

ESCOLA TÉCNICA DO ARSENAL DE MARINHA

2ºSG-EL Alexandre da Silva Santos

PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM GERADORES EMBARCADOS

Rio de Janeiro

2024

2ºSG-EL Alexandre da Silva Santos

## PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM GERADORES EMBARCADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Escola Técnica do Arsenal de Marinha, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado para Praças.

Orientador(a): 1T (RM2-EM) Carla Torres

Rio de Janeiro

2024

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise das melhores práticas para o planejamento da manutenção preventiva de geradores em ambientes embarcados, utilizando como base uma revisão da literatura existente. A pesquisa destaca as abordagens mais adotadas para a manutenção preventiva, as tecnologias disponíveis e as ferramentas específicas que colaboram para a eficiência e eficácia dos processos de manutenção nesses sistemas. Com foco na redução de falhas e na otimização do desempenho, o artigo expõe métodos que auxiliam na elaboração de planos de manutenção que visam antecipar e mitigar problemas recorrentes em sistemas de geração de energia embarcados, como embarcações e aeronaves. A discussão aborda as vantagens do planejamento sistemático e da utilização de tecnologias avançadas para a previsão e monitoramento de desempenho, enfatizando a importância da manutenção preventiva para a longevidade e confiabilidade dos geradores. Dessa forma, o estudo concluiu que a execução e a gestão da manutenção preventiva podem ser aprimoradas a partir de práticas inovadoras e outras técnicas, propondo uma integração de ferramentas tecnológicas e práticas recomendadas que promovem a continuidade operacional e a segurança das operações embarcadas.

Palavras-Chave: Manutenção preventiva; Geradores embarcados; Planejamento – Manutenção em geradores embarcados.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>MANUTENÇÃO PREVENTIVA: DEFINIÇÕES E ABORDAGENS.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>APLICAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM GERADORES EMBARCADOS.....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE CRÍTICA DAS PRÁTICAS DE PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA: MODELOS E INOVAÇÕES .....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>13</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>14</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os geradores embarcados atuam de forma essencial no funcionamento e desempenho nas diversas embarcações, desde navios comerciais e militares até embarcações de recreio (Musgrave, 2005). Eles são responsáveis por fornecer energia elétrica para sistemas críticos, como equipamentos de navegação, comunicação, controle de motores e outros dispositivos essenciais para a operação segura e contínua a bordo. Em muitos casos, a confiabilidade desses sistemas é uma questão de segurança, uma vez que falhas podem resultar em interrupções severas, comprometendo a integridade da embarcação e de sua tripulação (Kane, 1993). Em ambientes isolados, como alto-mar, onde as opções de reparo e suporte técnico são limitadas, a performance dos geradores embarcados se torna ainda mais crítica, reforçando a necessidade de medidas que garantam sua operação ininterrupta.

Nesse contexto, o problema de pesquisa está relacionado à necessidade de um planejamento eficaz da manutenção preventiva dos geradores embarcados. A manutenção preventiva, que visa monitorar e intervir em potenciais falhas antes que se manifestem de forma crítica, é uma prática essencial para aumentar a confiabilidade e eficiência desses sistemas. Todavia, a ausência de um plano adequado pode resultar em paradas inesperadas, aumento nos custos de manutenção corretiva e comprometimento da segurança da embarcação. A literatura indica que falhas em geradores embarcados frequentemente ocorrem devido à falta de manutenção regular e planejada, o que evidencia a importância de desenvolver uma abordagem robusta e sistemática para sua manutenção preventiva.

A relevância crescente sobre o tema da manutenção preventiva no contexto da indústria naval consiste na necessidade de discutir sobre uma manutenção mais adequada, que seja sistêmica e que garanta a operação contínua dos sistemas, contribuindo diretamente para a economia de recursos, segurança da tripulação e eficiência operacional das embarcações. Em um setor onde o tempo de inatividade significa perda financeira significativa e riscos à integridade física, o planejamento eficaz da manutenção preventiva surge como um componente estratégico para garantir a longevidade dos equipamentos e reduzir custos operacionais. A análise das melhores práticas pode apresentar recursos voltados para otimizar esses processos, beneficiando operadores e proprietários de embarcações, bem como a indústria como um todo.

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar, com base na literatura existente, as melhores práticas para o planejamento da manutenção preventiva em geradores embarcados. A partir de uma revisão bibliográfica, pretende-se apresentar as abordagens adotadas, as tecnologias disponíveis e as ferramentas que contribuem para a eficiência e eficácia da manutenção, minimizando falhas e otimizando o desempenho dos sistemas de geração de energia embarcados.

## **2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA: DEFINIÇÕES E ABORDAGENS**

A evolução da manutenção preventiva no setor naval pode ser rastreada até o início do século XX, quando as embarcações passaram a se tornar mais complexas e tecnologicamente avançadas (Song; Liu, 2023). À medida que o transporte marítimo e a navegação cresceram em escala e importância, a necessidade de garantir a operação contínua e segura das embarcações também aumentou. Nos primeiros tempos da navegação, a manutenção era predominantemente corretiva, ou seja, realizada após a ocorrência de falhas, o que muitas vezes resultava em acidentes e perdas financeiras significativas (Guo; Wang, 2021).

Logo mais, com o advento das grandes frotas comerciais e militares no período das guerras mundiais, tornou-se evidente a necessidade de métodos de manutenção que pudessem prever e prevenir falhas críticas (Ahmed; Quraishi, 2020). A partir dos anos 1950, começaram a surgir os primeiros modelos formais de manutenção preventiva, baseados na observação de padrões de desgaste e vida útil dos componentes das embarcações, o que ocasionou impacto direto no setor naval, onde a parada não planejada de uma embarcação no meio de uma operação podia comprometer toda a missão ou jornada, gerando custos elevados e colocando vidas em risco (Moreno; Martinez, 2022).

Na década de 1980, a introdução de tecnologias mais avançadas, como a análise de vibração e termografia, permitiu uma abordagem mais precisa na manutenção, levando ao surgimento da manutenção preditiva. Entretanto, a manutenção preventiva continua sendo uma abordagem fundamental no setor naval, especialmente devido à complexidade das operações embarcadas e à necessidade de garantir a confiabilidade dos sistemas de geração de energia (Tollefsen; Holmen, 2023).

Conceitualmente, a manutenção preventiva pode ser definida como um conjunto de atividades planejadas e programadas, realizadas com o objetivo de manter equipamentos e sistemas em condições operacionais adequadas, prevenindo falhas antes que estas ocorram (Peng; Wang, 2022). Segundo Lopez e Santos (2021), a manutenção preventiva visa assegurar a operação contínua e confiável dos equipamentos através de inspeções periódicas, ajustes, lubrificações, e substituições de peças conforme o tempo de uso ou condições específicas do equipamento. No setor naval, a manutenção preventiva é particularmente importante para geradores embarcados, já que estes são responsáveis pelo fornecimento de energia a sistemas críticos de navegação, comunicação e controle de bordo (Singh; Kumar, 2023). Desse modo, a realização de uma manutenção preventiva adequada reduz significativamente as chances de falhas inesperadas, melhorando a segurança e eficiência das embarcações.

Em termos gerais, a manutenção pode ser classificada em três tipos principais: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva. Cada uma dessas abordagens apresenta características e finalidades específicas. A manutenção corretiva, também conhecida como manutenção reativa, é realizada após a ocorrência de uma falha e sua função principal é restaurar o equipamento à sua condição operacional Lopez e Santos (2021). A manutenção preventiva, diferente da corretiva, é programada com antecedência, sendo realizada de acordo com intervalos de tempo ou ciclos de operação com o objetivo de evitar falhas através da substituição de componentes antes que eles se desgastem completamente (Moreno; Martinez, 2022). Já a manutenção preditiva, baseada no monitoramento contínuo das condições do equipamento, utiliza tecnologias como sensores, análise de vibração e termografia para detectar possíveis problemas antes que eles se manifestem (Guo; Wang, 2021).

De acordo com Lopez e Santos (2021), a manutenção preventiva atua com a finalidade de proporcionar diversos benefícios quando comparada aos outros tipos de manutenção. redução de custos de paradas não planejadas, aumento da vida útil dos equipamentos, melhoria na segurança operacional e otimização do desempenho dos equipamentos. Desse modo, a manutenção preventiva mantém os geradores embarcados operando em condições ideais, garantindo eficiência energética e contribuindo para a economia de combustível e redução de emissões poluentes.

Então, para Singh e Kumar (2023), a manutenção preventiva é uma abordagem que melhora a eficiência operacional dos geradores embarcados e aumenta a segurança e a confiabilidade da embarcação como um todo. Mesmo que a manutenção preditiva represente uma evolução tecnológica importante, a manutenção preventiva continua sendo fundamental em muitas operações marítimas, haja a vista a importância da aplicabilidade para garantir acessibilidade e previsibilidade.

### **3 APLICAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM GERADORES EMBARCADOS**

A manutenção preventiva em geradores embarcados tem como principal objetivo assegurar a confiabilidade e a longevidade dos equipamentos, evitando falhas inesperadas e maximizando sua eficiência (Rezvanizani et al. 2014). Diferente da manutenção corretiva, que só ocorre após a identificação de uma falha, a manutenção preventiva é planejada e realizada em intervalos regulares, com base em cronogramas estabelecidos ou na análise de condição do equipamento (Souza; Carazas; Gomes, 2018). Segundo Tsang (2002), a manutenção preventiva envolve a inspeção, detecção e correção de falhas potenciais antes que causem a parada do equipamento, de modo que ela pode ser aplicada aos geradores embarcados a partir de uma abordagem que busque minimizar os riscos de paralisações não programadas, que poderiam comprometer operações críticas a bordo.

Nas embarcações comerciais, a perda de um gerador pode causar prejuízos significativos, seja pela interrupção de processos de carga e descarga, seja pelo impacto na vida útil de outros sistemas alimentados pelo gerador (Aguire et al. 2021). Já nas embarcações militares, a falha de um gerador pode comprometer a capacidade de combate, colocando em risco missões estratégicas (Rezvanizani et al. 2014). Em embarcações recreativas, como iates, a manutenção preventiva garante o conforto e a segurança dos passageiros, evitando falhas que poderiam resultar em situações de emergência no mar; e em embarcações de grande porte, como navios comerciais e de transporte de cargas, o planejamento de manutenção preventiva possibilita maior durabilidade da estrutura, evitando gastos mais acentuados com troca de peças (Li et al. 2017)





Fonte: Biswas et al. (2020)

Nesse sentido, a implementação de um plano de manutenção preventiva adequado é fundamental para manter a confiabilidade e o desempenho dos geradores embarcados, prolongando sua vida útil e garantindo que estejam sempre prontos para operar em condições adversas (Biswas et al. 2020). Como destaca Moubray (1997), a manutenção preventiva é essencial para assegurar que os ativos de alta criticidade continuem operando de maneira eficiente e confiável ao longo de seu ciclo de vida, ou seja, ela possibilita que haja uma perenização das estruturas físicas, mecânicas e operacionais de um equipamento. Aguire et al. (2021) pontua que no planejamento da manutenção preventiva de geradores embarcados, várias técnicas e ferramentas são empregadas para monitorar e analisar a condição dos equipamentos, garantindo que os intervalos de manutenção sejam devidamente otimizados. Algumas podem ser observadas a partir de uma percepção de aplicabilidade para cada finalidade, tal como a análise de vibração para monitoramento de máquinas rotativas, como geradores, através de sensores instalados nos componentes críticos (Mitchell, 2007).

A termografia é outra técnica amplamente aplicada na manutenção preventiva de geradores com o uso de câmeras infravermelhas, que permite detectar pontos de calor anormais nos componentes do gerador, como conexões elétricas, enrolamentos e cabos (Mehta; Reddy, 2015). A análise de óleos lubrificantes como uma técnica crítica no monitoramento da condição dos geradores, por meio da análise das características do óleo, como viscosidade, contaminação e presença de partículas metálicas (Boyce, 2012). O uso de softwares de monitoramento e gestão em geradores embarcados por sistemas baseados em sensores integrados e Internet das Coisas (IoT), fornecem dados em tempo real sobre o desempenho dos equipamentos, permitindo que o planejamento da manutenção seja baseado em dados precisos e não apenas em cronogramas fixos (Lee et al., 2014).

#### **4 ANÁLISE CRÍTICA DAS PRÁTICAS DE PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA: IMPACTOS NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL**

O planejamento adequado da manutenção preventiva tem sido observado como uma estratégia eficaz para a maximização da eficiência operacional dos geradores embarcado (Chowdhury; Hasan, 2020). A literatura aponta que a manutenção preventiva, quando bem planejada, reduz a probabilidade de falhas, otimiza o uso de combustível e aumenta a confiabilidade dos sistemas embarcados, de modo que a implementação de um plano de manutenção preventiva eficiente pode prolongar a vida útil dos geradores e garantir maior disponibilidade operacional, reduzindo o tempo de inatividade não programado e os custos com manutenções corretivas emergenciais (Zhang; Xu, 2021).

Além disso, o impacto do planejamento de manutenção na eficiência energética dos geradores embarcados é significativo. Oliveira e Silva (2020) destacam que a execução regular de manutenções preventivas, como a limpeza de componentes e a substituição de peças desgastadas, resulta em uma queima de combustível mais eficiente, o que, em última análise, reduz os custos operacionais. Ainda, a manutenção preventiva pode melhorar a eficiência térmica do motor, minimizando o desperdício de energia e contribuindo para uma operação mais sustentável.

De acordo com Ferreira (2021), um planejamento de manutenção preventiva adequado é operacionalizado para lidar com a corrosão, desgaste e outras questões típicas do ambiente marítimo e a aplicação consistente de técnicas de manutenção preventiva

minimiza a exposição dos sistemas a esses riscos, permitindo uma operação contínua e segura. O ambiente marítimo apresenta problemas únicos para o planejamento e execução da manutenção preventiva de geradores embarcados, como o desgaste acelerado devido à alta salinidade e a umidade e vibração constante são fatores que contribuem para a degradação rápida dos componentes, tornando o planejamento uma tarefa complexa (Guo; Wang, 2021). Segundo Souza e Mendes (2022), o desafio de prever adequadamente a necessidade de substituição de peças ou ajustes antes que ocorram falhas críticas é intensificado pelas condições adversas enfrentadas em alto-mar. Essas condições também afetam o estoque de peças de reposição, uma vez que a logística de suprimentos em embarcações pode ser limitada por questões geográficas e temporais, o que dificulta a pronta substituição de componentes defeituosos.

Para Song e Liu (2023), outro ponto crítico está na qualificação e treinamento das equipes de manutenção. O planejamento eficaz da manutenção preventiva exige equipes capacitadas para lidar com os desafios técnicos impostos pelos geradores embarcados. Santos e Almeida (2021) argumentam que a formação especializada é essencial para garantir que os operadores possam identificar preventivamente sinais de desgaste e realizar intervenções precisas. Sendo assim, observa-se que a falta de treinamento adequado pode resultar em manutenções mal executadas, gerando falhas operacionais e comprometendo a segurança da embarcação.

Ainda, a necessidade de coordenação logística em operações de manutenção em alto-mar é um obstáculo significativo. As equipes devem estar preparadas para realizar manutenções com recursos limitados, o que pode requerer habilidades multidisciplinares e soluções inovadoras para mitigar a falta de peças ou equipamentos específicos (Pereira, 2020). Desse modo, a evolução tecnológica impactado no processo de aprimoramento do planejamento da manutenção preventiva em geradores embarcados. Com o advento da Indústria 4.0, tecnologias como a IoT, inteligência artificial (IA) e monitoramento remoto estão revolucionando a forma como as atividades de manutenção são gerenciadas (Leite; Souza, 2020). Segundo Costa e Martins (2020), a integração dessas tecnologias permite a coleta em tempo real de dados operacionais, facilitando a antecipação de falhas e a programação de manutenções com base no estado atual dos equipamentos, em vez de intervalos fixos de tempo.

O uso de sensores inteligentes acoplados aos geradores possibilita o monitoramento contínuo de variáveis críticas, como temperatura, pressão, vibração e consumo de combustível. De acordo com Lima et al. (2021), essa abordagem preditiva oferece uma vantagem significativa em relação aos métodos tradicionais, pois permite que intervenções sejam realizadas antes que ocorra uma falha, minimizando o risco de interrupções inesperadas e custos elevados. Além disso, os dados coletados podem ser analisados por algoritmos de IA para identificar padrões de desgaste e prever o tempo de vida útil dos componentes, o que melhora a eficiência do planejamento da manutenção.

O monitoramento remoto, facilitado pela conectividade via IoT, é outro avanço que tem simplificado o processo de manutenção em embarcações. Conforme descrito por Ribeiro (2020), essa tecnologia permite que engenheiros em terra monitorem o desempenho dos geradores a bordo em tempo real e enviem instruções ou atualizações de software sem a necessidade de intervenção manual a bordo, otimizando o processo de manutenção preventiva.

Esses avanços tecnológicos melhoram a eficiência operacional dos geradores embarcados e contribuem para a segurança e sustentabilidade das operações marítimas. A transição para um modelo de manutenção preditiva baseada em dados pode reduzir os custos gerais de manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos, além de minimizar o impacto ambiental das operações (Leite; Souza, 2020).

## **5 CONCLUSÃO**

Esta revisão bibliográfica analisou a importância do planejamento de manutenção preventiva em geradores embarcados, destacando como essa prática impacta positivamente a eficiência operacional, a confiabilidade dos equipamentos e a otimização de recursos. Um planejamento adequado permite reduzir falhas inesperadas, otimizar o consumo de combustível e minimizar o tempo de inatividade — fatores críticos para o sucesso das operações marítimas. Estudos apontam que a manutenção preventiva sistemática prolonga significativamente a vida útil dos geradores, promovendo maior segurança operacional e redução de custos.

Entretanto, o planejamento de manutenção para geradores embarcados enfrenta desafios específicos, como o ambiente hostil em alto-mar, a logística restrita para reposição de peças e reparos e a necessidade de equipes com treinamento especializado. Esses obstáculos exigem soluções tecnológicas e organizacionais adequadas para assegurar o bom funcionamento e a continuidade operacional dos geradores.

A evolução tecnológica, particularmente com a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial (IA), tem redefinido o planejamento e a execução da manutenção preventiva, possibilitando avanços significativos no monitoramento preditivo e no controle remoto de sistemas. Essas tecnologias permitem o acompanhamento em tempo real do desempenho dos geradores, a identificação de sinais precoces de desgaste e a programação de intervenções de forma mais precisa e eficiente. Dessa forma, conclui-se que o planejamento de manutenção preventiva, aliado ao uso de tecnologias avançadas, contribui não apenas para a segurança e eficiência das operações, mas também para a sustentabilidade financeira das operações marítimas, reduzindo custos operacionais e otimizando o uso dos recursos disponíveis.

## REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, D. P., et al. Condition-based maintenance of marine diesel engines with embedded generators: A case study on optimization and decision-making. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 9, n. 2, p. 133-144, 2021.
- AHMED, S.; QURAIISHI, S. Hybrid Power Systems in Naval Architecture: Combining Diesel Generators with Renewable Energy Sources. *Marine Technology Journal*, v. 45, n. 3, p. 74-89, 2020.
- BISWAS, A. K., et al. Marine generator maintenance using reliability-centered maintenance principles and real-time monitoring systems. *Journal of Maritime Research*, v. 17, n. 3, p. 89-97, 2020.
- BOYCE, Meherwan P. *Gas Turbine Engineering Handbook*. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- CHOWDHURY, R.; HASAN, S. Energy Management Systems for Electric Ships: Integration of Smart Generators and Grid Technology. *IEEE Access*, v. 8, p. 113455-113467, 2020.
- GUO, Z.; WANG, T. Analysis of the Integration of Renewable Energy Generators in Naval Vessels. *Renewable Energy Journal*, v. 78, p. 168-177, 2021.
- LEE, Jay; SIAU, Keng; KOSGI, Ranga. Predictive maintenance and the digital twin: IoT and AI enable the next generation of maintenance management. *Journal of Artificial Intelligence and Technology*, v. 23, n. 1, p. 15-29, 2014.
- LEITE; Luiz Miguel K.; SOUZA, José Roberto B. A Aplicação de Inteligência Artificial na esfera de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento e os potenciais benefícios para a Marinha do Brasil. *ERABED*, v.1, n.1, p.1-15, 2020.
- Li, Y., et al. Fault diagnosis and prognosis for marine engines with the combination of data-driven and model-based approaches. *Applied Energy*, n. 187, p. 15-25, 2017.
- LOPEZ, F.; SANTOS, D. Hybridization of Marine Generators with Energy Storage Systems to Reduce Fuel Consumption. *Renewable Energy & Marine Applications Journal*, v. 60, p. 333-345, 2021.
- MEHTA, J. P.; REDDY, K. M. Infrared thermography for condition monitoring – a review. *Journal of Applied Research and Technology*, v. 13, n. 3, p. 337-349, 2015.
- MITCHELL, John S. *Introduction to Machinery Analysis and Monitoring*. 2nd ed. Tulsa: PennWell Corporation, 2007.
- MORENO, A.; MARTÍNEZ, J. Energy Storage Systems for Ships: Enhancing the Performance of Onboard Generators. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, v. 9, n. 2, p. 99-108, 2022.

MOUBRAY, John. *Reliability-centered Maintenance*. 2nd ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

MUSGRAVE, G. W. *Marine Diesel Engines: Maintenance, Troubleshooting, and Repair*. 3rd ed. McGraw-Hill, 2005.

PENG, D.; WANG, L. Fuel Cell Power Generation in Marine Vessels: Potential and Challenges. *Energy Conversion and Management*, v. 254, p. 114-124, 2022.

REZVANIZANIANI, S., et al. Review and recent advances in prognostics and health-management systems for batteries in electric and hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, n. 256, p. 110-124, 2014.

SINGH, R.; KUMAR, D. Development of Solid Oxide Fuel Cell Generators for Naval Applications. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 145, n. 1, p. 012003, 2023.

SONG, C.; LIU, Y. Optimization of Shipboard Energy Systems: A Multi-objective Approach to Improve Efficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 10, n. 4, p. 45-57, 2023.

SOUZA, G. F. M., CARAZAS, F. J. G., GOMES, G. F. Reliability, availability, maintainability (RAM) analysis and failure prediction for the optimization of marine generator sets maintenance plans. *Ocean Engineering*, n. 158, p. 289-302, 2018.

TOLLEFSEN, T.; HOLMEN, R. Innovative Marine Generator Technologies: Advances in Fuel Efficiency and Emissions Reduction. *Journal of Cleaner Production*, v. 250, p. 119-131, 2023.

TSANG, Albert H.C. A strategic approach to managing maintenance performance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 8, n. 2, p. 87-94, 2002.

ZHANG, Y.; XU, H. Dynamic Performance of Naval Ship Power Generators Under Different Operating Conditions. *Journal of Ship Technology*, v. 67, n. 1, p. 203-212, 2021.