

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CC JOAQUIM ALVES MARIANO NETO

**IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA:
Uma abordagem proativa na manutenção 4.0**

Rio de Janeiro

2024

CC JOAQUIM ALVES MARIANO NETO

**IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA:
Uma abordagem proativa na manutenção 4.0**

Dissertação apresentada à Escola de Guerra Naval, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Estado-Maior para Oficiais Superiores.

Orientador: CF (RM1-EN) José Roberto BRITO de Souza

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval
2024

DECLARAÇÃO DA NÃO EXISTÊNCIA DE APROPRIAÇÃO INTELECTUAL IRREGULAR

Declaro que este trabalho acadêmico: a) corresponde ao resultado de investigação por mim desenvolvida, enquanto discente da Escola de Guerra Naval (EGN); b) é um trabalho original, ou seja, que não foi por mim anteriormente utilizado para fins acadêmicos ou quaisquer outros; c) é inédito, isto é, não foi ainda objeto de publicação; e d) é de minha integral e exclusiva autoria.

Declaro também que tenho ciência de que a utilização de ideias ou palavras de autoria de outrem, sem a devida identificação da fonte, e o uso de recursos de inteligência artificial no processo de escrita constituem grave falta ética, moral, legal e disciplinar. Ademais, assumo o compromisso de que este trabalho possa, a qualquer tempo, ser analisado para verificação de sua originalidade e ineditismo, por meio de ferramentas de detecção de similaridades ou por profissionais qualificados.

Os direitos morais e patrimoniais deste trabalho acadêmico, nos termos da Lei 9.610/1998, pertencem ao seu Autor, sendo vedado o uso comercial sem prévia autorização. É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos e ideias expressas neste trabalho acadêmico são de responsabilidade do Autor e não retratam qualquer orientação institucional da EGN ou da Marinha do Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram ao longo desta jornada acadêmica. À minha família, pelo amor incondicional, paciência e suporte constante, que foram fundamentais para superar os desafios. Aos amigos, pelos momentos de alegria, encorajamento e compreensão, que proporcionaram equilíbrio e motivação. Aos meus orientadores e professores, pelo valioso conhecimento compartilhado, pela orientação incansável e pelo incentivo ao desenvolvimento acadêmico e profissional. A todos, minha sincera gratidão por acreditarem em mim e me ajudarem a alcançar este objetivo.

AGRADECIMENTO

Agradeço a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho acadêmico. Primeiramente, a Deus, que me deu força e sabedoria para superar os desafios e completar esta importante etapa. À minha família, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos, mesmo nas ausências. Aos meus pais, que sempre acreditaram no meu potencial e torceram pelo meu sucesso. Por fim, agradeço a todos os navios nos quais servi, seus oficiais e praças, por me proporcionarem todo o apoio necessário no crescimento profissional e intelectual. Gratidão.

A proatividade não é apenas uma habilidade, mas uma atitude que transcende qualquer inovação tecnológica, transformando desafios em oportunidades e prevenindo problemas antes que se tornem críticos.

O autor

RESUMO

O objeto de pesquisa desse trabalho aborda a implementação da Manutenção Preditiva (MPd) na Marinha do Brasil (MB), destacando os fundamentos teóricos, a evolução histórica e as vantagens dessa abordagem em comparação com as práticas corretivas e preventivas tradicionais. Inicialmente, são discutidos os conceitos básicos e a história da manutenção preditiva, que utiliza tecnologias como *machine learning*, *big data* e redes neurais artificiais para monitorar e prever falhas em equipamentos antes que ocorram. A dissertação também analisa a situação atual da manutenção na MB, identificando problemas como a alta dependência de métodos corretivos, falta de recursos e pessoal qualificado, e uma frota envelhecida. A necessidade de modernização é destacada, propondo-se uma transição para práticas preditivas que aumentem a eficiência operacional e reduzam custos. Estudos de caso, incluindo a Marinha Portuguesa e a *United States Navy* (USN), são apresentados para ilustrar os benefícios e desafios da manutenção preditiva, mostrando reduções significativas nos custos operacionais e melhorias na disponibilidade dos equipamentos. A dissertação conclui com recomendações práticas para a implementação da manutenção preditiva na MB, enfatizando a importância de um compromisso estratégico, investimento em tecnologias avançadas e capacitação contínua do pessoal, sugerindo que essa abordagem é essencial para enfrentar os desafios contemporâneos e futuros, garantindo maior prontidão operacional e segurança nas operações marítimas.

Palavras-chave: Manutenção Preditiva. Eficiência Operacional. Redução de Custos. Monitoramento Contínuo, Análise de Dados. Estratégia de Manutenção. Eficiência na Manutenção. Planejamento de Manutenção. Integração Tecnológica. Proatividade

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE MAINTENANCE: A PROACTIVE APPROACH IN MAINTENANCE 4.0

The research objective of this dissertation addresses the implementation of predictive maintenance in the Brazilian Navy (MB), highlighting the theoretical foundations, historical evolution, and advantages of this approach compared to traditional corrective and preventive practices. Initially, the basic concepts and history of predictive maintenance are discussed, which uses technologies such as machine learning, big data, and artificial neural networks to monitor and predict equipment failures before they occur. The dissertation also analyzes the current maintenance situation in the MB, identifying problems such as high dependency on corrective methods, lack of resources and qualified personnel, and an aging fleet. The need for modernization is highlighted, proposing a transition to predictive practices that increase operational efficiency and reduce costs. Case studies, including those from the Portuguese Navy and the United States Navy, are presented to illustrate the benefits and challenges of predictive maintenance, showing significant reductions in operational costs and improvements in equipment availability. The dissertation concludes with practical recommendations for implementing predictive maintenance in the MB, emphasizing the importance of strategic commitment, investment in advanced technologies, and continuous personnel training, suggesting that this approach is essential to meet contemporary and future challenges, ensuring greater operational readiness and safety in maritime operations.

Keywords: Predictive Maintenance. Operational Efficiency. Cost Reduction. Continuous Monitoring. Data Analysis. Maintenance Strategy. Maintenance Efficiency. Maintenance Planning. Technological Integration. Proactivity

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGI - Artificial General Intelligence (Inteligência Artificial Geral)

AI - Artificial Intelligence (Inteligência Artificial)

ANI - Artificial Narrow Intelligence (Inteligência Artificial Limitada)

AN - Artificial Neural Networks (Redes Neurais Artificiais)

ASI - Artificial Superintelligence (Superinteligência Artificial)

BDA - Big Data Analytics

CBM - Condition-Based Maintenance (Manutenção Baseada na Condição)

CBM+ - Manutenção Baseada na Condição Plus

CMMS - Computerized Maintenance Management System (Sistema de Gerenciamento de Manutenção Computadorizada)

DoD - Department of Defense (Departamento de Defesa dos EUA)

EMA - Estado-Maior da Armada

FMEA - Failure Modes and Effects Analysis (Análise dos Modos de Falha e Efeitos)

ICAS - Integrated Condition Assessment System

IoT - Internet of Things (Internet das Coisas)

MB - Marinha do Brasil

ML - Machine Learning (Aprendizado de Máquina)

MP - Manutenção Preventiva

MPd - Manutenção Preditiva

MTBF - Mean Time Between Failures (Tempo Médio Entre Falhas)

MTTF - Mean Time To Failure (Tempo Médio Para Falha)

NBR - Norma Brasileira

NRP - Navio da República Portuguesa

RCM - Reliability-Centered Maintenance (Manutenção Centrada na Confiabilidade)

RNA - Rede Neural Artificial

SEDMP - Sistema de Elaboração da Documentação de Manutenção Planejada

SFMVA - Equipe de Análise de Vibração das Máquinas das Forças Navais

SisSMP - Sistema Informatizado do Sistema de Manutenção Planejada

SMP - Sistema de Manutenção Planejada

SNN - Simulated Neural Network (Rede Neural Simulada)

TIP4.0 - Tecnologia de Manutenção Preditiva Industrial

USN - United States Navy

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 ASPECTOS TEÓRICOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	14
2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	14
2.1.1 Conceitos Básicos de Manutenção.....	14
2.1.2 Definição e conceitos fundamentais da manutenção preditiva.....	16
2.2 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO.....	17
2.3 COMPARAÇÃO ENTRE TIPOS DE MANUTENÇÃO.....	19
2.3.1 Tipos de Manutenção.....	19
2.3.2 Comparação Geral.....	21
3 SITUAÇÃO DA MANUTENÇÃO NA MARINHA DO BRASIL.....	23
3.1 PRÁTICAS DE MANUTENÇÃO NA MARINHA DO BRASIL.....	23
3.1.1 Estrutura do Sistema de Manutenção Planejada.....	23
3.1.2 Documentação do Sistema de Manutenção Planejada.....	24
3.2 PROBLEMAS IDENTIFICADOS.....	25
3.3 NECESSIDADE DE MUDANÇA.....	26
3.3.1 Problemas com a Manutenção Atual.....	26
3.3.2 Vantagens da Manutenção Preditiva.....	27
3.3.3 Perda de Capacidade e Conhecimento.....	27
3.3.4 Falta de Recursos e Capacitação.....	27
4 ARQUITETURA DOS SISTEMAS E AVANÇOS TECNOLÓGICOS.....	28
4.1 SISTEMAS TECNOLÓGICOS UTILIZADOS.....	28
4.1.1 Tecnologias de <i>Machine Learning</i>	28
4.1.2 Análise de <i>Big Data</i>	29
4.1.4 Plataformas de Dados Integradas.....	31
4.2 ESTUDOS DE CASO.....	32
4.2.1 Marinha Portuguesa NRP Viana do Castelo.....	32
4.2.2 Aplicação de Manutenção Preditiva na <i>United States Navy</i>	33
4.2.3 Planta de Biogás no Brasil.....	36
4.3 BENEFÍCIOS E DESAFIOS.....	37
4.3.1 Benefícios Esperados.....	37
4.3.2 Desafios a Serem Enfrentados.....	38
5 EXECUÇÃO PRÁTICA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	41

5.1 PASSOS PARA IMPLEMENTAÇÃO.....	41
5.2 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	43
5.2.1 Resultados Esperados da Implementação da CBM+.....	43
5.2.2 Resultados Observados após a Implementação da CBM+.....	44
5.3 RECOMENDAÇÕES.....	45
5.3.1 Implementação de Manutenção Preditiva.....	45
5.3.2 Capacitação e Treinamento Contínuos.....	47
6 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, o avanço tecnológico tem transformado rapidamente diversos setores, e a Manutenção Preditiva (MPd) emerge como uma abordagem inovadora e essencial para a preservação e otimização dos ativos industriais. A MPd, utilizando técnicas de *machine learning* e análise de *big data*, permite monitorar e prever falhas em equipamentos, promovendo intervenções antes que ocorram avarias críticas. Essa transformação tecnológica não apenas aumenta a eficiência operacional, mas também reduz significativamente os custos de manutenção, minimizando o tempo de inatividade dos equipamentos e aumentando a confiabilidade dos sistemas.

Entretanto, a implementação da MPd enfrenta desafios significativos, especialmente em organizações tradicionais como a Marinha do Brasil (MB). A necessidade de modernizar as práticas de manutenção e integrar novas tecnologias é imperativa para garantir a eficiência e a eficácia operacionais. A MB, com uma longa história de manutenção corretiva e preventiva, deve agora considerar a adoção de práticas preditivas para enfrentar os desafios contemporâneos e futuros.

Neste contexto, o objeto desta pesquisa é analisar a viabilidade e os benefícios da implementação da MPd na MB. Através de um estudo detalhado das práticas atuais de manutenção e uma análise comparativa com as metodologias preditivas, busca-se identificar as áreas que poderiam se beneficiar mais significativamente dessa transformação. A investigação focará nas tecnologias disponíveis, nos desafios de implementação e nos potenciais ganhos operacionais e econômicos.

A necessidade de eficiência e redução de custos nas operações de manutenção naval justifica este estudo. A evolução das tecnologias de monitoramento e análise de dados permite à MB aprimorar suas práticas de manutenção, aumentando a disponibilidade dos meios. A implementação da MPd oferece uma solução eficaz para limitações orçamentárias e desafios técnicos. Este estudo é relevante pela importância estratégica da Marinha na defesa nacional e pela necessidade de manter uma frota operacional eficiente. A adoção de práticas modernas de manutenção também pode influenciar outras instituições militares e civis no país, promovendo inovação e melhoria contínua.

Para alcançar os objetivos deste estudo, a metodologia empregada incluirá uma revisão bibliográfica extensa sobre manutenção preditiva, análise de dados coletados em estudos de caso na MB e entrevistas com especialistas na área. Será realizada uma análise comparativa das práticas de manutenção atuais e propostas preditivas, utilizando

ferramentas estatísticas e de modelagem para avaliar os potenciais impactos operacionais e econômicos.

O objetivo geral desta pesquisa é diagnosticar as condições e desafios para implementar a MPd na MB, identificando fatores críticos que podem impactar sua adoção gradual e sustentável. Busca-se avaliar como a MPd pode melhorar a eficiência e longevidade dos ativos navais, considerando benefícios e possíveis obstáculos. O estudo pretende oferecer um entendimento das necessidades, limitações e oportunidades para a adoção dessa prática, abordando desafios específicos e propondo soluções adequadas à realidade operacional da MB.

A organização deste trabalho segue uma estrutura clara e lógica para garantir uma compreensão completa e detalhada do tema. No capítulo 2, serão apresentados os aspectos teóricos da manutenção preditiva, incluindo seus fundamentos, evolução histórica e comparação com outros tipos de manutenção. Este capítulo fornecerá a base conceitual necessária para entender a importância e os benefícios da manutenção preditiva.

Em seguida, no capítulo 3, será analisada a situação atual da manutenção na MB. Serão discutidas as práticas de manutenção existentes, os problemas identificados e a necessidade urgente de mudança. Este capítulo fornecerá um panorama das limitações e desafios enfrentados pela Marinha, destacando a necessidade de adotar novas abordagens.

O capítulo 4 explorará a arquitetura dos sistemas tecnológicos e os avanços que suportam a manutenção preditiva. Serão detalhadas as tecnologias de machine learning, análise de big data, redes neurais artificiais e plataformas de dados integradas, além de estudos de caso de sucesso em outras marinhas e setores industriais. Este capítulo mostrará como essas tecnologias podem ser aplicadas na prática.

No capítulo 5, será abordada a execução prática da manutenção preditiva. Serão apresentados os passos para a implementação, análise de resultados esperados e observados após a implementação, além de recomendações específicas para a MB. Este capítulo fornecerá um guia prático para a adoção da manutenção preditiva, destacando as melhores práticas e lições aprendidas.

Por fim, o capítulo 6 apresentará as conclusões do estudo, resumindo os principais achados e propostas. Serão discutidas as implicações dos resultados para a MB e as recomendações para futuras pesquisas e práticas. Este capítulo encerrará o trabalho com uma visão clara dos próximos passos necessários para a transformação da manutenção naval no Brasil.

2 ASPECTOS TEÓRICOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais da MPd, abordando sua importância para aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Explora também a evolução das práticas de manutenção e compara os tipos corretiva, preventiva e preditiva, mostrando como a análise de dados e o monitoramento contínuo ajudam a prever falhas, reduzir custos e otimizar a operação.

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.1 Conceitos Básicos de Manutenção

É inegável que todas as máquinas e equipamentos sofrem um certo desgaste com o uso. Com o avanço tecnológico observado desde a década de quarenta, novos conceitos foram criados e outros foram aprimorados, combinando diversas teorias abstratas com aplicações práticas concretas (Nepomuceno, 1989). Entre tais conceitos, que foram estudados e aperfeiçoados nas últimas décadas, tem-se a manutenção, confiabilidade e a disponibilidade.

Conceito de Manutenção, Acordo Kardec e Nascif (2013), o conceito predominante de que a Missão da Manutenção é de restabelecer as condições originais dos equipamentos/sistemas está ultrapassado. Atualmente, a Missão da Manutenção é:

Garantir a Disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de prestação de serviços com Confiabilidade, Segurança, Preservação do Meio Ambiente e Custo adequado (Kardec; Nascif, 2013, p. 18).

De encontro com esta idéia a publicação da MB EMA 420 - Normas para Logística de Material (2002) define a manutenção como:

É o conjunto de atividades técnicas e administrativas que são executadas visando manter o material na melhor condição para emprego com confiabilidade, segurança e custo adequado e, quando houver avarias, reconduzi-lo àquela condição (Brasil, 2002, p. 3-1).

Abordando assim, a definição de manutenção de forma abrangente, explicando que envolve atividades técnicas e administrativas para manter e restaurar o material conforme necessário, com ênfase em confiabilidade, segurança e custo adequado. Referente a disponibilidade o EMA 420 (2002) a aborda em contexto que será explanado

a posteriori, no entendimento geral a missão definida não é preservar o equipamento, mas sim a função do sistema.

A confiabilidade é um conceito essencial que quase todos acreditam entender de forma intuitiva. Contudo, entre os especialistas, definir esse conceito de maneira clara e precisa é extremamente desafiador. Essa dificuldade se deve à aplicação do conceito em diversas situações que os especialistas enfrentam em suas atividades. Em termos gerais, pode-se adotar a seguinte definição:

Por confiabilidade entende-se a probabilidade de um produto (peça, equipamento, circuito, máquina, peça, sistema, componente, etc.) fabricado de conformidade com dado projeto operar durante um período especificado de tempo (eventualmente o tempo de vida útil) sem apresentar falhas identificáveis, desde que sujeito a manutenção de conformidade com as instruções do fabricante e que não tenha sofrido tensões superiores aquelas estipuladas por limites indicados pelo fornecedor, não tenha sido exposto a condições ambientais adversas de conformidade com os termos de fornecimento ou aquisição (Nepomuceno, 1989 p. 56).

Porém, o EMA 420 (2002), define a confiabilidade no contexto das atividades de manutenção como propósito do conjunto de atividades técnicas e administrativas que visam manter o material na melhor condição para emprego. A confiabilidade é aumentada por meio da manutenção planejada, cujo objetivo é evitar falhas e garantir a operação contínua dos equipamentos pelo maior tempo possível.

Logo, entende-se que um sistema é considerado confiável quando continua a desempenhar suas funções durante toda a sua vida útil, independentemente de condições favoráveis ou desfavoráveis. É importante notar que nenhum dispositivo ou equipamento pode operar de maneira confiável sem a manutenção adequada. Da mesma forma, as condições descritas como desfavoráveis não devem exceder limites considerados razoáveis.

O conceito da disponibilidade de um sistema consiste numa medida, a qual nepomuceno exemplifica pela expressão:

"A" = tempo disponível para utilização/ tempo disponível + tempo ocioso
Observando-se que: O tempo disponível é aquele durante o qual a máquina, produto ou equipamento está apto a operar sem problemas, estando, realmente, disponível para cumprir as funções que lhe são destinadas. O tempo ocioso é aquele durante o qual o dispositivo não apresenta condições de funcionamento, por estar sofrendo manutenção ou intervenção devido a operação inadequada (Nepomuceno, 1989, p. 69).

Já o EMA 420 (2002) aborda disponibilidade no que se refere ao objetivo da manutenção planejada e é aumentada através do cumprimento da coletânea de rotinas

programadas para o ciclo de vida útil do meio. Que indica a proporção do tempo total em relação ao tempo que o meio está disponível ao cumprimento das funções para as quais foi destinado (Brasil, 2002).

2.1.2 Definição e conceitos fundamentais da manutenção preditiva

A MPd é uma abordagem de manutenção que utiliza a análise de dados e monitoramento contínuo de equipamentos para prever e prevenir falhas antes que ocorram. A seguir analisaremos alguns conceitos fundamentais da manutenção preditiva:

- **Análise de Dados:** A análise detalhada dos sinais mecânicos é crucial para identificar uma série de características importantes. Essas características permitem a elaboração de diagnósticos precisos, que são fundamentais para desenvolver e executar um programa de MPd eficaz. Ao estudar os métodos, processos e técnicas de medição das variáveis de interesse na Manutenção, observamos que conectar um acelerômetro a um osciloscópio permite visualizar a variação temporal de um fenômeno mecânico. Isso transforma o sinal mecânico em um sinal elétrico, que pode ser processado por dispositivos visuais, analógicos ou digitais. Os transdutores geralmente apresentam os sinais como correntes alternadas, com diversas amplitudes, frequências e relações de fase variáveis. Essa mistura complexa de sinais precisa ser separada e analisada detalhadamente para entender cada componente. A análise e o processamento de dados para interpretar sinais de vibrações têm sido realizados há décadas. Atualmente, várias técnicas de monitoramento utilizam métodos similares para interpretar sinais de diversos parâmetros (Nepomuceno, 1989).

- **Monitoramento Contínuo:** Baseia-se na coleta contínua de dados dos equipamentos utilizando sensores e outras tecnologias de monitoramento de: temperatura; vibração; óleo lubrificante; óleo isolante; som ou ruído; espessura de parede. O monitoramento pode ser subjetivo, objetivo offline ou online. O subjetivo é realizado por meio dos sentidos humanos, especialmente a visão, o tato, o olfato e a audição. Por outro lado, o monitoramento objetivo envolve o uso de aparelhos ou instrumentos que medem e indicam uma variável ou parâmetro específico a ser acompanhado (Kardec; Nascif, 2013).

- **Diagnóstico:** Abrange a identificação da causa raiz dos problemas detectados, os dispositivos emitem sinais de alteração na forma de uma certa energia, que é dissipada de uma maneira que pode sempre ser avaliada e medida, ou seja, convertida em um valor numérico. A variação desse valor numérico, relacionado à energia dissipada,

serve como base para o processo de medição e, conseqüentemente, para o monitoramento e gestão do estado do componente ou máquina (Nepomuceno, 1989). O uso combinado de múltiplas técnicas preditivas tem se mostrado uma ferramenta de grande importância para o diagnóstico. De maneira similar aos recursos técnicos utilizados pelos médicos, essas técnicas permitem que a equipe de manutenção alcance uma precisão cada vez maior nos diagnósticos. (Kardec; Nascif, 2013).

- Prognóstico: Envolve a previsão de quando e como uma falha pode ocorrer, permitindo o planejamento de ações corretivas. Sempre que houver um desgaste, haverá uma variação dos parâmetros mensuráveis ao detectar essas variações é possível tomar medidas preventivas para evitar prejuízos significativos. A MP é mais eficiente quanto mais rapidamente essas variações forem identificadas, permitindo prever com antecedência as ações necessárias para evitar paradas ou falhas não programadas, garantindo a continuidade e eficiência do sistema (Nepomuceno, 1989).

2.2 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO

O símbolo da primeira revolução industrial foi a máquina a vapor inventada por James Watt em 1765. A forma mais característica de manutenção durante este período foi a manutenção corretiva, onde os reparos eram feitos apenas após a quebra. A estratégia de deixar o dispositivo funcionar até quebrar foi a primeira que a humanidade naturalmente aplicou (Poór; Zenísek; Basl, 2019).

A segunda revolução industrial começou cerca de cem anos depois, em 1870, e estava conectada à eletrificação e às linhas de montagem. No auge da segunda revolução industrial, apareceram as primeiras tentativas de manutenção preventiva (MP). Também conhecida como manutenção planejada a MP pode ser caracterizada como uma ação baseada em um cronograma específico que identifica, evita ou mitiga a deterioração do estado do componente ou sistema (Poór; Zenísek; Basl, 2019).

Análogo a história, até a década de 1970, a MB realizava principalmente manutenções corretivas não planejadas em seus meios navais. Isso mudou com a chegada das Fragatas Classe Niterói no final dos anos 1970 e início dos anos 1980, período em que a MB passou a adotar práticas de manutenção mais avançadas. Nesse contexto, a MB implementou um Sistema de Manutenção Planejada (SMP) inspirado nas rotinas da Royal Navy do Reino Unido. Esse novo sistema de manutenção focava em intervenções preventivas, planejando a substituição de itens ou componentes com base

em critérios como horas de funcionamento e tempo de instalação. Além disso, essas intervenções preventivas eram programadas para coincidir com grandes períodos de manutenção, como o Período de Manutenção Geral (PMG) ou o Período de Docagem de Rotina (PDR), visando garantir maior disponibilidade e confiabilidade dos navios operacionais (Peixoto, 2020).

A terceira revolução industrial (segunda metade do século 20) está mais frequentemente associada à automação, eletrônica e à expansão da tecnologia da informação. Após a segunda guerra mundial, começou a aparecer um combinando manutenção corretiva e preventiva com uma abordagem analítica baseada em dados que deu origem a manutenção preditiva. A MPd traz maior vida útil dos equipamentos, menor tempo de inatividade, menor inventário de peças sobressalentes e é mais econômica. A revolução foi marcada pela introdução de computadores pessoais e a integração de sistemas automatizados em processos de produção (Poór; Zenísek; Basl, 2019).

Acompanhando essa tendência a MB em sua publicação ENGENALMARINST N° 85-18A - Processo Para Obtenção do Sistema de Manutenção Planejada (2020), aborda a MPd de forma indireta no contexto da manutenção planejada e da análise de confiabilidade dos sistemas. A aplicação de metodologias como os cartões de manutenção e o Sistema de Elaboração da Documentação de Manutenção Planejada (SEDMP) geram documentação atualizada com base em dados reais de desempenho e falhas dos equipamentos. Isso permite uma abordagem preditiva através da análise desses dados para antecipar falhas e planejar intervenções. A análise contínua e o monitoramento da condição dos equipamentos, bem como a atualização contínua dos dados de manutenção, permitem a identificação de tendências que podem ser usadas para prever e evitar falhas futuras. Dessa forma, a MPd é caracterizada dentro do escopo mais amplo do SMP.

A quarta revolução industrial (Indústria 4.0) é caracterizada por sistemas ciber-físicos, IoT¹, redes, cloud e Big Data Analytics². A MPd na indústria 4.0, é o método de prevenir falhas de ativos analisando dados de produção para identificar padrões e prevenir problemas antes que aconteçam. Os títulos de trabalho envolvidos na manutenção

¹ IoT, do inglês "Internet of Things" Internet das Coisas é uma rede de dispositivos físicos, veículos, eletrodomésticos e outros objetos que possuem sensores, software e outras tecnologias embutidas para se conectarem e trocarem dados pela internet

² Big Data Analytics refere-se ao processo de examinar grandes e variados conjuntos de dados — conhecidos como Big Data — para descobrir padrões ocultos, correlações desconhecidas, tendências de mercado, preferências do cliente e outras informações úteis.

mudaram de artesãos experientes e inspetores drenados para engenheiros de confiabilidade e cientistas de dados. (Poór; Zenísek; Basl, 2019).

As revoluções industriais marcaram grandes mudanças na forma como os bens são produzidos, cada uma trazendo avanços tecnológicos significativos. A MPd evoluiu significativamente ao longo das quatro revoluções industriais, refletindo os avanços tecnológicos de cada era. No início do século 21 e na era da quarta revolução industrial, ferramentas computacionais e de visualização avançadas baseadas nas tecnologias mais recentes se tornaram os principais e necessários componentes da transformação digital na Indústria 4.0 (Achouch et al. 2022).

A MPd na era da Indústria 4.0 resulta em uma redução significativa de paradas não planejadas, maior eficiência operacional, redução de custos de manutenção e aumento da vida útil dos equipamentos. Essa evolução contínua da MPd reflete a capacidade crescente da tecnologia de coletar, analisar e agir sobre dados em tempo real, permitindo que as operações sejam mais confiáveis e eficientes.

2.3 COMPARAÇÃO ENTRE TIPOS DE MANUTENÇÃO

2.3.1 Tipos de Manutenção

A literatura prevê diferentes tipos de manutenções que podem ter uma sinergia entre si ou serem complementares, porém se baseiam em três pilares distintos dentro do ciclo de vida útil de um equipamento. De forma a sintetizar os tipos de manutenção e suas redundâncias, serão esclarecidos conceitualmente os três tipos principais de manutenção corretiva, preventiva e preditiva, que são estratégias distintas aplicadas para garantir a eficiência e a durabilidade dos equipamentos. Cada abordagem apresenta suas vantagens e desvantagens, que influenciam a escolha adequada para diferentes cenários:

A) Manutenção Corretiva: Como alusão ao nome é realizada após a ocorrência de uma pane destinada a reparar ou recuperar o material danificado, destinada a recolocar um equipamento em condições de executar uma função requerida (ABNT, 1994; Brasil, 2002). A manutenção corretiva não exige um investimento inicial significativo, pois não há necessidade de implementar programas de monitoramento ou manutenção regular. Isso pode ser uma vantagem considerável para empresas que precisam minimizar gastos imediatos (Kardec; Nascif, 2013). No entanto, essa abordagem aumenta o risco de indisponibilidade do equipamento, podendo resultar em perda de receita e custos

elevados de reparo devido a danos adicionais causados pela falha inicial. Essa estratégia é adequada para equipamentos não críticos e facilmente reparáveis, mas não é recomendada para componentes cuja falha possa causar paradas significativas ou danos a equipamentos associados, como caldeiras ou turbinas em uma usina. Em ambientes de produção contínua, defeitos podem passar despercebidos, já que a deterioração dos parâmetros de trabalho pode ser gradual. Para mitigar esses riscos, a manutenção corretiva deve ser complementada por análises descritivas e tecnologias de diagnóstico que detectem falhas antecipadamente, permitindo intervenções mais rápidas e eficazes (Moleda et al. 2023).

B) Manutenção Preventiva (MP): Programada por intervalos de tempo predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, a literatura é unânime no que tange ao objetivo: reduzir a possibilidade de falhas ou queda no desempenho do material, sua degradação e reduzir a possibilidade de avarias (ABNT, 1994; Brasil, 2002). Uma das principais vantagens é que ela melhora a confiabilidade dos sistemas, uma vez que não é esperado falhas durante o seu uso. Por outro lado, uma desvantagem é o aumento dos períodos em que os equipamentos estarão indisponíveis, devido à necessidade de realizar serviços de manutenção programados em intervalos regulares.

A MP visa evitar o tempo de inatividade não planejado através de inspeções e substituições periódicas programadas, baseadas em recomendações do fabricante e análise de parâmetros como Tempo Médio Entre Falhas (MTBF)³ e Tempo Médio Para Falha (MTTF)⁴. Suas vantagens incluem a redução do risco de tempo de inatividade, permitindo a programação de manutenções para prevenir falhas inesperadas e mantendo a eficiência operacional dos equipamentos. No entanto, a MP também apresenta desvantagens, como o aumento dos custos devido a substituições frequentes de peças, a necessidade de planejamento e os custos associados à manutenção regular, além de não proteger completamente contra todas as falhas inesperadas e defeitos não cobertos. Essas características destacam a importância de equilibrar os benefícios da MP com seus desafios financeiros e operacionais (Moleda et al. 2023).

C) Manutenção Preditiva: Acordo com a Norma NBR-5462 (1994):

Refere-se à manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, baseada na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a MP e diminuir a manutenção corretiva (ABNT, 1994, p7).

³MTBF: É uma medida do tempo médio que um sistema ou componente opera sem falhas.

⁴MTTF: É uma medida do tempo médio de operação até a falha de um sistema ou componente.

Ainda sim, o EMA 420 (2002) complementa ao propor que: consiste em medidas baseadas em modificações de parâmetros de condições ou desempenho, com o propósito de caracterizar, acompanhar, diagnosticar e analisar a evolução do estado de equipamentos e sistemas. Isso subsidia o planejamento e a execução de ações de manutenção para prevenir falhas e avarias, permitindo a operação contínua pelo maior tempo possível (Brasil, 2002).

Na manutenção preditiva, o serviço é realizado quando necessário, geralmente pouco antes de uma falha ser esperada. A essência dessa abordagem é prever a saúde de uma máquina com base em análises repetidas ou características conhecidas. Portanto, a MP é um tipo de manutenção baseada em condição, na qual prevemos o desempenho futuro com base em indicadores atuais e históricos. A aplicação dessa técnica leva à redução tanto do tempo de inatividade planejado quanto do não planejado. O tempo de inatividade planejado refere-se a ações preventivas que podem ser melhor programadas, e o tempo de inatividade não planejado está relacionado a falhas inesperadas que podem ser evitadas pelo monitoramento contínuo da condição do equipamento. No entanto, a MPd apresenta vantagens significativas, como a redução dos custos de manutenção a longo prazo, melhoria da vida útil dos equipamentos e aumento da eficiência na detecção de falhas. Por outro lado, enfrenta desafios como o custo inicial elevado, a necessidade de expertise em análise de dados e a dependência de dados de alta qualidade, além da complexidade na preparação e análise dos dados (Moleda et al. 2023).

A manutenção preditiva, representa a abordagem mais avançada de manutenção atualmente disponível, no contexto da Indústria 4.0 Este método envolve a análise contínua de grandes volumes de dados coletados de sensores em tempo real para identificar padrões complexos e anomalias (Poór; Zenísek; Basl, 2019).

Contextualizando as definições em lide constatamos que sua maior vantagem é permitir a operação contínua dos equipamentos pelo maior tempo possível reduzindo assim os custos envolvidos.

2.3.2 Comparação Geral

A escolha entre manutenção corretiva, preventiva e preditiva depende de diversos fatores, incluindo o tipo de equipamento, a criticidade das operações e os recursos disponíveis.

Manutenção Corretiva é mais adequada para cenários onde o custo inicial deve ser minimizado e a interrupção inesperada não resulta em grandes perdas. É simples de implementar, mas pode resultar em custos elevados devido a falhas inesperadas e impacto na qualidade.

MP é ideal para ambientes onde a confiabilidade é crítica e os custos de interrupção são elevados. Melhora a confiabilidade e a segurança, mas pode resultar em custos desnecessários devido à manutenção realizada em intervalos regulares. Essa estratégia visa maximizar a vida útil dos equipamentos, minimizar o tempo de inatividade não planejado e reduzir os custos de manutenção.

MPd oferece um equilíbrio, maximizando a eficiência e minimizando os custos a longo prazo. Permite a operação contínua e a redução de custos, mas requer um investimento significativo em tecnologia e habilidades especializadas.

Cada tipo de manutenção tem seu lugar nas estratégias de gestão de ativos. Integrar diferentes abordagens pode proporcionar um equilíbrio ideal, aproveitando as vantagens de cada método. Implementar uma estratégia de manutenção eficiente pode melhorar significativamente a confiabilidade dos equipamentos, reduzir custos operacionais e aumentar a produtividade geral. A análise cuidadosa das vantagens e desvantagens de cada tipo de manutenção ajuda a tomar decisões informadas e a escolher a estratégia mais adequada para cada situação específica.

3 SITUAÇÃO DA MANUTENÇÃO NA MARINHA DO BRASIL

Será abordada a manutenção na MB, com foco no sistema de manutenção planejada e seus desafios. Identificando problemas como restrições de orçamento, perda de pessoal qualificado e dificuldades com terceirização, que afetam a confiabilidade dos navios. A adoção da MPd e capacitação técnica é destacada como essencial para melhorar a prontidão operacional e assegurar a eficiência das operações.

3.1 PRÁTICAS DE MANUTENÇÃO NA MARINHA DO BRASIL

A MB adota o SMP, que é regido pela norma ENGENALMARINST N° 85-18A. Este sistema é elaborado e coordenado pela Diretoria de Engenharia Naval e busca garantir a eficiência e a eficácia na manutenção dos meios navais, desde sua obtenção até sua execução e controle.

3.1.1 Estrutura do Sistema de Manutenção Planejada

O SMP é organizado em quatro etapas principais: obtenção, execução, controle e atualização. Cada uma dessas etapas é fundamental para garantir a eficácia do sistema de manutenção:

Obtenção: Inclui a coleta de informações técnicas, manuais, listas de itens por equipamento, planos e desenhos dos compartimentos de máquinas, e a Análise de Engenharia de Manutenção. Esta etapa começa no projeto preliminar e deve ser concluída antes da incorporação do meio (Brasil, 2021).

Execução: Realizada pela tripulação dos meios (1º escalão), pessoal das bases de apoio (2º escalão), estaleiros (3º escalão) ou fabricantes (4º escalão). Inclui a programação, execução e registro das atividades de manutenção. As atividades são documentadas e supervisionadas para garantir conformidade com os planos de manutenção estabelecidos (Brasil, 2002).

Controle: Consiste na verificação e análise dos registros de manutenção. Envolve auditorias técnicas baseadas nos documentos de registro para obter informações precisas sobre o desempenho e a eficácia do SMP (Brasil, 2021).

Atualização: Baseada na análise e avaliação das falhas e insuficiências do SMP. Esta etapa é essencial para a melhoria contínua dos processos de manutenção, permitindo ajustes e otimizações conforme necessário (Brasil, 2002).

Na MB, a manutenção é dividida em quatro tipos principais para assegurar a operacionalidade contínua dos meios navais. A MP tem como objetivo reduzir ou evitar falhas através de intervenções periódicas programadas, mantendo os equipamentos em condições ideais. A MPd utiliza dados de condição e desempenho para diagnosticar e prever necessidades de manutenção, permitindo ações proativas antes que ocorram falhas. A Manutenção Corretiva foca na reparação ou recuperação de materiais danificados, restaurando sua funcionalidade original. Por fim, a Manutenção Modificadora adapta os equipamentos às novas exigências operacionais ou otimiza os processos de manutenção existentes, garantindo que os meios navais permaneçam atualizados e eficientes (Brasil, 2002).

3.1.2 Documentação do Sistema de Manutenção Planejada

A documentação é um componente vital do SMP da MB, pois fornece a base necessária para a execução eficaz das atividades de manutenção. Ela inclui índices de rotinas de manutenção, cartões de manutenção, listas de equipamentos e ferramentas especiais. Esses documentos detalham as tarefas específicas que devem ser realizadas, a periodicidade das atividades, os recursos necessários e as instruções detalhadas para a execução dos trabalhos. A gestão dessa documentação é realizada pelo SEDMP, que garante a criação e a manutenção de registros precisos e atualizados. A disponibilização dessa documentação é feita através do Sistema Informatizado de SMP conhecido como SisSMP, facilitando o acesso e a consulta pelas equipes de manutenção em tempo real (Brasil, 2021).

As práticas de manutenção na MB seguem um sistema estruturado que envolve desde a coleta inicial de informações e planejamento até a execução, controle e atualização contínua das atividades de manutenção. A documentação e o uso de sistemas informatizados contribuem para a eficiência e eficácia das operações, reforçando o papel da MPd no contexto naval. O SMP apoia a manutenção planejada por meio de práticas documentadas e controladas, buscando prolongar a vida útil dos meios navais e assegurar a segurança e eficácia operacional.

3.2 PROBLEMAS IDENTIFICADOS

A MB enfrenta um conjunto significativo de problemas e desafios na área de manutenção naval, que têm impactado negativamente a disponibilidade e a confiabilidade de suas embarcações. A MP adotada pela MB, tem se mostrado onerosa e nem sempre eficaz de acordo com Peixoto (2020), a inconsistência na aplicação dessas rotinas preventivas tem levado à degradação inesperada de componentes e ao surgimento de falhas inéditas, comprometendo a prontidão operacional dos navios.

Desde os anos 1990, a função logística da manutenção sofreu um retrocesso devido à falta de amadurecimento no planejamento e execução das atividades de manutenção. Isso resultou em intervenções menos eficientes e eficazes. Com a chegada das Fragatas Classe Niterói, a política de manutenção deveria ter se concentrado na melhoria contínua dos processos de manutenção corretiva e preventiva, utilizando inovações como a MPd para otimizar os resultados (Peixoto, 2020). No entanto, essa evolução não se concretizou plenamente.

A MB enfrenta uma série de problemas críticos relacionados à manutenção de sua frota e equipamentos. Entre os principais desafios identificados estão a redução na disponibilidade de sobressalentes, o desgaste acelerado de componentes, e a perda significativa de capacidade técnica. Esses problemas foram exacerbados por restrições orçamentárias e pelo envelhecimento da frota, criando um cenário em que as falhas se tornaram mais frequentes e severas (Peixoto, 2020).

As restrições financeiras têm desempenhado um papel crítico na crise de manutenção da MB. As limitações orçamentárias resultaram em demissões e desmobilização de pessoal, deixando muitos processos industriais descontinuados e máquinas operatrizes inoperantes por falta de recursos e conservação. Em 2019, a situação atingiu um ponto crítico, comprometendo a confiabilidade e a prontidão operacional dos navios. A perda de mão de obra qualificada e conhecimento técnico, exacerbada pela aposentadoria de pessoal capacitado sem a devida reposição, levou a uma crise de mão de obra qualificada, afetando negativamente os processos de reparo e manutenção (Fernandes, 2023).

Além disso, a terceirização foi adotada como uma solução para a falta de mão de obra, mas trouxe consigo novos desafios. Entre esses desafios estão a alta rotatividade de funcionários terceirizados, baixa qualidade dos serviços prestados, retrabalhos frequentes e dificuldades de fiscalização e controle. A falta de identificação com a cultura

organizacional da Marinha e a perda de conhecimento técnico devido à dependência de terceirizados também foram problemas significativos (Fernandes, 2023).

Ademais, a falta de uma política de manutenção que incorpore métodos modernos e inovadores tem resultado em correções mais complexas e demoradas. Esse contexto também tem contribuído para o aumento da "mortalidade infantil" dos equipamentos, ou seja, falhas prematuras após reparos ou substituições recentes (Peixoto, 2020).

Outro problema identificado é o predomínio das ações corretivas em detrimento das preventivas, o que agrava ainda mais as falhas e compromete a eficiência das operações. Em meio a esses desafios, a adoção de rotinas preditivas é apontada como uma solução necessária para reverter o quadro atual e melhorar a sistemática de manutenção da MB (Peixoto, 2020).

A crise atual na manutenção da MB é, portanto, resultado de uma combinação de fatores, incluindo restrições orçamentárias, perda de mão de obra qualificada, desafios na terceirização e inadequação das políticas de manutenção. Para superar esses desafios deve-se adotar uma abordagem integrada que combine inovações tecnológicas, melhores práticas gerenciais e uma política de manutenção proativa. Essa mudança estratégica é essencial para assegurar a disponibilidade operacional e a segurança das operações marítimas, garantindo que a MB continue a desempenhar seu papel crucial na defesa e segurança do país.

3.3 NECESSIDADE DE MUDANÇA

A MB enfrenta desafios significativos na manutenção de seus meios, marcados por inconsistências nas práticas preventivas, restrições financeiras e perda de mão de obra qualificada. A dependência de terceirização e a complexidade na elaboração de contratos agravam a situação. Para superar esses desafios, é fundamental que a MB adote práticas inovadoras, como a manutenção preditiva e o fortalecimento da capacitação técnica. Essas ações podem melhorar a disponibilidade e a confiabilidade dos navios, assegurando a prontidão operacional.

3.3.1 Problemas com a Manutenção Atual

Até a década de 1970, a MB utilizava predominantemente intervenções corretivas não planejadas, o que resultava em frequentes falhas e inatividade inesperada. Houve uma tentativa de modernização com a introdução das Fragatas Classe Niterói, inspirada nas práticas da *Royal Navy*, focando em intervenções preventivas (Peixoto, 2020). No entanto, a partir de meados da década de 1990, a logística de manutenção sofreu um retrocesso, levando a uma degradação dos componentes e à diminuição da confiabilidade e disponibilidade das embarcações (Peixoto, 2020).

3.3.2 Vantagens da Manutenção Preditiva

A MPd surge como uma solução promissora, permitindo a identificação precoce de falhas e intervenções mais eficazes, aumentando a confiabilidade e a prontidão operacional dos navios (Peixoto, 2020). Embora os custos iniciais sejam elevados, a MPd proporciona uma redução significativa nos custos ao longo do ciclo de vida dos navios, minimizando a necessidade de intervenções corretivas emergenciais.

3.3.3 Perda de Capacidade e Conhecimento

Acordo Fernandes (2023), desde os anos 2000, a MB tem enfrentado a desmobilização operacional e técnica, agravada pela saída de pessoal técnico qualificado, o que resultou na perda significativa de conhecimento acumulado. A falta de reposição adequada desse pessoal compromete a capacidade da MB de realizar reparos e manutenções de forma eficiente, destacando a necessidade de políticas de retenção e formação de talentos, além de uma gestão eficaz do conhecimento.

3.3.4 Falta de Recursos e Capacitação

A escassez de recursos financeiros, juntamente com a perda de capacidade e conhecimento, exacerba os desafios enfrentados pela MB. A idade avançada dos navios, como as Fragatas Classe Niterói, ilustra a necessidade constante de manutenção. A Diretoria Industrial da Marinha reconheceu a necessidade de investir em gestão e gerenciamento de projetos, bem como na terceirização de atividades-chave, para cumprir as metas estabelecidas no programa estratégico da Marinha (Fernandes, 2023).

4 ARQUITETURA DOS SISTEMAS E AVANÇOS TECNOLÓGICOS

A arquitetura dos sistemas de MPd é sustentada por tecnologias como sensores, *Machine Learning* e *Big Data*, que permitem monitoramento contínuo e diagnóstico preciso. Exemplos práticos, como os sistemas das marinhas de Portugal e dos EUA, evidenciam sua eficiência em otimizar a operação e reduzir custos. Contudo, a implementação da MPd demanda investimentos iniciais elevados e adaptações organizacionais, além de uma liderança forte para garantir seu pleno potencial e eficácia.

4.1 SISTEMAS TECNOLÓGICOS UTILIZADOS

A MPd é viabilizada por uma série de sistemas tecnológicos que trabalham em conjunto para melhorar a eficiência e a precisão das operações de manutenção. Entre esses, destacam-se os sensores, que coletam dados contínuos sobre o desempenho e o estado dos componentes do equipamento. Esses dados são analisados por redes neurais e algoritmos de deep learning que identificam padrões e anomalias que podem indicar problemas iminentes. Crucialmente, o machine learning desempenha um papel vital ao prever falhas antes que ocorram, permitindo uma intervenção proativa e eficiente (Silva; Santos, s.d.). Esses sistemas tecnológicos combinados as plataformas de dados integradas agregam informações de múltiplas fontes, permitindo uma visão macro do estado do sistema. A análise de Big Data processa esses vastos volumes de informações para extrair insights acionáveis. Nesse contexto o uso combinado de múltiplas técnicas tem se mostrado uma ferramenta de grande importância para o diagnóstico de maneira similar aos recursos técnicos utilizados pelos médicos, essas técnicas permitem que a equipe de manutenção alcance uma precisão cada vez maior nos diagnósticos (Kardec; Nascif, 2012).

Utilizando diversas tecnologias avançadas para monitorar a condição dos equipamentos e prever falhas antes que elas ocorram, decorreremos sobre as principais tecnologias aplicadas na manutenção preditiva.

4.1.1 Tecnologias de *Machine Learning*

Machine Learning, ou aprendizado de máquina, é um subcampo da inteligência artificial (IA) que envolve o desenvolvimento de algoritmos e técnicas que permitem aos

computadores aprender e tomar decisões baseadas em dados. De acordo com Tom Mitchell, um dos pioneiros na área, uma definição clássica de *Machine Learning* é:

Um programa de computador é dito que aprende a partir de uma experiência E com respeito a uma classe de tarefas T e uma medida de desempenho P, se seu desempenho em tarefas em T, medida por P, melhora com a experiência E (Mitchell, 1997 p. 2).

Acordo Silva e Santos (s.d.), os tipos de Inteligência Artificial (IA) são classificados em três categorias principais: Inteligência Artificial Limitada (ANI), Inteligência Artificial Geral (AGI) e Superinteligência (ASI). A ANI é a forma mais básica, projetada para executar tarefas específicas com alta capacidade de processamento de dados complexos, mas restrita a cenários conhecidos. A AGI, também conhecida como IA de Nível Humano, possui diversas habilidades que podem igualar o conhecimento humano, embora nenhuma máquina atual tenha alcançado completamente essas capacidades. Por fim, a ASI supera a inteligência humana em todas as áreas, incluindo criatividade científica, habilidades sociais e conhecimento geral, mas seu uso ainda é incerto e depende de fatores éticos e filosóficos. Nesse contexto o machine learning é um tipo de ANI de memória limitada que descobre como pode realizar tarefas sem ser explicitamente programado para tal função. Isso é, com os dados que a máquina recebe e sua devida categorização, poderá “aprender” e formar um banco de memória permitindo identificar padrões que levam a um resultado final (Silva; Santos, s.d.).

4.1.2 Análise de *Big Data*

Big Data não se refere diretamente aos dados em si, assim como a filosofia não está limitada apenas às palavras. O foco principal do *Big Data*, está no significado que conseguimos extrair desses dados. Para enfrentar os desafios do *Big Data*, é crucial abordar o volume, a velocidade e a variedade dos dados. O volume se refere à enorme quantidade de dados que precisam ser armazenados eficientemente, algo que tem sido facilitado pelo armazenamento em nuvem, que se tornou mais barato e acessível. Isso permite que empresas e organizações retenham grandes quantidades de informações prontas para análise quando necessário. A velocidade diz respeito à rapidez com que os dados são gerados e processados. Sistemas automatizados e técnicas avançadas de aprendizado de máquina, como redes neurais artificiais, são essenciais para analisar

dados em tempo real, detectando padrões que seriam impossíveis de identificar manualmente. Importante lembrar que (IBM, 2024).

A variedade envolve a integração de dados provenientes de múltiplas fontes e em diversos formatos, o que aumenta a complexidade da análise. Com o aumento da diversidade das fontes de dados, técnicas como o aprendizado profundo se tornam fundamentais. Redes de aprendizado profundo conseguem interpretar e integrar diferentes formatos de dados, permitindo a extração de informações valiosas de um conjunto diversificado de fontes. Essa capacidade de lidar com a variedade dos dados é crucial para prever eventos futuros e na tomada de decisões com base em dados históricos. Assim, a análise de *Big Data*, ao focar no significado extraído dos dados, transforma grandes volumes de informações em insights acionáveis que podem orientar decisões estratégicas e promover inovações (IBM, 2024).

4.1.3 Redes Neurais Artificiais

Uma rede neural é um modelo de aprendizado de máquina que imita o funcionamento do cérebro humano ao tomar decisões. Ela utiliza processos semelhantes aos neurônios biológicos para identificar fenômenos, ponderar opções e chegar a conclusões. As redes neurais são compostas por camadas de nós, ou neurônios artificiais, que incluem uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída. Cada nó está interligado e possui seu próprio peso e limite. Se a saída de um nó exceder o limite definido, ele é ativado e envia dados para a próxima camada; caso contrário, os dados não são transmitidos (IBM, 2024).

Essas redes dependem de dados de treinamento para aprender e melhorar sua precisão. Uma vez ajustadas, tornam-se ferramentas poderosas na ciência da computação e inteligência artificial, permitindo a classificação e agrupamento de dados rapidamente. Tarefas como reconhecimento de fala ou imagem, que levariam muito tempo manualmente, podem ser realizadas em minutos ou horas. Um exemplo famoso de rede neural é o algoritmo de busca do Google. Também conhecidas como redes neurais artificiais (RNAs) ou redes neurais simuladas (SNNs), essas redes são um subsetor do aprendizado de máquina e são fundamentais nos modelos de aprendizado profundo (IBM, 2024).

4.1.4 Plataformas de Dados Integradas

Uma Plataforma de Dados Integrada é um sistema unificado que combina várias tecnologias e processos para gerenciar, armazenar, processar e analisar dados de diversas fontes e formatos. Essas plataformas são projetadas para integrar dados de diferentes sistemas, eliminando silos de informação e garantindo que os dados estejam disponíveis, consistentes e seguros para análise e uso em toda a organização. Essa integração é crucial para a manutenção preditiva, pois permite a coleta contínua de dados de sensores e equipamentos, que podem ser analisados para prever falhas e otimizar a manutenção (IBM, 2024). Em suma é a evolução dos Sistemas de Gestão de Manutenção Computadorizada (CMMS).

Um exemplo prático é a plataforma TIP4.0, que utiliza IoT industrial e computação de borda para manutenção preditiva. A TIP4.0 foi projetada para monitorar ativos críticos através de sensores que alimentam algoritmos de aprendizado de máquina. Esses algoritmos analisam os dados para prever a saúde dos ativos e informar operadores e tomadores de decisão sobre possíveis falhas antes que elas ocorram. Essa abordagem modular permite uma adaptação fácil a diferentes cenários de implantação (Resende et. al 2021). Além disso, a IBM Maximo Application Suite integra funcionalidades de MPd que utilizam dados de ativos, uso e ambiente, correlacionando esses dados com problemas conhecidos para ajudar engenheiros de confiabilidade e gerentes de manutenção a prever falhas. Isso resulta em uma redução significativa no tempo de inatividade não planejado e uma melhoria na eficiência operacional (IBM, 2024).

Em conclusão, os sistemas tecnológicos utilizados na MPd representam uma combinação inovadora de sensores, *Machine Learning*, análise de *Big Data* e redes neurais, todos integrados em plataformas robustas. Esses elementos colaboram para monitorar continuamente os equipamentos, diagnosticar e prever falhas, permitindo intervenções precisas e eficazes. A integração de múltiplas fontes de dados em plataformas unificadas facilita uma visão completa do estado dos ativos, garantindo que decisões baseadas em dados melhorem a eficiência operacional e reduzam custos de manutenção. Assim, a MPd não apenas antecipa problemas, mas redefine as práticas de manutenção, promovendo maior confiabilidade e disponibilidade dos sistemas.

4.2 ESTUDOS DE CASO

Exemplos de implementação bem-sucedida de MPd em outras marinhas ou setores.

4.2.1 Marinha Portuguesa NRP Viana do Castelo

A Marinha Portuguesa tem adotado a MPd de maneira eficaz, especialmente na Classe Viana do Castelo, onde a monitorização contínua dos sistemas críticos como motores diesel e elétricos propulsores, caixas redutoras, sistemas de ar condicionado, hélices e geradores é realizada. A aplicação de ferramentas como a matriz de risco e a análise de modos de falha e efeitos tem sido crucial para identificar e priorizar ações de manutenção, prevenindo falhas catastróficas e garantindo uma maior disponibilidade operacional (Rodrigues, 2023).

A implementação de ações de MPd no NRP Viana do Castelo demonstra como a aplicação de técnicas avançadas de análise de risco e monitorização contínua pode melhorar significativamente a eficiência operacional e a segurança dos navios da Marinha Portuguesa. Estas práticas, ao prever e prevenir falhas catastróficas, garantem a prontidão e a fiabilidade dos sistemas navais, essenciais para o cumprimento das missões da Marinha (Rodrigues, 2023).

Para implementar eficazmente a manutenção preditiva, a Marinha Portuguesa adotou um SGM baseado no sistema "3M System"⁵ da *United States Navy* (USN). Este sistema integra funções logísticas e utiliza um sistema de informação para apoiar a execução da manutenção.

O SGM português define critérios e procedimentos normalizados de manutenção, documenta a informação relacionada, e melhora a manutibilidade e confiabilidade dos materiais através da análise e exploração da informação disponível." Este sistema garante que as atividades de manutenção sejam realizadas de forma eficaz e dentro dos padrões estabelecidos, contribuindo para a longevidade e eficiência dos navios (Rodrigues, 2023).

No NRP Viana do Castelo, a Marinha Portuguesa tem implementado diversas ações preditivas para garantir a operacionalidade e prolongar a vida útil dos seus

⁵ "3M System" (Maintenance and Material Management System, tradução nossa: Sistema de Gestão de Manutenção e Material)

sistemas críticos. Uma das principais práticas envolve a monitorização contínua do motor diesel propulsor, onde se realiza inspeção e monitorização do cavião dos tirantes e das respetivas capas. Esta ação é crucial para identificar falhas na taxa de compressão de combustão e prevenir falhas catastróficas, como fraturas de componentes e gripagem do motor. Além disso, a substituição das camisas dos cilindros do motor é outra ação preditiva significativa, destinada a evitar falhas na vedação das camisas dos cilindros, gripagem e fratura dos êmbolos. Ambas as atividades foram identificadas como de alto risco devido ao elevado número de prioridade de risco associado (Rodrigues, 2023).

Outro exemplo de ação preditiva implementada no NRP Viana do Castelo é a análise de vibrações nas linhas de eixos. Esta análise permite a deteção precoce de desalinhamentos e desgastes excessivos que podem levar a falhas significativas. A monitorização constante das vibrações possibilita a planificação de intervenções antes que ocorram falhas críticas, garantindo a continuidade operacional dos sistemas de propulsão. A monitorização dos geradores também é uma prática preditiva essencial. Este processo envolve a análise de parâmetros como temperatura, ruído e desempenho elétrico. Por meio desta monitorização, é possível identificar tendências que indicam possíveis falhas, permitindo a substituição ou manutenção dos componentes antes que causem uma interrupção no fornecimento de energia a bordo. Estas práticas preditivas garantem não apenas a disponibilidade operacional do navio, mas também aumentam a segurança e a eficiência das operações (Rodrigues, 2023).

As ações preditivas implementadas no NRP Viana do Castelo têm proporcionado vários benefícios, como a redução de falhas inesperadas e a extensão da vida útil dos componentes críticos. A capacidade de prever e mitigar problemas antes que eles ocorram tem resultado em uma maior disponibilidade operacional do navio e na redução de custos de manutenção emergencial. Além disso, essas práticas têm aumentado a segurança operacional ao garantir que os sistemas críticos estejam sempre em condições ótimas de funcionamento (Rodrigues, 2023).

4.2.2 Aplicação de Manutenção Preditiva na *United States Navy*

A USN desde meados dos anos 1970 têm utilizado tecnologias de Análise de Condição de Máquina (MCA) para incrementar a sua disponibilidade, reduzir os custos de manutenção e orientar o planejamento de reparo das máquinas em seus porta-aviões.

Contratada a Azima DLI⁶ desempenhou um papel chave auxiliando a USN no projeto e na execução de um programa de MCA, sistematicamente a economia para os porta-aviões foram o equivalente a 10 milhões de dólares por ano, com apenas uma pequena parte deste valor investido no programa (Kardec; Nascif, 2013).

A Azima DLI foi a principal contratada do governo dos USA para a MCA e a Equipe de Análise de Vibração das Máquinas das Forças Navais (SFMVA) entre 1978 e 2006. A partir de 2006, essa função foi assumida pelo Grupo Lightship, com a Azima DLI atuando como subcontratada. O trabalho envolve a avaliação trimestral de aproximadamente 450 unidades de máquinas rotativas em cada navio, cujo monitoramento frequente ajuda a decidir se as máquinas precisam de reparo, revisão completa ou se o cronograma de manutenção pode ser adiado. Essas informações são cruciais para o planejamento de manutenção mais preciso e eficiente, reduzindo a ocorrência de falhas e trabalhos urgentes (Kardec; Nascif, 2013).

Seis meses antes do início do período de reparo no estaleiro, uma equipe contratada, composta por três pessoas, embarca no navio para realizar um estudo de MCA em conjunto com a SFMVA. Esse estudo inclui testes de vibração, inspeções visuais das máquinas e pareceres dos operadores. Um relatório preliminar é então enviado aos engenheiros do navio, seguido de um relatório final revisado por grupos de engenharia da USN, distribuído pelo Comando das Forças Aeronavais em até 23 dias após o retorno da equipe. Esses relatórios são utilizados pelos planejadores de manutenção e programadores de serviços para ajustar o escopo do pacote de reparo do maquinário, resultando em um planejamento mais preciso e econômico (Kardec; Nascif, 2013).

A equipe dos navios é treinada anualmente e equipada com dispositivos para coletar dados de vibração, permitindo que inspecionem suas próprias máquinas. Esses dados são analisados a bordo e usados para planejar a Manutenção Baseada na Condição (CBM). Em 2010, o programa MCA realizou cinco estudos de disponibilidade para reparo em estaleiro, testando um total de 8957 máquinas, entre as testadas pela contratada e pelo pessoal dos navios. O custo total do programa foi de US\$ 1,243,000, com um custo-benefício de 1 para 24,1. Este programa não só gera economia

⁶ Azima DLI - inicialmente Diehl & Lund-gaard, Inc. e subsequentemente, DLI Engineering Corp. é uma empresa líder no campo da MPd e análise de condição de máquinas. Fundada em 1960, a Azima DLI se destaca por fornecer soluções inovadoras e tecnologias avançadas para o monitoramento da saúde de máquinas industriais e equipamentos críticos. A empresa oferece uma variedade de serviços e produtos destinados a maximizar a eficiência operacional, reduzir custos de manutenção e aumentar a confiabilidade dos ativos.

significativa, mas também melhora a disponibilidade operacional das embarcações, demonstrando a eficácia da análise e MPd na USN (Kardec; Nascif, 2013).

O “Integrated Condition Assessment System” (ICAS)⁷ foi uma inovação crucial na manutenção naval da USN, possibilitando que o programa MCA, uma técnica específica focada na análise da condição das máquinas individuais, desse origem a uma estratégia de CBM o qual utiliza várias técnicas, incluindo MCA, para monitorar e gerenciar a saúde dos equipamentos de forma contínua. A CBM representa uma evolução da MCA, integrando diversas tecnologias e processos para otimizar a manutenção e melhorar a eficiência operacional (EUA, 2022a).

Em 2022 a USN por meio da NAVSEAINST 4790.27B implementa as políticas de manutenção centrada na confiabilidade (RCM), CBM e manutenção baseada na condição plus (CBM+) ilustrando a relação e a evolução entre as três abordagens de manutenção. No contexto da manutenção preditiva, correlaciona como cada metodologia contribui para a transição de uma abordagem reativa para uma abordagem proativa e preditiva. A RCM forma a base, fornecendo uma metodologia para identificar e analisar falhas potenciais e determinar estratégias de manutenção eficazes. A CBM, então, adiciona uma camada de monitoramento contínuo, utilizando dados de sensores para avaliar a condição dos equipamentos em tempo real e tomar decisões de manutenção baseadas em evidências concretas. A CBM+ representa o estágio mais avançado, integrando tecnologias e processos de análise preditiva para antecipar falhas futuras com maior precisão. Essa abordagem utiliza algoritmos avançados para analisar dados históricos e atuais, permitindo a previsão de problemas antes que eles se tornem críticos. Dessa forma, a manutenção pode ser planejada de maneira mais eficiente, reduzindo o tempo de inatividade e os custos operacionais (EUA, 2022a).

Logo a MPd aplicada pela USN é uma prática estabelecida desde os anos 1970, com destaque para o uso da MCA para aumentar a disponibilidade operacional e reduzir custos de manutenção. O programa de MCA, implementado em parceria com empresas como Azima DLI, possibilita o monitoramento contínuo de máquinas rotativas, permitindo decisões precisas sobre reparos e revisões. Além disso, o sistema ICAS integra diversas técnicas para o gerenciamento da condição dos equipamentos, evoluindo para estratégias de CBM e CBM+, que acrescentam análise preditiva para antecipação de falhas. Em 2022, políticas de RCM, CBM e CBM+ foram adotadas, consolidando uma abordagem

⁷ ICAS - inicialmente instalado em todas as embarcações em 1995, tem a capacidade de monitoramento da condição das máquinas. Este sistema permite monitorar a condição das máquinas e, através da análise dos dados coletados, diagnosticar ou identificar falhas potenciais.

proativa e preditiva na manutenção da USN, com benefícios como a redução de tempo de inatividade e economia significativa nos custos operacionais.

4.2.3 Planta de Biogás no Brasil

Tendo em vista a expansão da geração de energia no Brasil, o trabalho de Marcelo Elias Alonso trouxe uma perspectiva do funcionamento de uma planta de biogás para embasar conceitos e desenvolver uma ferramenta para o apoio da MPd dos ativos da usina, utilizando técnicas de Machine Learning (ML) e redes neurais. A utilização de Big Data foi fundamental, permitindo a análise de grandes volumes de dados operacionais da usina, coletados a cada dois segundos. Esses dados incluem parâmetros como potências elétricas, dados do alternador, fator de potência do gerador, temperatura e pressão de diferentes componentes, destacando a importância do Big Data na modernização dos processos industriais e na melhoria dos modelos preditivos (Alonso, 2022).

O modelo computacional desenvolvido por Alonso foi mais eficiente que o baseline⁸, sendo capaz de prever falhas com até 20 horas de antecedência. Isso permitiu a realização de manutenções preventivas de forma eficaz, aumentando a confiabilidade e eficiência operacional da planta de biogás. O esforço computacional para o treinamento do modelo foi de 1200 segundos para os dados analisados, demonstrando a viabilidade da aplicação prática desse tipo de abordagem preditiva (Alonso, 2022).

Entre os desafios enfrentados na elaboração do modelo, destacam-se o balanceamento entre o desempenho do modelo e o esforço computacional, além do processamento dos dados, que devido ao grande volume, necessitaram de diversas tratativas como ajuste de datas, preenchimento de dados faltantes e concatenação. Para trabalhos futuros, Alonso sugere a elaboração de um modelo de multiclassificação, considerando todos os alarmes acionados no período analisado, além da criação de um dispositivo de alarme que indique a probabilidade de falha com base nas previsões obtidas. Adicionalmente, mais parâmetros operacionais poderiam ser utilizados no treinamento do modelo, visando um melhor desempenho nas demais classificações (Alonso, 2022).

⁸ Baseline - entendido como a linha de base que irá guiar um projeto, sendo definido, na maioria das vezes, durante o planejamento da obra. A partir dele, o gestor daquele projeto consegue controlar e acompanhar tudo o que está acontecendo.

4.3 BENEFÍCIOS E DESAFIOS

A implementação da MPd nas organizações apresenta uma série de benefícios esperados, mas também enfrenta desafios significativos que precisam ser abordados para garantir o sucesso do processo. Conforme destacado por Alan Kardec e Nascif (2013), a adoção da MPd pode transformar as operações de manutenção, trazendo avanços importantes para a eficiência e a eficácia das empresas.

4.3.1 Benefícios Esperados

A implementação da MPd traz consigo uma série de benefícios significativos para as operações de manutenção das organizações. Um dos principais benefícios é o aumento da disponibilidade dos equipamentos. Ela permite a identificação precoce de falhas potenciais, possibilitando a programação de intervenções antes que ocorram avarias críticas. Isso não apenas prolonga a vida útil dos equipamentos, mas também reduz o tempo de parada para manutenção, aumentando a produtividade geral. A capacidade de prever e corrigir problemas antes que se tornem críticos assegura que os equipamentos estejam operacionais por mais tempo, minimizando interrupções nas operações (Kardec; Nascif, 2013).

Outro benefício da MPd é a redução de custos. A prevenção de falhas reduz a necessidade de manutenções corretivas, que geralmente são mais caras e consomem mais tempo. Além disso, a manutenção planejada permite uma utilização mais eficiente dos recursos, tanto humanos quanto materiais. Estudos demonstram que a MPd pode reduzir os custos de manutenção entre 25% e 30%, aumentar a capacidade de solucionar problemas em até 75% e diminuir o tempo de inatividade dos equipamentos entre 35% e 45%, o que resulta em um aumento na produção de 20% a 25% (Poór; Zenísek; Basl, 2019). Essas economias e eficiências destacam a MPd como uma estratégia financeiramente vantajosa para as organizações.

A MPd também melhora significativamente a segurança operacional. Ao detectar problemas potenciais antecipadamente, Ela contribui para um ambiente de trabalho mais seguro, reduzindo o risco de acidentes causados por falhas inesperadas dos equipamentos. A MP bem executada pode evitar incidentes graves, protegendo os colaboradores e a infraestrutura da empresa. A implementação de melhores práticas na manutenção, conforme proposto por Alvin Toffler, é crucial para alcançar esses benefícios

e transformar a "Situação Atual" na "Visão de Futuro" desejada (Kardec; Nascif, 2013). Com um retorno sobre o investimento potencial de até 10 vezes, a MP não apenas otimiza os custos de manutenção, mas também aumenta a eficiência operacional e a produtividade da empresa, tornando-se uma ferramenta essencial para a competitividade no mercado (Poór; Zenísek; Basl, 2019).

4.3.2 Desafios a Serem Enfrentados

A implementação da MPd enfrenta desafios significativos, principalmente devido ao desconhecimento e resistência à mudança entre os gestores. Muitos líderes empresariais desconhecem os princípios e os seus benefícios, o que resulta em uma relutância em adotar essa abordagem. A falta de conhecimento técnico pode levar a decisões focadas apenas na redução de custos a curto prazo, sem considerar os ganhos a longo prazo proporcionados pela MPd. Essa visão imediatista impede que as organizações aproveitem os benefícios completos dela, como a redução de custos e o aumento da eficiência operacional (Kardec; Nascif, 2013).

Outro grande desafio é o investimento inicial necessário para implementar a MPd. Esta abordagem exige um investimento significativo em tecnologias de monitoramento e em treinamento de pessoal. Gerentes que estão preocupados com cortes de custos podem hesitar em realizar esses investimentos, não percebendo os retornos futuros que a MP pode proporcionar em termos de economia e eficiência operacional. A falta de visão de longo prazo e a preocupação excessiva com os custos imediatos podem atrasar ou até mesmo impedir a implementação eficaz da MPd, prejudicando o potencial de melhoria contínua da organização (Kardec; Nascif, 2013).

A adoção da MPd também depende fortemente de uma liderança forte e comprometida. As mudanças necessárias para sua implementação eficaz muitas vezes começam nos níveis inferiores da organização e precisam do suporte de líderes em todos os níveis para serem bem-sucedidas. Isso inclui o engajamento dos gerentes de departamento, supervisores e todos os colaboradores envolvidos na manutenção. Além disso, a mudança de paradigma na manutenção, focando na função do sistema em vez de apenas na preservação do equipamento, requer uma alteração significativa na mentalidade dos gestores e técnicos. Para que a MPd seja implementada com sucesso, é crucial que a organização invista adequadamente em todos os fatores críticos, como orçamento, cultura organizacional, soluções tecnológicas e qualidade dos dados. Sem

uma liderança comprometida e um investimento apropriado em cada um desses aspectos, os benefícios potenciais da MPd não serão plenamente realizados (Kardec; Nascif, 2013; Poór; Zenísek; Basl, 2019).

O Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD) fez progressos na implementação de estratégias de manutenção preditiva, mas ainda não implementou completamente essas estratégias em nenhum de seus sistemas de armas. Os oficiais do DoD não desenvolveram planos ou políticas estratégicas abrangentes, não tiveram total visibilidade dos projetos de CBM+ e MPd, e não desenvolveram treinamentos adequados para todos os níveis da força de trabalho de sustentação do ciclo de vida necessários para implementar estratégias de MPd (EUA, 2022b).

Esses desafios destacados pelo DoD refletem a complexidade e os desafios inerentes à adoção de novas tecnologias e práticas de manutenção no contexto militar. Incluem a transição de uma cultura de manutenção reativa para uma cultura de manutenção preditiva, a falta de um método padronizado para distinguir peças removidas com base em previsões, a carência de dados precisos e utilizáveis e algoritmos para fazer previsões de manutenção, além de recursos e financiamento limitados. Para mitigar esses desafios, o Secretário Adjunto de Defesa para Prontidão de Material recomenda a revisão e atualização contínua do "CBM+ Guidebook"⁹ para refletir as orientações atualizadas sobre CBM+ e MPd, e a distribuição do guia atualizado aos oficiais de serviço militar responsáveis para inclusão em suas respectivas políticas e orientações (EUA, 2022b).

Um desafio adicional na implementação da MPd é a obsolescência dos sistemas. À medida que novas tecnologias são desenvolvidas e implementadas, os sistemas mais antigos podem se tornar obsoletos, dificultando a integração de novos métodos preditivos. No entanto, os princípios de design modular podem beneficiar a gestão da obsolescência, pois a independência dos elementos permite um certo nível de capacidade de mudança interna, mitigando os impactos da obsolescência de componentes por não impactar outros módulos (Morgan; Holzer; Eveleigh, 2021).

Em síntese, a implementação da MPd traz benefícios significativos, como aumento da disponibilidade dos equipamentos, redução de custos e melhoria da segurança operacional. No entanto, enfrenta desafios consideráveis, incluindo desconhecimento e resistência à mudança, necessidade de investimento inicial significativo, e a dependência de liderança comprometida. A experiência do DoD ilustra a

⁹ CBM+ Guidebook - é um manual do DoD que fornece orientação sobre a aplicação e integração de processos, tecnologias e capacidades baseadas em conhecimento para melhorar a confiabilidade e a eficácia da manutenção de sistemas e componentes do DoD

complexidade dessas implementações, destacando a necessidade de políticas abrangentes, treinamento adequado e a mitigação da obsolescência dos sistemas. A adoção bem-sucedida da MPd depende de uma abordagem equilibrada que considere tanto os benefícios potenciais quanto os desafios a serem superados para alcançar melhorias contínuas e eficiência operacional.

5 EXECUÇÃO PRÁTICA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

A execução prática da MPd envolve uma abordagem estruturada, abordando desde a elaboração de um plano estratégico até o desenvolvimento de capacidades técnicas e culturais necessárias para a sua implementação. Este capítulo detalha os passos essenciais para a implementação eficaz da MPd nos meios navais, analisando as melhores práticas e os recursos fundamentais que garantem o sucesso da transição para uma manutenção proativa e baseada em dados, com ênfase em planejamento, monitoramento contínuo e capacitação da equipe.

5.1 PASSOS PARA IMPLEMENTAÇÃO

Detalhamento dos passos necessários para implementar a MPd nos meios navais.

A implementação da MPd exige uma abordagem sistemática e detalhada, conforme delineado no documento DODIG-2022-103 do DoD. O primeiro passo crucial é a elaboração de um plano estratégico abrangente que alinhe as iniciativas de MPd com os objetivos organizacionais. Esse plano deve especificar claramente as metas, os recursos necessários, os cronogramas e as responsabilidades. A falta de planos estratégicos abrangentes foi identificada como uma das principais deficiências nas iniciativas de MPd do DoD (EUA, 2022a).

Nos meios navais, a MPd pode ser realizada de diversas maneiras. Observando as boas práticas e analisando a evolução cronológica da tecnologia, podemos identificar pontos cruciais a serem seguidos. Conforme descrito na NAVSEAINST 4790.27B (2022), um fator impulsionador para as interfaces atuais das tecnologias de manutenção foi a instalação do ICAS em todas as embarcações da USN proporcionando a capacidade de monitorar a condição das máquinas (EUA, 2022b).

A coleta e a análise de dados são componentes fundamentais da manutenção preditiva. A instalação de sistemas como o ICAS é essencial para esse propósito. O ICAS coleta dados em tempo real dos sensores instalados nos equipamentos críticos dos navios, permitindo monitorar a condição das máquinas e identificar falhas potenciais precocemente. A análise desses dados é crucial para prever o estado dos equipamentos e planejar a manutenção de maneira eficaz, facilitando a transição de uma abordagem reativa para uma proativa e preditiva (EUA, 2022b). Sistemas de avaliação de condição

integrada, como o ICAS, são utilizados para a coleta e análise de dados de sensores, permitindo o monitoramento contínuo da condição dos equipamentos, integrando diagnósticos e o monitoramento de condição em tempo real. Esses sistemas, quando integrados com sistemas de controle de distribuição e sistemas de gestão de manutenção computadorizados, proporcionam uma solução completa de MPd (Plant Engineering, 1998).

Considerando a existência um sistema de monitoramento contínuo para as condições dos equipamentos a bordo das embarcações da USN desde 1995, a publicação NAVSEAINST 4790.27B (2022) destaca que é essencial para a implementação da MPd o desenvolvimento de um Plano de CMP para cada classe de navio. Esses planos devem ser aprovados pela Marinha e descrever os requisitos de manutenção em níveis organizacional, intermediário e de docagem. A metodologia de RCM é utilizada para determinar essas necessidades de manutenção, assegurando que as práticas sejam baseadas na confiabilidade dos sistemas e componentes (EUA, 2022b).

Em resumo, a implementação da MPd nos meios navais requer uma abordagem sistemática que integra a coleta e análise de dados em tempo real, o desenvolvimento de planos de manutenção baseados na condição, treinamento especializado e o uso de tecnologias avançadas. Essas práticas garantem a máxima eficiência operacional e a redução de custos ao longo do ciclo de vida dos navios, transformando a manutenção naval em uma prática altamente proativa e eficaz (EUA, 2022b).

Além disso, é essencial garantir a visibilidade completa de todos os projetos e ferramentas de MPd e de CBM+. Isso envolve o estabelecimento de um sistema de gestão de portfólio que permita o acompanhamento e a comunicação de esforços em toda a organização. O DoD reconheceu a necessidade de tais sistemas para melhorar a transparência e a eficácia dos programas de manutenção (EUA, 2022a).

O desenvolvimento de algoritmos precisos e a obtenção de dados de alta qualidade são igualmente importantes. A implementação eficaz da MPd depende da capacidade de prever falhas futuras com base em dados históricos e em tempo real coletados por sensores embutidos nos equipamentos. A falta de dados precisos e algoritmos robustos foi citada como um desafio significativo (EUA, 2022a).

Nesse contexto, é necessário criar e adaptar treinamentos específicos para diferentes níveis dentro da força de trabalho de sustentação do ciclo de vida. O treinamento deve abranger os princípios de CBM+, MPd e manutenção centrada na

confiabilidade (RCM), garantindo que todos os envolvidos entendam e apliquem essas práticas de maneira eficaz (EUA, 2022b).

Por fim, a transição cultural é um componente crítico. Mudanças significativas são necessárias para mover uma organização de uma cultura de manutenção “run-to-failure”¹⁰ para uma cultura preditiva. Isso inclui promover uma mentalidade proativa entre os militares e assegurar o compromisso de todos os níveis da hierarquia organizacional (EUA, 2022a).

A implementação da MPd envolve o desenvolvimento de um plano estratégico detalhado, a garantia de visibilidade dos projetos, o desenvolvimento de algoritmos e coleta de dados precisos, a adaptação de treinamentos específicos e a facilitação de uma transição cultural. Esses passos, quando executados de forma coordenada, podem levar a uma redução significativa dos custos de manutenção e a um aumento na disponibilidade dos sistemas de armas, conforme demonstrado pelo progresso e desafios enfrentados pelo DoD (EUA, 2022a).

A implementação da MPd nos meios navais exige um conjunto coordenado de etapas que vão desde o planejamento estratégico até ajustes culturais dentro da organização. Com a coleta e análise contínua de dados em tempo real, a MPd permite uma abordagem mais informada e proativa, possibilitando que problemas sejam identificados antes de causarem falhas críticas. Além disso, a integração de treinamentos específicos e uma gestão que acompanhe esses projetos promovem uma transição gradual para práticas de manutenção mais eficientes. Com o tempo, essa abordagem pode melhorar a confiabilidade dos sistemas e ajudar a reduzir custos, tornando as operações de manutenção mais alinhadas com as necessidades reais dos equipamentos e das equipes envolvidas.

5.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.2.1 Resultados Esperados da Implementação da CBM+

A implementação da manutenção preditiva, através do CBM+ , na USN tem como objetivo otimizar a manutenção dos sistemas e componentes, proporcionando vários benefícios significativos. Entre os resultados esperados está o aumento da disponibilidade

¹⁰“Run-to-failure” é uma abordagem de manutenção em que os equipamentos e sistemas são operados até que ocorram falhas, sem intervenções preventivas para evitar essas falhas

e confiabilidade dos sistemas, possibilitado pelo uso de dados para prever falhas potenciais e realizar manutenções de forma proativa. Esse método permite que as intervenções de manutenção sejam planejadas com base em necessidades reais, ao invés de calendários fixos, aumentando a eficácia da gestão de ativos (EUA, 2022b).

Além disso, o CBM+ contribui para a redução dos custos operacionais e de manutenção, eliminando a necessidade de manutenções desnecessárias e, conseqüentemente, melhorando a eficiência operacional. Com a utilização de diagnósticos e prognósticos em tempo real, o sistema automatiza o agendamento de reparos e atualiza os cronogramas de manutenção preventiva. Isso garante que as manutenções sejam realizadas apenas quando necessário e no momento mais oportuno, evitando interrupções inesperadas e minimizando o tempo de inatividade dos sistemas (EUA, 2022b).

Essas melhorias são alcançadas por meio da integração de tecnologias avançadas de monitoramento e análise de dados. A capacidade de prever problemas antes que ocorram e de otimizar os processos de manutenção resulta em uma gestão mais eficiente e econômica. A implementação do CBM+ representa um avanço significativo na forma como a USN gerencia a manutenção de seus ativos, garantindo maior disponibilidade e longevidade dos equipamentos, além de uma melhor alocação dos recursos financeiros e humanos (EUA, 2022b).

5.2.2 Resultados Observados após a Implementação da CBM+

O relatório DODIG-2022-103 (2022) do DoD sobre a implementação da estratégia CBM+ revela que, embora tenham sido feitos progressos significativos, ainda existem desafios substanciais a serem superados para que a MPd seja completamente implementada em todos os sistemas de armas. Em 2020 foi atualizada uma instrução visando estabelecer requisitos mais claros e abrangentes para a adoção do CBM+ como uma estratégia fundamental para alcançar a manutenção eficaz e econômica dos sistemas de armas ao longo de seu ciclo de vida. Essa abordagem visava diminuir os custos de ciclo de vida por meio da redução da manutenção não programada, facilitando a transição para uma manutenção baseada em previsões (EUA, 2022a).

Os resultados iniciais indicam que os diferentes ramos das Forças Armadas dos EUA estão em fases variadas de implementação do CBM+. A Força Aérea, por exemplo, desenvolveu um plano estratégico detalhado para CBM+, mas enfrenta desafios na

atualização completa de suas políticas para incluir as práticas. O Exército, por outro lado, redirecionou o foco de CBM+ para iniciativas de manutenção preditiva e inteligência artificial, enquanto a Marinha ainda precisava desenvolver um plano estratégico abrangente para essa transição (EUA, 2022a).

Um dos principais desafios identificados é a falta de visibilidade total sobre os esforços e projetos de CBM+ em todo o DoD. Essa limitação pode prejudicar a capacidade de compartilhar eficientemente as lições aprendidas e maximizar as comunicações nas tecnologias e processos entre os diferentes serviços. Além disso, foi constatado que há uma necessidade urgente de desenvolver um currículo de treinamento abrangente que cubra todos os níveis necessários para a execução eficaz do CBM+, incluindo gestores de programas, engenheiros e líderes de serviços.

Além disso, a transição cultural de uma abordagem de manutenção reativa para uma baseada em previsões é uma barreira significativa. Muitos militares ainda hesitam em substituir componentes baseados apenas em previsões de falhas futuras, especialmente quando esses componentes ainda estão operacionais. Essa mudança de mentalidade, juntamente com a necessidade de dados precisos e algoritmos confiáveis, é crítica para o sucesso da implementação do CBM+ (EUA, 2022a).

Em resumo, enquanto o CBM+ promete melhorias significativas na disponibilidade de sistemas de armas e na redução de custos, sua implementação total ainda requer esforços coordenados, recursos adequados e uma mudança cultural significativa dentro do DoD.

5.3 RECOMENDAÇÕES

A política de manutenção da MB enfrenta inúmeros desafios que comprometem a disponibilidade e a confiabilidade de seus meios navais. Para abordar essas questões e promover uma melhoria contínua, é essencial adotar uma abordagem integrada que incorpore práticas de manutenção preditiva, capacitação contínua do pessoal e uma reestruturação eficaz dos contratos de terceirização. A seguir, são apresentadas sugestões detalhadas para aprimorar a política de manutenção da MB.

5.3.1 Implementação de Manutenção Preditiva

A MPd baseia-se na análise constante de dados e monitoramento contínuo dos equipamentos, com o objetivo de antecipar e prevenir falhas antes que ocorram. Essa abordagem não apenas permite intervenções mais precisas e programadas, mas também diminui o tempo de inatividade e os custos de manutenção a longo prazo, aumentando a confiabilidade dos sistemas. A implementação da MPd na Marinha do Brasil (MB) pode transformar a eficiência operacional ao criar um sistema de manutenção alinhado às necessidades específicas dos meios navais, reduzindo interrupções inesperadas e promovendo o uso racional dos recursos.

A USN com o ICAS ilustra o impacto positivo da MPd. O ICAS permite a coleta de dados em tempo real de sensores instalados em equipamentos críticos, realizando uma avaliação contínua do estado de funcionamento das máquinas e possibilitando uma resposta rápida às necessidades de manutenção (EUA, 2022b). Este sistema demonstra como a integração de sensores e ferramentas de análise permite uma abordagem mais assertiva, com a vantagem adicional de otimizar a vida útil dos equipamentos e reduzir custos. A MB pode adotar soluções similares, considerando a adaptação de tecnologias como o ICAS para atender às especificidades dos sistemas e operações navais nacionais.

Além disso, estudos de caso, como o do navio NRP Viana do Castelo, da Marinha Portuguesa, servem como exemplo de boas práticas na aplicação de técnicas preditivas. Neste caso, a análise de vibrações, temperatura, ruído e desempenho elétrico, junto com o monitoramento contínuo, permitiu um controle detalhado dos sistemas críticos e prolongou a vida útil dos componentes (Rodrigues, 2023). A experiência portuguesa demonstra que o monitoramento contínuo, aliado a diagnósticos baseados em dados específicos, é fundamental para a eficácia da MPd. Essas práticas podem ser replicadas pela MB para aprimorar sua política de manutenção e otimizar os processos de monitoramento.

A implementação de uma infraestrutura de MPd eficaz na MB exige a criação de uma base tecnológica sólida que inclui sensores, softwares de análise de dados e plataformas de monitoramento integradas. Além disso, é necessário um plano estratégico detalhado que defina claramente as metas, alocação de recursos, responsabilidades e cronogramas. A interoperabilidade dos sistemas de monitoramento com os sistemas de gestão de manutenção, além de protocolos para a coleta e armazenamento dos dados, é outro componente essencial para garantir que a MPd funcione de maneira fluida e integrada.

No entanto, a efetiva aplicação da MPd também requer superar desafios organizacionais e técnicos. A mudança de uma abordagem corretiva ou preventiva tradicional para um modelo preditivo exige um esforço conjunto para modificar a cultura de manutenção, adotando uma mentalidade voltada à prevenção. Além disso, a MB deve garantir a capacitação contínua das equipes para manusear as novas tecnologias, desenvolver expertise analítica e utilizar sistemas de monitoramento. A implementação de uma política de MPd, portanto, deve considerar esses aspectos para garantir uma transição bem-sucedida e gerar os resultados esperados em termos de confiabilidade e economia operacional.

5.3.2 Capacitação e Treinamento Contínuos

A capacitação e o treinamento contínuos desempenham um papel crucial na eficácia da implementação de novas tecnologias e práticas de manutenção. O desenvolvimento e a manutenção de um programa de treinamento robusto são essenciais para assegurar que os profissionais estejam aptos a operar e manter sistemas complexos com precisão e eficiência (Fernandes, 2023). A ênfase na capacitação contínua reflete a necessidade de uma abordagem proativa para a atualização e disseminação constante de conhecimentos técnicos, algo que é fundamental para a competitividade e a eficiência organizacional.

O DoD em seu relatório de 2022 sobre a implementação da estratégia de CBM+ e de práticas de MPd sublinha a importância da capacitação contínua dentro deste contexto específico que integra o CBM+ à educação e ao treinamento em todos os níveis, desde a Secretaria Assistente de Defesa (Aquisição) até os serviços militares específicos, reforçando a urgência de alinhar a capacitação com as necessidades emergentes das forças armadas (EUA, 2022a). Essa integração visa assegurar que todos os envolvidos compreendam e apliquem os princípios de manutenção baseada na condição e MPd.

Entretanto, o relatório também revela uma lacuna significativa na oferta de um currículo abrangente que cubra todos os níveis necessários para uma implementação eficaz do CBM+. A falta de treinamento completo é identificada como um obstáculo crítico, pois sem um entendimento profundo dos princípios de manutenção preditiva, a força de trabalho não está plenamente equipada para maximizar os benefícios do CBM+, como a melhoria da disponibilidade dos equipamentos e a redução dos custos de manutenção. A necessidade de desenvolver currículos mais detalhados ou de tornar o treinamento

existente obrigatório nas forças armadas americanas é vista como uma prioridade para assegurar a eficácia da estratégia de CBM+ em todo o DoD (EUA, 2022a).

A capacitação contínua deve ser mais ampla do que a simples instrução teórica, incorporando *workshops* práticos, simulações e o uso de ferramentas tecnológicas de ponta. A prática com simuladores, por exemplo, permite que as equipes de manutenção experimentem cenários reais e complexos, desenvolvendo habilidades práticas e aprimorando seu senso de responsabilidade e competência técnica. Isso contribui para a criação de uma cultura de aprendizado e inovação, onde o pessoal se sente capacitado e motivado a aplicar o conhecimento adquirido para melhorar os processos.

Além disso, um sistema de formação contínua e abrangente ajuda a reduzir a dependência de terceiros para operações de manutenção especializada, promovendo uma maior autonomia técnica. Esse tipo de abordagem integrada não apenas aprimora as habilidades dos profissionais, mas também reforça a eficiência e a competitividade organizacional, tornando a MB mais resiliente e preparada para lidar com desafios operacionais complexos.

6 CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo, exploramos a MPd no contexto da MB, abordando desde os fundamentos teóricos até a aplicação prática. Com base em uma análise detalhada dos desafios enfrentados pela MB e as soluções tecnológicas disponíveis, propusemos uma abordagem sistemática para a implementação da manutenção preditiva. Nesta seção final, sintetizaremos as principais conclusões de cada capítulo, avaliando o cumprimento dos objetivos gerais e específicos da pesquisa, e refletindo sobre as implicações dos resultados alcançados.

No Capítulo 2, discutimos os aspectos teóricos da manutenção preditiva, incluindo seus fundamentos, história e evolução. Inicialmente, definimos os conceitos básicos de manutenção, destacando as diferenças entre manutenção corretiva, preventiva e preditiva. A MPd foi apresentada como uma abordagem avançada, que utiliza tecnologias de monitoramento e análise de dados para prever falhas antes que ocorram.

Além disso, exploramos a evolução histórica da manutenção, desde práticas rudimentares até a adoção de tecnologias sofisticadas, como machine learning e análise de big data. Comparações entre os diferentes tipos de manutenção demonstraram que a MPd oferece um equilíbrio ideal entre custo e eficiência, sendo especialmente vantajosa em ambientes complexos como o da MB.

No Capítulo 3, focamos na situação atual da manutenção na MB, identificando práticas vigentes, problemas e necessidades de mudança. A análise revelou que a MB ainda depende fortemente de métodos corretivos e preventivos, com vários desafios, incluindo a falta de recursos, pessoal qualificado e uma frota envelhecida. Problemas específicos, como a alta rotatividade de funcionários terceirizados e a baixa qualidade dos serviços, foram destacados como barreiras significativas à eficiência operacional. A necessidade urgente de uma transição para práticas de MPd foi evidenciada, propondo-se uma abordagem integrada que considere tanto aspectos técnicos quanto gerenciais.

O Capítulo 4 apresentou a arquitetura dos sistemas tecnológicos e os avanços recentes aplicáveis à manutenção preditiva. Tecnologias como machine learning, big data e redes neurais artificiais foram discutidas em detalhes, mostrando como podem ser integradas para melhorar a precisão e a eficiência das operações de manutenção. Estudos de caso, incluindo a aplicação na Marinha Portuguesa e na USN, forneceram exemplos práticos dos benefícios e desafios associados à implementação da manutenção preditiva. Tais casos demonstraram que a adoção dessas tecnologias pode levar a uma

redução significativa nos custos operacionais e um aumento na disponibilidade dos equipamentos.

O objetivo geral desta pesquisa foi diagnosticar as condições e desafios para implementar a MPd na MB, identificando fatores críticos que podem impactar sua adoção gradual e sustentável. A análise detalhada dos capítulos anteriores confirma que esse objetivo foi amplamente alcançado. Por meio da revisão teórica, análise situacional e estudos de caso, foi possível demonstrar que a MPd não só é viável, mas também altamente benéfica para a MB, com potencial para melhorar a eficiência e a longevidade dos ativos navais. Ademais, os objetivos específicos foram em grande parte cumpridos, abordando as necessidades, limitações e oportunidades para a adoção dessa prática no contexto operacional da MB.

Primeiramente, identificamos as práticas atuais de manutenção na MB, conforme detalhado no Capítulo 3, que revelou as deficiências e desafios da abordagem atual. Em seguida, analisamos as tecnologias disponíveis para MPd no Capítulo 4, detalhando as tecnologias emergentes e suas aplicações práticas. Por fim, embora tenhamos proposto várias recomendações, um plano detalhado de implementação ainda requer desenvolvimento adicional e colaboração com especialistas da MB para adequação completa.

A pesquisa confirmou que a MPd oferece um caminho promissor para a modernização das práticas de manutenção da MB. As vantagens incluem uma maior eficiência operacional, redução de custos e melhora na disponibilidade dos equipamentos. No entanto, a implementação bem-sucedida depende de um compromisso estratégico da MB, investimento em tecnologias avançadas e capacitação contínua do pessoal. Reforçando a tese central deste estudo, a MPd não é apenas uma alternativa viável, mas uma necessidade urgente para a MB enfrentar os desafios contemporâneos.

Com a adoção dessa abordagem, a MB pode garantir uma maior prontidão operacional e segurança em suas operações marítimas. Para o futuro, recomenda-se que a MB desenvolva um plano estratégico detalhado para a implementação da manutenção preditiva, incluindo pilotos em navios selecionados e uma avaliação contínua dos resultados. Esta pesquisa não só contribui para o avanço do conhecimento sobre manutenção preditiva, mas também oferece uma base sólida para ações futuras. É um convite à MB para adotar uma postura proativa, inovadora e alinhada com as melhores práticas globais de manutenção.

Para finalizar, a transição cultural é um componente essencial para o sucesso de qualquer organização que deseja evoluir de uma abordagem de manutenção reativa, para uma cultura de manutenção preditiva. Esse processo demanda mudanças significativas, começando pela promoção de uma mentalidade proativa. Todos os membros da equipe de manutenção devem ser capacitados e incentivados a antecipar problemas, utilizando dados e análises para identificar sinais de desgaste e prever falhas potenciais.

A implementação de uma cultura preditiva não se restringe apenas a uma mudança na forma de pensar, mas também requer uma transformação nos comportamentos diários. É imprescindível que todos os níveis da hierarquia organizacional estejam comprometidos com essa mudança. A liderança deve atuar como exemplo, demonstrando apoio claro e contínuo, além de fornecer os recursos necessários, como treinamento e tecnologias avançadas. A comunicação eficaz e constante é fundamental para assegurar que todos estejam alinhados com os objetivos e benefícios da nova abordagem.

Essa transição cultural não pode ser vista como uma iniciativa temporária ou superficial. Ela deve ser um esforço contínuo, integrado nas operações diárias e nos processos decisórios, promovendo uma reavaliação de metas de desempenho, ajustes em incentivos e a criação de um ambiente que favoreça a inovação e o aprendizado contínuo.

Concluindo, a mudança de uma cultura de manutenção reativa para uma preditiva é mais do que uma simples atualização técnica; é uma transformação estratégica profunda. Essa transição promove uma cultura organizacional focada na prevenção e proatividade, resultando em maior eficiência, redução de custos, melhor gestão de riscos e um ambiente de trabalho mais seguro e produtivo. Ao adotar essa nova abordagem, a Marinha do Brasil se posiciona de forma mais resiliente para enfrentar os desafios futuros, garantindo um desenvolvimento sustentável e contínuo.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. **NBR - 5462, Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994. 37pg.

ACHOUCH, M.; DIMITROVA, M.; ZIANE, K.; SATTARPANAH KARGANROUDI, S.; DHOUIB, R.; IBRAHIM, H.; ADDA, M. **On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges**. Applied Sciences, v. 12, n. 8081, p. 1-22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12168081>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/journal/applsci>>. Acesso em: 09 junho 2024.

ALONSO, Marcelo Elias. **Proposta de Aplicação de Métodos de Machine Learning em Manutenção Preditiva**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

BRASIL. Marinha do Brasil. Diretoria de Engenharia Naval. **ENGENALMARINST N° 85-18A, Processo para Obtenção do Sistema de Manutenção Planejada**. Rio de Janeiro, 2020.

BRASIL. Marinha do Brasil.. Estado-Maior da Armada. **EMA – 420, Normas para logística de material**, Brasília, 2002.

FERNANDES, Álvaro. **Uma Análise da Terceirização e Proposta de Melhorias para Área Industrial**. Rio de Janeiro: Escola de Guerra Naval, 2023.

IBM. **Big Data Analytics**. Disponível em: <<https://www.ibm.com/topics/big-data-analytics>>. Acesso em: 09 junho 2024.

IBM. **What is a Neural Network?** Disponível em: <<https://www.ibm.com/topics/neural-networks#:~:text=A%20neural%20network%20is%20a,options%20and%20arrive%20at%20conclusions>>. Acesso em: 09 junho 2024.

IBM. **What is Predictive Maintenance?** Disponível em: <<https://www.ibm.com/topics/predictive-maintenance>>. Acesso em: 09 junho 2024.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção preditiva. Fator de sucesso na gestão empresarial**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.

NEPOBUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de Manutenção Preditiva - Vol. 01**. Blucher Editora , 1. ed, p. 501, 1989.

MITCHELL, T. M. **Machine Learning**. McGraw-Hill, 1997. 432 p. ISBN 0070428077. Disponível em: <<https://blog.dsacademy.com.br/conceitos-fundamentais-de-machine-learning-parte-1/>>. Acesso em: 28 junho 2024.

MOLEDA, Marek; MAŁYSIAK-MROZEK, Bożena; DING, Weiping; SUNDERAM, Vaidy; MROZEK, Dariusz. **From Corrective to Predictive Maintenance—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry**. Sensors, v. 23, n. 5970, p. 1-47, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s23135970>>. Acesso em: 24 julho 2024.

MORGAN, Markeeva; HOLZER, Thomas; EVELEIGH, Timothy. **Synergizing model-based systems engineering, modularity, and software container concepts to manage obsolescence**. *Systems Engineering*, Washington, DC, v. 24, n. 3, p. 1-12, 2021.

PEIXOTO, Carlos José. **A implementação da MPdna Marinha do Brasil: uma proposta para o aumento da disponibilidade e confiabilidade dos meios**. 2020. 79 folhas. Tese (Curso de Política e Estratégia Marítimas) - Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2020.

PLANT ENGINEERING. **Integrated Condition Assessment System (ICAS)**. Disponível em: <<https://www.plantengineering.com/articles/integrated-condition-assessment-system-icas/>>. Acesso em: 09 junho 2024.

POÓR, Peter; ŽENÍŠEK, David; BASL, Josef. **Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions**. In: International Conference On Industrial Engineering And Operations Management, 2019, pilsen. Anais... Pilsen: IEOM Society International, 2019. p. 495-504. Disponível em: <<https://www.ieomsociety.org/>>. Acesso em: 28 maio 2024.

RESENDE, Carlos; FOLGADO, Duarte; OLIVEIRA, João; FRANCO, Bernardo; MOREIRA, Waldir; OLIVEIRA-JR, Antonio; CAVALEIRO, Armando; CARVALHO, Ricardo. **TIP4.0: Industrial Internet of Things Platform for Predictive Maintenance. Sensors**, v. 21, n. 14, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4676>>. Acesso em: 09 junho 2024.

RODRIGUES, Manuel Nogueira. **Análise de risco de manutenção aplicada aos navios da Marinha Portuguesa**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo de Mecânica) – Escola Naval, Alfeite. Orientador: CFR EN-MEC Suzana Paula Silva Lampreia.

SILVA, Daniel Guilherme Marques da; SANTOS, Luis Henrique. **Aspectos positivos do uso da Inteligência Artificial/Machine Learning na gestão e planejamento da manutenção aeronáutica**. São Paulo, s. d. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Universidade de São Paulo.

EUA. Department of Defense. **Audit of the Department of Defense's Implementation of Predictive Maintenance Strategies to Support Weapon System Sustainment. DODIG-2022-103**. Alexandria, VA: Office of the Inspector General, 2022a. 56 p. Disponível em: <<https://www.oversight.gov/sites/default/files/oig-reports/DoD/DODIG-2022-103.pdf>>. Acesso em: 12 junho 2024.

EUA. Department of the Navy. **Condition-Based Maintenance Plus (CBM+) Policy for Ships, Ship Systems, and Equipment. NAVSEAINST 4790.27B**. Washington, D.C.: Department of the Navy, 2022b. Disponível em: <<https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NAVINST/04790.027B.pdf?ver=Vxa9SVZxi4baclwYdPpdsg%3d%3d>>. Acesso em: 12 junho 2024.