco, para evitar a entrada de água no interior do navio e garantindo a operacionalidade de todo o sistema (VASILESCU; PANAITESCU; PANAITESCU, 2019).

#### 2.4.2.2 Retificador de corrente

Os retificadores de corrente desempenham a função de converter a Corrente Alternada (CA) disponível a bordo em Corrente Contínua (CC). Essa CC é então direcionada para os anodos permanentes, controlada de acordo com o potencial elétrico presente no casco do navio, o qual é monitorado pelos eletrodos de referência (MARINHA DO BRASIL, 2019).

#### 2.4.2.3 Anodos inertes ou permanentes

Os anodos permanentes são projetados para ter uma vida útil mais longa e uma taxa de degradação material inferior em comparação com os anodos de sacrifício utilizados na PCG. Além disso, eles possibilitam a passagem de uma corrente contrária à corrente de corrosão, permitindo que a embarcação se adapte as circunstâncias do meio (VASILESCU; PANAITESCU; PANAITESCU, 2019).

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Classificação da pesquisa**

A classificação da metodologia de pesquisa quanto aos fins e quanto aos meios permitiu a escolha da abordagem mais adequada às necessidades do projeto de pesquisa.

#### **3.1.1 Quanto aos fins**

A pesquisa foi de natureza descritiva, baseada em análise de artigos, monografias e literatura especializada. A intenção foi estudar o fenômeno da corrosão em diversas fontes de estudo, com o objetivo de identificar e buscar formas de minimizar os efeitos negativos da corrosão nas FCN.

#### **3.1.2 Quanto aos meios**

A abordagem metodológica foi de cunho bibliográfico e documental, pautando-se em fontes de pesquisa reconhecidas e de credibilidade. Além disso, englobou a análise de materiais inerentes às FCN, incluindo literatura interna.

### **3.2 Limitações do método**

A pesquisa enfrentou limitações devido à falta de referências bibliográficas disponíveis e à falta de dados armazenados sobre a utilização de PC em navios, incluindo relatórios de inspeção do sistema PCCI das FCN. Isso restringiu a extensão e a profundidade da análise.

## 4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS ESTUDOS

### 4.1 Descrição do funcionamento da PC nas FCN

O sistema de PC das FCN é o PCCI e tem como objetivo prevenir a corrosão em áreas críticas, incluindo os eixos propulsores, os lemes e as partes metálicas abaixo da linha d'água através da aplicação de CC aos anodos permanentes. A diferença de potencial DDP entre os eletrodos de referência e o casco do navio é medida e empregada para gerar um sinal que é então transmitido ao circuito de controle. Este circuito possui a função de ajustar, automaticamente, a corrente de proteção, garantindo que o nível de proteção pré-estabelecido para o casco do navio seja mantido de maneira contínua e eficiente.

O projeto original contemplava apenas um retificador de corrente, destinado a fornecer corrente de proteção aos seis conjuntos de anodos. No decorrer dos anos, devido a Modificações Técnicas (MODTEC), foram realizadas melhorias no sistema, acrescentando um conjunto adicional de anodos na popa, assim como um retificador de corrente extra para atender às demandas de tensão e corrente na região da popa. Essas alterações visavam melhorar a eficácia do sistema de proteção (DEN, 1976).

#### 4.1.1 Eletrodo de referência

O equipamento é responsável por coletar a DDP no casco e, em seguida, enviá-lo ao circuito de controle. O projeto original das FCN consiste em três eletrodos de referência, sendo um na popa, que na fase de projeto inicial era utilizado apenas para monitoramento, e dois a meia-nau, posicionados em bordos opostos, que são utilizados de maneira alternada, de acordo com a escolha do operador. O material dos eletrodos é composto de prata/cloreto de prata, causando uma polaridade positiva ao casco. O potencial ideal para que as Fragatas tenham eficácia e garantam a integridade da PC é de 800 mV positivos, podendo oscilar de 750 mV à 850 mV e caso o navio esteja sem proteção o potencial é de 600 mV (CIAA, 2022; DEnsM, 1977).

#### 4.1.2 Circuito de controle

Atualmente o circuito de controle é composto por três equipamentos: o eletrodo de referência, o cubículo de controle mestre, à esquerda da figura 9, e cubículo de controle escravo, a direita da figura 9.

**Figura 9** – Cubículo mestre e escravo.



O cubículo de controle mestre processa o sinal enviado pelo eletrodo de referência com a voltagem de referência, que é um potencial gerado no próprio circuito de controle ajustado por um potenciômetro e mantido em um valor de 800 mV (DEnsM, 1977).

O cubículo de controle escravo opera de acordo com o nível de tensão gerado pelo cubículo mestre, variando entre +9 Vcc e -9 Vcc. O valor de +9 Vcc é utilizado para fornecer o potencial total aos anodos, enquanto aproximadamente -9 Vcc representa o corte de potencial (CIAA, 2022).

Tanto o cubículo mestre quanto o cubículo escravo operam com alimentação de 440 V, 60 Hz e trifásico, e desempenham a função de retificadores de corrente, transformando a CA em CC. Os cubículos são responsáveis fornecer corrente de proteção a sete conjuntos de anodos, sendo o mestre responsável pelos conjuntos 1, 2, 3 e 4, localizados nas proximidades da proa, a bombordo e a boreste, e o escravo responsável pelos conjuntos 5, 6 e 7, localizados

nas proximidades da popa. Essa divisão de funções é necessária devido ao potencial elétrico mais elevado da estrutura do casco estar na região da popa em relação às demais áreas do navio (CIAA, 2022; DEnsM, 1977).

#### 4.1.3 Anodos permanentes

As FCN estão equipadas com um total de vinte e um anodos, organizados em sete conjuntos de três anodos cada. Um desses conjuntos de anodos está localizado na popa da embarcação, enquanto os demais conjuntos estão distribuídos ao longo dos bordos, de proa à popa. O material do anodo é constituído de titânio platinizado (CIAA, 2022).

#### 4.1.4 Aterramento

O SPC das FCN requer aterramento, que são estabelecidos nos eixos da propulsão e no leme. No aterramento dos eixos da propulsão, conforme ilustrado na figura 10, um anel coletor é instalado no eixo e sob o anel é conectada uma fita condutora. Esta fita estabelece o contato direto com as escovas de grafite, que estão posicionadas externamente ao eixo e são acomodadas sob um porta-escovas. Os porta-escovas são conectados ao casco do navio por meio de um fio de cobre, permitindo o aterramento do eixo da propulsão. Enquanto no leme, utiliza-se uma cordoalha de cobre flexível conectada sob um parafuso no leme e ao casco do navio, viabilizando o aterramento do leme (DEN, 1976; DEnsM, 1977).

**Figura 10** – Aterramento do eixo da propulsão.



## **4.2 Comparação entre a proteção catódica por corrente impressa e a proteção catódica galvânica**

Para análise dos sistemas de PCCI e PCG foi necessário abordar as principais vantagens e desvantagens dos dois sistemas e comparar o sistema PCG com o sistema PCCI, que está em vigor nas FCN.

As vantagens preeminentes da PCG compreendem a simplicidade de instalação, a garantia de estabilidade no sistema, a facilidade de distribuição uniforme da corrente, manutenção fácil e custos reduzidos, quando os navios não são de grande porte. Entretanto, suas desvantagens residem na limitação ou impossibilidade da regulagem da corrente de proteção, na necessidade frequente de substituição dos anodos em situações de elevado processo de corrosão e na inviabilidade econômica em embarcações de grande porte, pois haveria uma grande quantidade de anodos e, conseqüentemente, elevando os custos de manutenção (Gomes, 1995).

As principais vantagens da PCCI são na capacidade de controle da corrente de proteção, independente do meio o qual o navio estará exposto, com uma vida útil prolongada do meio naval e pode ser utilizado em qualquer embarcação. No entanto, os principais desafios encontrados neste sistema são possíveis falhas operacionais, necessidade de inspeções periódicas e manutenção dos retificadores, além de ter um custo inicial superior em relação ao sistema de PCG, em decorrência da complexidade da instalação (Gomes, 1995).

Embora o sistema de PCG seja conhecido por sua simplicidade e baixa necessidade de manutenção, sua aplicabilidade nas FCN se mostra improvável. As Fragatas possuem dimensões consideráveis e frequentemente estão atracadas nas águas da Baía de Guanabara, entretanto quando estão em missões navegam no litoral da costa brasileira e em águas internacionais, proporcionando aos navios variações significativas na resistividade elétrica do meio ambiente, o que implica diretamente na flutuação da corrente de corrosão. Essas variações requerem um controle mais preciso da corrente de proteção, o que, por sua vez, contribui para uma vida útil estendida dos anodos e uma adaptação mais eficaz às flutuações do meio.

Portanto, a implementação do sistema de PCCI é configurada como a opção mais adequada para salvaguardar a integridade das FCN, devido à sua notável capacidade de

enfrentar as variações ambientais e à sua durabilidade. Vale ressaltar que, embora o sistema PCCI exija uma manutenção mais específica em relação ao sistema de PCG, essa escolha se justifica em termos da eficácia operacional e longevidade dos meios navais.

### **4.3 Estudo dos equipamentos do sistema de proteção catódica por corrente impressa**

Ao projetar um sistema de PC por corrente impressa é fundamental considerar os equipamentos empregados e avaliar sua adequação às condições específicas a que serão submetidos. O objetivo primordial desse sistema é assegurar uma vida útil prolongada com operação eficiente e confiável. Portanto, a seleção dos componentes deve ser realizada com atenção meticulosa a fim de garantir que atendam aos requisitos exigidos pelo fabricante. É essencial assegurar que os equipamentos escolhidos sejam compatíveis com o ambiente e as demandas operacionais. Sendo assim, foi feita uma análise que abordará a eficiência e a viabilidade técnica do sistema atualmente em uso das FCN.

#### **4.3.1 Eletrodo de referência**

Ao implementar o eletrodo de referência no sistema de PCCI é importante assegurar que o sistema esteja efetivamente cumprindo sua função de fornecer medições do casco do navio, além disso é ideal que o eletrodo esteja em conformidade com as especificações técnicas do retificador. Diversos critérios podem ser adotados para verificar a adequada proteção e ausência de riscos de corrosão. Alguns desses critérios incluem a densidade da corrente aplicada e a medição do potencial da estrutura. Contudo, o método mais amplamente aceito e utilizado em todo o mundo para verificar a eficácia da proteção é a medição do potencial entre a estrutura e o eletrólito circundante, realizada com um eletrodo de referência (Costa, 2016).

A escolha do eletrodo de referência adequado desempenha um papel fundamental nesse processo. Para estruturas enterradas, o eletrodo de referência mais apropriado é o de cobre/sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ). Em contrapartida, para estruturas imersas em água, os eletrodos de prata/cloreto de prata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ) são amplamente preferidos devido à sua

eficácia em ambientes aquáticos. Também é possível empregar eletrodos de referência com liga de zinco (Zn), que são versáteis o suficiente para serem utilizados em estruturas enterradas e submersas (Sousa, 2007).

No contexto da PC, os eletrodos de referência de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl), cujo valores limites dos potenciais devem ser iguais ou mais negativos que  $-0,80V$ , oferecem uma vantagem perante os demais eletrodos, pois são eficazes em ambientes aquáticos devido à sua estabilidade eletroquímica, alta condutividade e resistência à corrosão. Essas características os tornam uma escolha ideal para medições de potencial em SPC submersos, onde outros eletrodos podem ser menos eficazes (Costa, 2016).

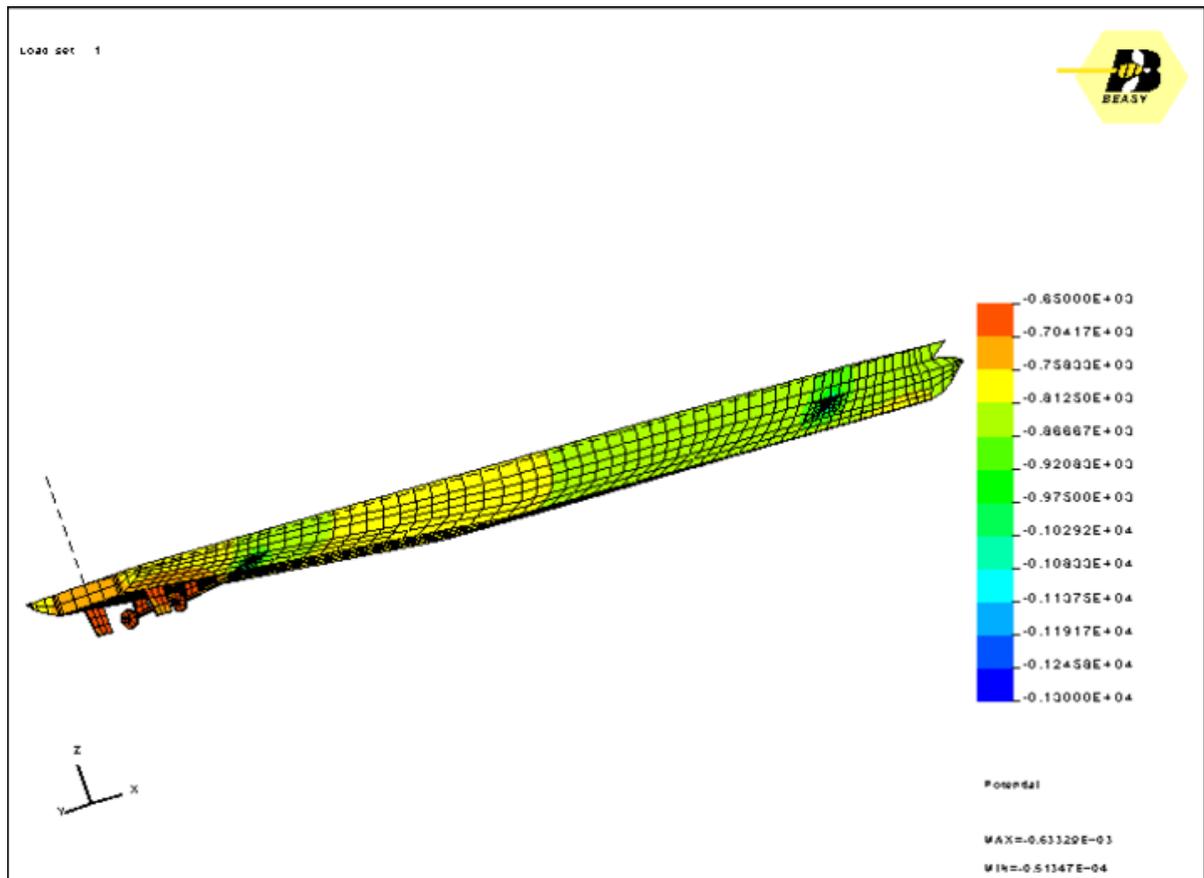
As medições de potencial casco/água do mar com o uso do eletrodo de referência prata/cloreto de prata são uma prática comum em navios, geralmente realizadas a uma profundidade aproximadamente ao meio do calado da embarcação. Tradicionalmente, esse método tem se mostrado eficaz na avaliação da PC. Entretanto, foram observados casos em que os potenciais medidos estavam acima do limite mínimo de proteção, maior que  $-0,80 V$ , especialmente nas áreas da popa, onde problemas de corrosão foram registrados. Portanto, é necessário o uso de mais um eletrodo na popa (Dutra; Nunes, 2018).

Nota-se que os eletrodos de referência empregados nas FCN demonstram conformidade com as recomendações sugeridas acima no contexto de escolha do material e posicionamento dos eletrodos de referência, refletindo na atenção cuidadosa dada pelos projetistas à seleção de componentes críticos para garantir o funcionamento eficaz do sistema.

#### 4.3.2 Circuito de controle (retificadores de corrente)

Na análise das condições do SPC, observa-se um ponto crítico na região da popa da embarcação, que se diferencia substancialmente da estrutura principal do navio. Essa distinção se baseia em vários fatores, incluindo a geometria das estruturas na popa, a presença de hélices feitas de liga de cobre em contato com o casco de aço, as características da turbulência da água e os níveis de aeração na região (Dutra; Nunes, 2018).

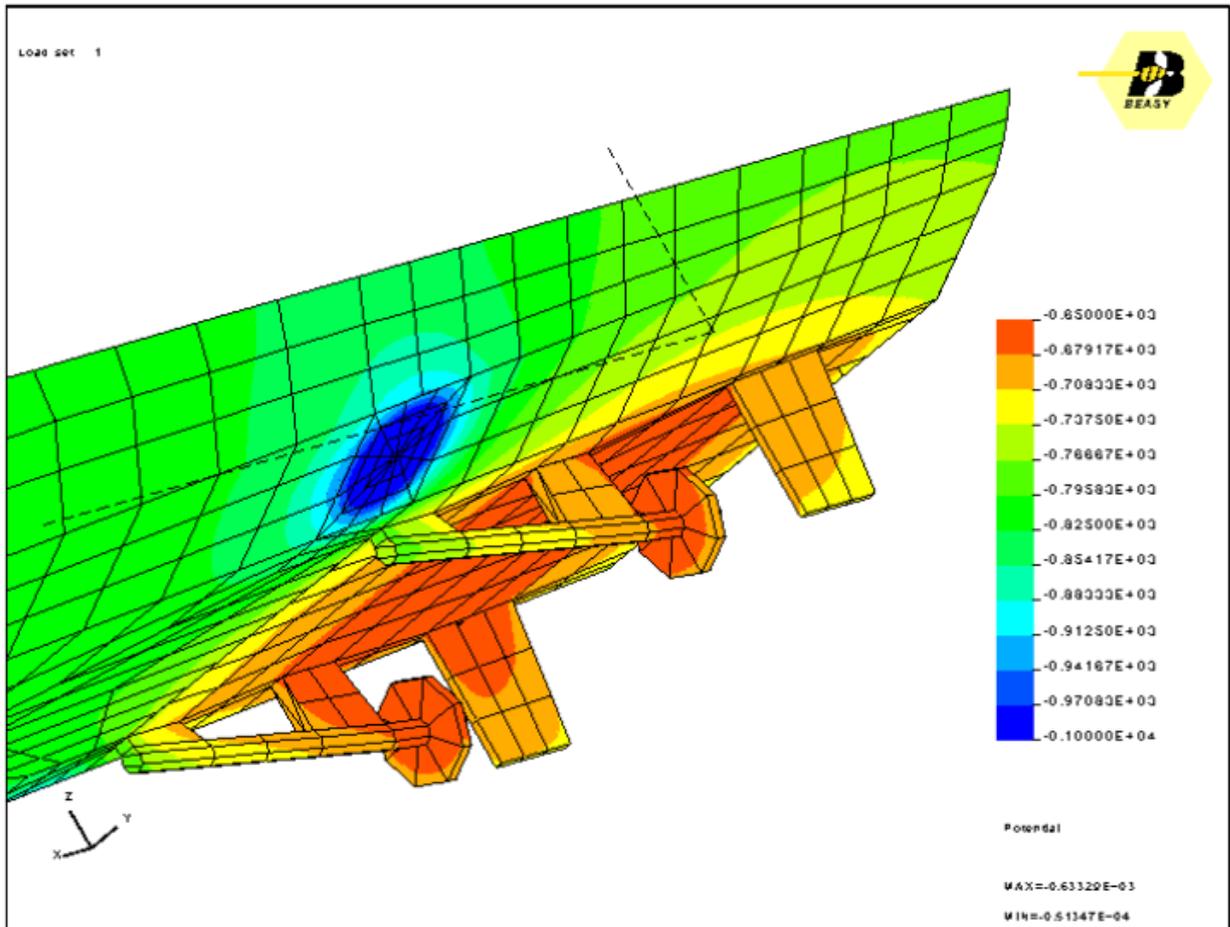
**Figura 11** – Modelagem de um navio cargueiro.



Fonte: Adey; Lodge; Pei (2023).

As Figuras 11 e 12 representam uma modelagem de um navio cargueiro de 140 metros de comprimento, onde as áreas de interesse incluem as superfícies molhadas e os principais apêndices do casco. O navio possui quatro anodos e duas fontes de alimentação. Materiais diferentes estão incluídos no modelo. As duas hélices do navio são feitas de liga de níquel-alumínio-bronze e modeladas como discos sólidos com área superficial equivalente aos elementos reais. Os dois lemes e eixos são feitos de aço. As três partes mencionadas acima são consideradas não revestidas devido à turbulência gerada pelo movimento da hélice. Com isso, através desta modelagem pode-se avaliar o quão alto é o potencial elétrico no casco do navio na região da popa. A cor azul representa a região de menor potencial e a região vermelha representa a região de maior potencial.

**Figura 12** – Modelagem da popa de um navio cargueiro.



Fonte: Adey; Lodge; Pei (2023).

Essas peculiaridades na região da popa geram desafios que necessitam de uma proteção específica. Para enfrentar essas demandas, torna-se necessário adotar um SPC distinto para a popa da embarcação, independente do sistema empregado no restante do navio. Essa estratégia visa assegurar que as exigências de corrente necessárias para a proteção na popa sejam atendidas de maneira adequada, sem ocasionar potenciais elevados em algumas regiões na estrutura do navio. Esses potenciais elevados poderiam comprometer a eficácia geral da PC, especialmente nessa área de extrema relevância (Dutra; Nunes, 2018).

Nesse contexto, a análise dos componentes do SPC, com foco especial nos eletrodos de referência e nos retificadores destinados especificamente para a popa, ganha destaque como uns elementos cruciais na otimização da eficácia do sistema como um todo. Posicioná-los estrategicamente nas proximidades da região da popa permite uma leitura mais precisa do potencial naquela área. Com informações precisas e uma proteção específica para a região de

ré do navio é possível destinar uma corrente de proteção ideal para essa região crítica. Essa análise requer atenção minuciosa durante todas as fases do projeto e da implementação, visando garantir a proteção adequada das estruturas metálicas nas condições desafiadoras dos ambientes marinhos (Dutra; Nunes, 2018).

As precauções em relação a um circuito destinado às proteções catódicas do casco do navio, particularmente na região da popa, não representam um desafio para as FCN. Isso se deve à configuração com dois retificadores, onde um é designado para controlar quatro conjuntos de anodos localizados mais à vante, enquanto o outro é responsável por três conjuntos de anodos localizados na região da popa. Essa distribuição possibilitou um cuidado mais específico e adequado à proteção na área da popa, garantindo uma cobertura eficaz das estruturas nessa região crítica do navio.

#### 4.3.3 Anodos permanentes

A avaliação da eficiência do anodo nas FCN envolve uma análise das propriedades do material anódico, juntamente com as características do sistema de proteção. Um dos aspectos fundamentais a serem considerados é a densidade de corrente, que representa a quantidade de corrente elétrica por unidade de área que o anodo pode suportar sem sofrer desgaste excessivo. Exceder a densidade de corrente máxima recomendada pode resultar em desgaste irregular e até mesmo na fratura do anodo (Sousa, 2007).

Além disso, deve-se considerar a taxa média de desgaste para cada tipo de anodo. Cada material anódico tem uma taxa de desgaste específica, geralmente expressa em quilogramas por ampère por ano (kg/A.ano), quando operado dentro dos limites aceitáveis de densidade de corrente. Essa taxa de desgaste desempenha um papel essencial no cálculo da vida útil do anodo, fornecendo informações valiosas sobre a sua durabilidade ao longo do tempo (Sousa, 2007).

No que concerne à durabilidade do anodo, é essencial considerar o ambiente no qual ele será implantado, uma vez que diferentes materiais anódicos apresentam desempenho superior em ambientes específicos. Os anodos de grafite são apropriados para utilização em água do mar de pouca profundidade e água doce, devido à sua notável resistência à corrosão nesses cenários. Por outro lado, anodos de ferro-silício são mais indicados para solos ou água

com níveis de cloreto reduzidos, que não ultrapassem 60 partículas por milhão, já que conservam sua eficácia nessas condições (MATTOS; GUILHEM; PAIXÃO, 2010).

Quando se trata de proteção em água do mar, particularmente em áreas suspensas que não entram em contato com o leito marinho, anodos de chumbo-antimônio-prata são altamente eficientes. Para aplicações mais diversas, incluindo solos, água doce, água do mar e leito marinho, os anodos de ferro-silício-cromo são versáteis e confiáveis (MATTOS; GUILHEM; PAIXÃO, 2010).

Além disso, anodos de titânio, nióbio ou tântalo platinizados são adequados para diversas situações, como a proteção de armaduras de aço em concreto, sendo aplicáveis em solos, água doce, água do mar e outros eletrólitos. Anodos de titânio revestidos com óxidos de metais nobres, como cério, são opções viáveis para ambientes semelhantes, enquanto anodos de magnetita e ferrita oferecem proteção eficaz em solos, água doce e água do mar (MATTOS; GUILHEM; PAIXÃO, 2010).

Na Tabela 1, observa-se uma análise comparativa que se concentra nos anodos permanentes empregados no sistema de PCCI em relação a densidade de corrente recomendada e o desgaste médio desses anodos. A análise proporciona *insights* valiosos e ajuda a compreender a eficiência desses anodos.

**Tabela 1-** Anodos permanentes do sistema de PCCI.

<b>Anodo</b>	<b>Densidade de corrente recomendada (a/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desgaste médio (kg/A.ano)</b>
Grafite	Até 3	0,20
Ferro/silício (Fe-Si)	Até 15	0,35
Ferro/silício/cromo (Fe-Si-Cr)	Até 15	0,35
Chumbo/antimônio/prata (Pb-Sb-Ag)	50/100	0,10
Titânio platinizado (Ti-Pt)	Até 1000	desprezível
Nióbio platinizado (Nb-Pt)	Até 700	desprezível
Tântalo platinizado (Ta-Pt)	Até 1100	desprezível
Titânio oxidado	Até 1100	desprezível
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Até 115	0,04
Ferrita (0,4 MO . 0,6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Até 115	0,004

Ferrita (0,1 MO . 0,9Fe2O3)	Até 115	0,002
-----------------------------	---------	-------

Fonte: Sousa (2007).

De acordo com os dados previamente citados, é possível constatar que as FCN optaram por utilizar anodos permanentes versáteis, adequados tanto para ambientes de água doce quanto de água salgada. Os anodos permanentes compostos de titânio platinizado empregados nas Fragatas proporcionam uma ampla faixa de densidade de corrente, o que é fundamental para evitar desgastes excessivos.

Além disso, o desgaste médio observado nos anodos de titânio platinizado é praticamente desprezível, resultando em uma notável durabilidade desses componentes. Conseqüentemente, essa decisão reduz significativamente os custos de manutenção em comparação com outras opções de anodos permanentes disponíveis no mercado.

#### 4.3.4 Aterramento

O aterramento do eixo de propulsão e do leme são necessários para garantir a continuidade elétrica entre esses componentes e o casco da embarcação, evitando a corrosão e assegurando o bom funcionamento dos SPC, como anodos de sacrifício ou corrente impressa.

No que tange ao isolamento elétrico dos eixos de propulsão em embarcações, seja por meio de uma película de óleo lubrificante nos mancais ou da incorporação de materiais não metálicos nos mancais do eixo propulsor, surge a necessidade de estabelecer uma conexão elétrica eficaz entre o eixo e o casco da embarcação. Essa conexão torna-se essencial para garantir a continuidade elétrica ideal quando a embarcação utiliza um sistema de PC, como anodos de sacrifício ou um sistema de corrente impressa. Por outro lado, o isolamento do eixo pode comprometer a capacidade de fornecer proteção efetiva à hélice (VASILESCU; PANAITESCU; PANAITESCU, 2019).

Para superar esse desafio, é comum recorrer à instalação de um anel coletor no eixo da hélice, juntamente com um conjunto de escovas de alto teor de prata e composto de grafite, montadas em um porta-escovas balanceado. Essas escovas funcionam em conjunto com um anel coletor de cobre, que possui uma trilha incrustada de prata sólida, permitindo a passagem do fluxo de corrente elétrica entre o eixo da propulsão e o casco do navio. Em sistemas mais modernos, um sistema de monitoramento do potencial do eixo da hélice desempenha um

papel importante, permitindo que a tripulação avalie o potencial entre o eixo e o casco por meio de medidores compactos de milivolts, de forma a garantir a eficácia do sistema (VASILESCU; PANAITESCU; PANAITESCU, 2019).

No entanto, quando se trata de garantir uma proteção adequada ao leme da embarcação, é necessário estabelecer uma ligação elétrica dedicada, que envolve a conexão de um cabo flexível do topo da coronha do leme ao casco do navio (VASILESCU; PANAITESCU; PANAITESCU, 2019).

Comparativamente, o sistema de aterramento empregado pela FCN segue padrões similares aos utilizados em outras embarcações, embora necessite de melhorias no que tange a aquisição de um equipamento para monitoramento do potencial do eixo.

#### 4.3.5 Análise Documental

Tanto as FCN quanto os demais meios navais da MB equipados com o SPC realizam inspeções periódicas para avaliar o desempenho de seus sistemas. Essas inspeções são conduzidas por uma equipe técnica do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ).

A inspeção técnica é realizada em duas fases: a primeira ocorre enquanto o navio está atracado no cais, e a segunda quando o navio está docado, em dique seco. Durante a primeira fase, os técnicos certificam-se de que os retificadores de corrente estão operando dentro dos parâmetros de fabricação, além de analisar se o equipamento está recebendo leituras precisas dos eletrodos e fornecendo a corrente necessária aos anodos inertes para garantir a integridade estrutural do casco. Além disso, os técnicos também medem as tensões e as correntes dos anodos permanentes, bem como mede o potencial elétrico do casco através dos eletrodos. Após isso, desliga o equipamento e desconecta os cabos dos anodos e eletrodos, medindo a tensão dos equipamentos desconectados, é necessário que esses dispositivos tenham tensão garantindo que estão íntegros.

Entretanto, na segunda fase, os técnicos avaliam a condição dos cabos de conexão entre os eletrodos e os retificadores de corrente, bem como entre os retificadores de corrente e os anodos permanentes, identificando possíveis curtos-circuitos nos cabos, que neste caso, quanto maior for a resistência de isolamento dos cabos, melhor será a qualidade da leitura do sinal transmitido.

Adicionalmente, os técnicos avaliam o estado físico e estrutural desses equipamentos, bem como a qualidade dos sistemas de aterramento do leme e do eixo propulsor.

Para análise dos parâmetros os técnicos do AMRJ utilizam o manual do equipamento como referência para garantir que a inspeção seja realizada de acordo com os padrões estabelecidos pelo fabricante. Ao término de cada inspeção, eles elaboram um relatório que indica o resultado da avaliação, podendo ser classificado como "Satisfatório", "Não Satisfatório" ou "Satisfatório com Observação".

Um resultado "Satisfatório" denota que o navio está operando com todo o sistema de proteção em conformidade com os padrões definidos pelo fabricante. Quando o resultado é "Satisfatório com Observação", isso significa que uma parte sistema de proteção está operando fora dos parâmetros exigidos pelo fabricante, embora ainda não tenha causado problemas graves que inviabilizem o funcionamento do sistema, porém há necessidade uma manutenção preditiva. Por outro lado, um resultado "Não Satisfatório" indica que ocorreu uma avaria ou falha no sistema de proteção que o deixou inoperante, exigindo reparo imediato do equipamento.

É importante destacar que, por motivos de confidencialidade dos dados técnicos coletados nas inspeções das FCN, os relatórios não são anexados a este trabalho.

## **5 CONCLUSÃO**

A avaliação geral do SPC das FCN e de seus principais componentes forneceram uma visão de suas capacidades e eficácia. A análise comparativa entre os sistemas de PCCI e PCG permitiram uma avaliação das vantagens e desvantagens do sistema de proteção, ficando evidente que o sistema PCCI, empregado nas FCN, demonstrou ser eficaz por oferecer as Fragatas um controle automático da corrente de proteção, tornando o navio adaptável às variações do ambiente marinho, seja em água salgada ou doce, além do sistema de proteção PCCI ser mais durável que o sistema PCG. Entretanto, o sistema adotado pelas FCN precisa passar por uma modernização do aterramento do eixo propulsor, instalando um equipamento responsável pelo monitoramento do potencial elétrico na região da popa, garantindo uma leitura mais precisa dos parâmetros do eixo propulsão. A segurança e a vida útil das embarcações são de suma importância e, nesse sentido, é recomendável que sejam exploradas oportunidades para otimizar o SPC existente.

A avaliação constante da conformidade com os requisitos estabelecidos pela MB é crucial para garantir que o SPC permaneça eficaz ao longo do tempo. Portanto, sugere-se uma abordagem proativa na busca por melhorias e na consideração de alternativas que possam contribuir para a segurança e a longevidade das FCN.

### **5.1 Considerações Finais**

O estudo foi importante para aprofundar a compreensão sobre o funcionamento dos equipamentos do SPC, bem como sua conformidade com as bibliografias especializadas. Mesmo sem conduzir inspeções técnicas aprofundadas, foi possível constatar que o projeto original do sistema de PCCI das FCN foi minuciosamente projetado. Além disso, a evolução do sistema ao longo do tempo, refletida nas MODTEC, demonstra o contínuo empenho da MB em manter as embarcações em condições ideais de operação.

## **5.2 Sugestões para futuros trabalhos**

Sugere-se a realização de uma análise de custo-benefício abrangente, visando aquisição e manutenção de um sistema de proteção, com o propósito de determinar os benefícios em relação aos investimentos e determinar qual método se alinha de forma mais econômica com os recursos disponíveis. Além disso, é ideal conduzir uma avaliação técnica detalhada das medições relacionadas aos potenciais elétricos do casco, com o objetivo de verificar a conformidade dos dados coletados com as especificações estipuladas no manual do equipamento, garantindo, assim, a precisão e eficácia do sistema.

Dentre essas sugestões, após análise do relatório de inspeção recomenda-se que nos próximos trabalhos incluam um modelo de relatório contendo os dados já existente no relatório atual e, adicionalmente, uma tabela com as faixas de parâmetros de medição ideal do fabricante a fim de orientar e facilitar a análise quando verificado pelos militares de bordo.

## REFERÊNCIA

- ADEY, Robert; LODGE, Ashurst; PEI, Yuan Hang. Computer Simulation as an Aid to Corrosion Control and Reduction. [s. l.], 2023.
- CARDOSO, Carlos. **Como navios se protegem de corrosão? Com sacrifícios, claro.** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://meiobit.com/431816/como-navios-se-protegem-de-corrosao-com-sacrificios-claro/>. Acesso em: 31 ago. 2023.
- CIAA. **Manutenção dos sistemas de proteção catódica e Degaussing 3º Revisão.** 2022. Apostila.
- COSTA, Cintia Pinheiro. Aplicação da Proteção Catódica da Marinha Mercante. [s. l.], 2016.
- COTTING, Fernando. O futuro das tintas anticorrosivas. **Corrosão & Proteção**, [s. l.], 2015. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abraco.org.br/src/uploads/2015/04/Revista-corrosao-e-protecao-56.pdf>.
- DEN. **CATHODIC PROTECTION SYSTEM MANUAL.** [S. l.]: Marinha do Brasil, 1976.
- DENSM. **Proteção Catódica.** [S. l.: s. n.], 1977.
- DUTRA, Aldo; NUNES, Laerce. Considerações gerais sobre proteção catódica por corrente impressa em navios. [s. l.], 2018. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2018/INTERCORR2018\\_228.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2018/INTERCORR2018_228.pdf).
- G, G. HAWKINS; REEVE, BENHAM; REEVE, RICHARDS. **Immersion of H.M.S. Samarang in the Sarawak.** [S. l.], 1848. Disponível em: <https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-110279>.
- GALANTE, Alexandre. Fragata Constituição completa 40 anos de incorporação à MB. *In: PODER NAVAL.* 31 mar. 2018. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2018/03/31/fragata-constituicao-completa-40-anos-de-incorporacao-a-mb/>. Acesso em: 1 set. 2023.
- GOMES, Luiz Paulo. **SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA.** IEC-INSTALAÇÕES E ENGENHARIA DE. CORROSÃO LTDAed. [S. l.: s. n.], 1995. Disponível em: [https://www.academia.edu/es/44359030/SISTEMAS\\_DE\\_PROTE%3%87%C3%83O\\_CAT%3%93DICA](https://www.academia.edu/es/44359030/SISTEMAS_DE_PROTE%3%87%C3%83O_CAT%3%93DICA). Acesso em: 15 out. 2023.
- HOU, Xiangyu *et al.* Corrosion and Protection of Metal in the Seawater Desalination. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 108, p. 022037, 2018.
- LIMA, Eduardo. **AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE INIBIDORA DA CORROSÃO DE AMINAS A PARTIR DO ASPECTO MOLECULAR.** 2015. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, São Carlos – SP, 2015. Disponível em: chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglefindmkaj/https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/7288/DissEGAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Ensino da Marinha. **Sistema de Proteção Catódica (SPC) dos meios navais**. ENGENALMARINST N° 60-06, , 2019.

MARQUES, André; RIBEIRO, Guilherme; ARAÚJO, Matheus. **CENTRO UNIVERSITÁRIO POSITIVO CORROSÃO EM TUBOS DE ALUMÍNIO DE RADIADORES PARA USO AUTOMOTIVO**. 2007. [s. l.], 2007. Disponível em: <https://docplayer.com.br/11771236-Centro-universitario-positivo-corrosao-em-tubos-de-aluminio-de-radiadores-para-uso-automotivo.html>. Acesso em: 30 ago. 2023.

MATHUR, Anmol. **Hull Corrosion And Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) On Ships - Construction And Working**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.marineinsight.com/tech/hull-corrosion-and-impressed-current-cathodic-protection-iccp-on-ships-construction-and-working/>. Acesso em: 29 ago. 2023.

MATTOS, CAMILA; GUILHEM, DOUGLAS; PAIXÃO, ERISTON. **AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE ÂNODOS DE SACRIFÍCIO APLICADOS EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO EM ZONA DE VARIAÇÃO DE MARÉ**. 2010. - IDD, SÃO PAULO, 2010.

MORGAN, J. H.; ENGINEERS, National Association of Corrosion. **Cathodic Protection**. [S. l.]: National Association of Corrosion Engineers, 1987. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=hzZQzQEACAAJ>.

PAUL, Dev. DC Stray Current in Rail Transit Systems and Cathodic Protection [History]. **IEEE Industry Applications Magazine**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 8–13, 2016.

PINHEIRO, Marcio Augusto Rollin; SILVA, Renato Cesar Lima. Análise de corrosão e aplicação de revestimentos anticorrosivos em cascos de navios. [s. l.], 2015. Disponível em: <http://app.uff.br/riuff/handle/1/797>. Acesso em: 29 ago. 2023.

REDAÇÃO. Corrosão no barco: veja algumas formas de evitar este problema. *In*: NÁUTICA. 24 maio 2021. Disponível em: <https://nautica.com.br/corrosao-barco-como-evitar/>. Acesso em: 15 out. 2023.

SILVA, VICTOR. **USO DO ANODO DE ZINCO NA PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS EM AMBIENTES MARINHOS**. 2011. - CENTRO UNIVERSITÁRIO ESTADUAL DA ZONA OESTE, [s. l.], 2011.

SOUSA, José Arimateia Cavalcante de. **Estudo teórico da proteção catódica de estrutura metálica flutuante de captação de água. Estudo de caso: Açude Gavião**. 2007. [s. l.], 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/48955>. Acesso em: 15 out. 2023.

TIAN, NAN *et al.* TRENDS IN WORLD MILITARY EXPENDITURE. **SIPRI Fact Sheet**, [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.sipri.org/publications>. Acesso em: 15 ago. 2023.

UNKNOWN. TE&M Antidesgaste: O Processo da Corrosão. *In: TE&M ANTIDESGASTE*. 2016. Disponível em: <http://temantidesgaste.blogspot.com/2016/09/o-processo-da-corrosao.html>. Acesso em: 29 ago. 2023.

VASILESCU, Mihail-Vlad; PANAITESCU, Mariana; PANAITESCU, Fănel-Viorel. Marine Impressed Current Cathodic Protection System. [*s. l.*], 2019.