57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

Análise Weibull como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão no Planejamento do Fim do Ciclo de Vida de Sistemas Complexos da Marinha do Brasil

Thiago Nascimento da Silva
Diretoria de Gestão de Programas da Marinha (DGePM)
Rua 1º de Março, 118 - Centro. CEP 20.010-000 - Rio de Janeiro
nascimento.silva@marinha.mil.br

Gabriel Custódio Rangel
Centro de Análise de Sistemas Navais (CASNAV)
Ilha das Cobras - Centro. CEP 20.091-000 - Rio de Janeiro
gabriel.custodio@marinha.mil.br

Victor Benicio Ardilha da Allen Alves
Centro de Análise de Sistemas Navais (CASNAV)
Ilha das Cobras, Centro. CEP 20.091-000 - Rio de Janeiro
benicio@marinha.mil.br

Diego do Nascimento da Silva
Diretoria de Abastecimento da Marinha (DAbM)
Ilha das Cobras, Centro. CEP 20.091-000 - Rio de Janeiro
diego.nascimento@marinha.mil.br

RESUMO

A tomada de decisão sobre o fim do ciclo de vida de meios navais é um desafio estratégico que exige previsões consistentes sobre a confiabilidade dos seus sistemas. Este artigo propõe o uso da análise Weibull de dois parâmetros como ferramenta de apoio à decisão, por meio da previsão de falhas em componentes críticos. A metodologia permite estimar a probabilidade de falhas ao longo do tempo, subsidiando decisões entre reparo, reforma ou substituição de ativos. Um estudo de caso aplicado a um navio da Marinha do Brasil demonstra a utilidade prática da análise Weibull no contexto naval. Os resultados destacam a importância da abordagem quantitativa para decisões informadas sobre a extensão da vida útil de navios.

PALAVRAS CHAVE. Análise Weibull, Previsão de Falhas, Tomada de Decisão.

Tópicos. Poder Marítimo e Defesa. Gestão de Ciclo de Vida. Modelos Probabilísticos. Tomada de Decisão

ABSTRACT

Decision-making regarding the end of the life cycle of naval assets is a strategic challenge that requires consistent predictions about the reliability of their systems. This article proposes the use of the two-parameter Weibull analysis as a decision support tool

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

through the prediction of failures in critical components. The methodology enables the estimation of failure probabilities over time, supporting decisions between repair, overhaul, or replacement of assets. A case study involving a ship from the Brazilian Navy demonstrates the practical utility of Weibull analysis in the naval context. The results highlight the importance of a quantitative approach for informed decisions on extending the service life of ships.

KEYWORDS. Weibull Analysis, Failure Prediction, Decision Making.

Maritime Power and Defense. Life Cycle Management. Probabilistic Models. Decision Making

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

1. Introdução

A gestão do ciclo de vida de ativos militares complexos representa um desafio estratégico e técnico para forças navais contemporâneas. À medida que os sistemas envelhecem, aumentam-se as taxas de falha, os custos de manutenção e os riscos operacionais, exigindo decisões criteriosas sobre a continuidade em serviço dessas plataformas. Na Marinha do Brasil (MB), esse cenário se torna particularmente sensível diante da necessidade de avaliar a viabilidade de manter em operação navios que, embora ainda funcionais, já apresentam sinais de degradação estrutural e perda de confiabilidade, conforme apontado por Ramírez e Utne [2015].

Segundo Begovic et al. [2006], a distribuição de Weibull é amplamente utilizada para modelar a probabilidade de falhas em sistemas mecânicos, como os encontrados em meios navais. Ao integrar os parâmetros de forma (β) e escala (η), essa análise oferece uma base quantitativa consistente para avaliar a confiabilidade dos sistemas ao longo do tempo.

Este artigo tem como objetivo explorar a aplicação da análise Weibull de dois parâmetros como instrumento de apoio à decisão no contexto do fim do ciclo de vida de navios militares, com foco na previsão de falhas. A metodologia será demonstrada por meio de um estudo de caso no Navio-Aeródromo Multipropósito (NAM) *Atlântico* (Figura 1), atualmente em operação na MB. Ao final deste artigo, será discutido como a aplicação da análise Weibull pode contribuir para melhorar a confiabilidade operacional e reduzir os riscos, além de sugerir caminhos para futuras pesquisas nessa área.



Figura 1: NAM *Atlântico* [Marinha do Brasil, 2023].

2. Contextualização Teórica

Manter uma frota naval moderna e capaz é essencial para que nações garantam a soberania e a segurança marítima. No entanto, restrições orçamentárias e avanços tecnológicos acelerados desafiam esse objetivo, podendo comprometer a prontidão operacional ao aumentar os problemas de manutenção e das taxas de falha dos meios, caso não haja atualizações ou substituições oportunas em tempo hábil. Essa situação se agrava à medida que os custos de manutenção e reparo de equipamentos envelhecidos aumentam, somando-se às dificuldades de obtenção de peças de reposição, o que eleva o risco de obsolescência e

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

problemas de compatibilidade com sistemas mais modernos, conforme observado por Brown e Willis [2006].

De acordo com Morey et al. [2021], o processo de tomada de decisão para a extensão da vida útil é complexo, principalmente porque envolve ativos que, além de apresentarem alto grau de sofisticação técnica e longos ciclos de vida, são intensivos em capital e demandam longos prazos para substituição. Shafiee e Animah [2017] oferecem uma lista relevante de estratégias para o fim do ciclo de vida de sistemas, dividindo-as em três categorias principais, apresentadas na Tabela 1: reparo, reforma e substituição.

Tabela 1: Estratégias para o Fim da Vida Útil de Sistemas Complexos. Adaptado de Animah et al. [2017].

Estratégia	**Descrição**
Reparo	Foca na restauração de um sistema para uma condição funcional, de forma proativa ou reativa, sendo normalmente menos custosa do que a substituição ou reforma. Estratégias de reparo devem considerar a disponibilidade de peças e o impacto no tempo de inatividade.
Reforma	Estende a vida útil de um sistema ao restaurá-lo para uma condição próxima da original. Esse processo pode envolver substituição parcial, recondicionamento e redesenho.
Substituição	Envolve a substituição de ativos existentes por novos. Essa estratégia, embora ofereça o mais alto nível de confiabilidade, exige investimento significativo. A decisão de substituir deve equilibrar os custos com os benefícios de maior disponibilidade e desempenho do ativo.

Diante dos custos elevados associados à aquisição de novos navios, uma estratégia que combine programas de extensão da vida útil com a aquisição de novos meios pode representar uma abordagem financeiramente mais viável. Essa prática, longe de ser inovadora, reflete estratégias já adotadas por outras marinhas, evidenciando sua efetividade e aplicabilidade. A decisão da Marinha dos Estados Unidos de estender a vida útil de quatro contratorpedeiros da classe Arleigh Burke ilustra um esforço para manter capacidades operacionais diante de restrições fiscais significativas [U.S. Navy, 2023].

A análise Weibull, conforme descrita por Wang e Yin [2019], apresenta especial aplicabilidade a componentes mecânicos — como motores e estruturas de navios — devido à sua capacidade de representar distintos padrões de deterioração ao longo do ciclo de vida dos ativos. Os principais parâmetros da análise Weibull são o parâmetro de forma (β), que indica o tipo de falha (se é crescente, constante ou decrescente com o tempo), e o parâmetro de escala (η), que representa o tempo característico até a ocorrência de uma falha [Animah et al., 2018]. Este último, de acordo com Clement e Lasky [2020], embora frequentemente associado ao tempo médio entre falhas, define, mais precisamente, o tempo no qual há uma probabilidade de 63,2% de que o sistema analisado tenha falhado.

A função de taxa de falha $\lambda(t)$ expressa a frequência com que falhas ocorrem em um instante de tempo, sendo comumente representada por uma "curva em forma de banheira", representada na Figura 2, abaixo. O parâmetro de forma β da distribuição Weibull determina o comportamento da taxa de falha: quando $\beta < 1$, a taxa de falha decresce ao longo do tempo, o que reflete um aumento da confiabilidade. Para $\beta = 1$, a taxa

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

mantém-se constante, caracterizando uma confiabilidade estável. Já quando $\beta > 1$, observa-se um crescimento da taxa de falha, sinalizando uma redução progressiva da confiabilidade.

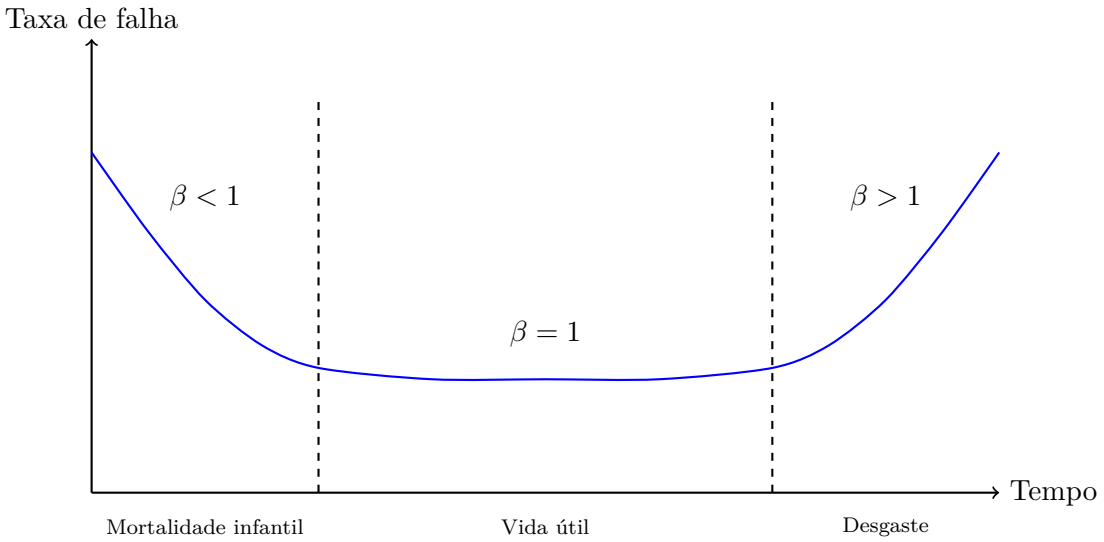


Figura 2: Curva em forma de banheira representando o comportamento típico da taxa de falha ao longo do tempo. Adaptado de Lu et al. [2016].

3. Metodologia

Este estudo adota a análise Weibull de dois parâmetros como base metodológica para apoiar a tomada de decisão quanto ao planejamento do fim do ciclo de vida de sistemas complexos da MB, com foco na previsão de falhas em componentes críticos, por meio dos parâmetros de forma (β) e escala (η) da distribuição Weibull.

3.1. Previsão de Falhas com a Análise Weibull de dois parâmetros

Animah et al. [2018] propuseram que o número esperado de falhas do tempo t ao tempo t+1 é dado pela seguinte equação, dados os dois parâmetros da distribuição Weibull:

$$n_f(t) = \int_t^{t+1} \lambda(t)\, dt \tag{1}$$

$$n_f(t) = \int_t^{t+1} \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} dt = \frac{(t+1)^\beta - t^\beta}{\eta^\beta}, \quad t = l_o, \ldots, l_o + l_e - 1, \tag{2}$$

onde $n_f(t)$ representa o número de falhas no tempo t.

Para calcular o número esperado de falhas, é necessário determinar os parâmetros β e η, que serão inseridos na Equação 2. Esses parâmetros, segundo McCool [2012] são comumente obtidos por meio do método gráfico, o qual é estruturado para representar a função de distribuição acumulada de Weibull: plota-se os dados da amostra transformados no eixo horizontal e a função de distribuição acumulada estimada no eixo vertical. Especificamente, a transformação envolve representar $\ln(\textit{Tempo de Falha})$ no eixo horizontal contra $\ln\left(-\ln\left(1 - \textit{Probabilidade Acumulada}\right)\right)$ no eixo vertical. A Equação 3 representa a forma linear do gráfico ajustado, em que o parâmetro de forma β corresponde à inclinação da reta:

$$\ln\left(-\ln(1 - \textit{Probabilidade Acumulada})\right) = \beta \ln(\textit{Tempo de Falha}) - \beta \ln(\eta) \tag{3}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

A partir da forma linear da equação de Weibull, é possível isolar o parâmetro de escala η ao rearranjar a equação em função da interseção com o eixo vertical (termo independente). Esse procedimento permite determinar η diretamente a partir dos coeficientes da regressão linear, resultando na Equação 4 demonstrada a seguir:

$$\begin{aligned} \text{interseção} &= -\beta \ln(\eta) \\ \ln(\eta) &= -\left(\frac{\text{interseção}}{\beta}\right) \\ \eta &= e^{-\left(\frac{\text{interseção}}{\beta}\right)} \end{aligned} \tag{4}$$

3.2. Estrutura de Apoio à Tomada de Decisão com Base na Análise Weibull de Dois Parâmetros

A análise Weibull de dois parâmetros oferece uma abordagem quantitativa para suporte à tomada de decisões no contexto da gestão do ciclo de vida de sistemas complexos. Para fins deste estudo, o processo de tomada de decisão é estruturado em etapas sequenciais apoiadas, em última intstância, pela análise de falhas fornecida pela distribuição de Weibull: **Priorização:** Diante da impraticabilidade de se avaliar individualmente todos os sistemas, estruturas e componentes (SEC), Animah et al. [2017] destacam a importância de concentrar os recursos disponíveis nas áreas de maior impacto para a confiabilidade. Para tal, a classificação funcional dos SEC proposta por Esa e Muhammad [2023] para bordo de navios de guerra em três categorias — flutuar, navegar e combater (em ordem de importância) — facilita a avaliação dos níveis de risco. O conceito de decomposição hierárquica, apresentado por Yang e Jine [2020], oferece um modelo estruturado para segmentar a complexidade dos sistemas, como os navios, em camadas gerenciáveis, permitindo uma visão mais clara da interdependência dos SEC, onde falhas individuais afetam a confiabilidade global do sistema. Um diagrama ilustrando essa decomposição é apresentado na Figura 3.

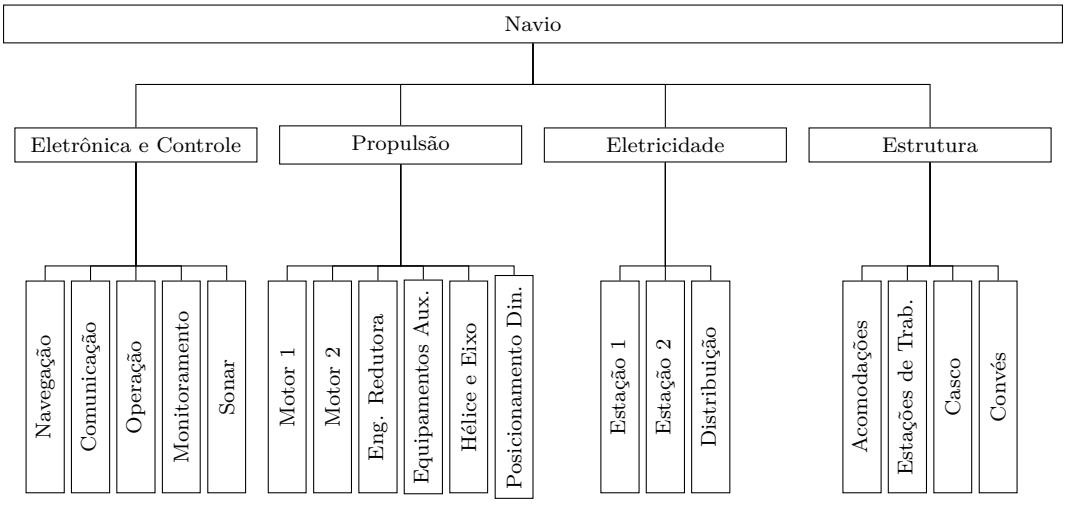


Figura 3: Estrutura hierárquica dos sistemas do navio. Adaptado de Yang e Jine [2020].

Determinação da Viabilidade de Manutenção: A análise de falhas ajuda a avaliar se a manutenção de um componente ou sistema é uma solução viável. Caso a previsão de falhas mostre que a vida útil de um componente pode ser estendida por um período considerável, a reforma pode ser uma opção mais econômica.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

Avaliação de Custos de Manutenção: Ao prever o número de falhas e a taxa de falha ao longo do tempo, a análise Weibull contribui para a estimativa dos custos de manutenção. Se os custos aumentarem de forma exponencial devido a falhas frequentes e complexas, a substituição do ativo pode se tornar mais vantajosa.

Decisão: Se a análise de Weibull indicar que as falhas se tornarão mais frequentes e de alto impacto em um futuro próximo, e os custos de manutenção superarem os benefícios da operação, a substituição do navio ou dos componentes pode ser a decisão mais estratégica. A análise também ajuda a comparar os custos totais de manter o ativo versus os custos de aquisição de um novo.

4. Análise e Discussão

A análise Weibull foi aplicada ao NAM *Atlântico* para apoiar decisões sobre sua permanência em operação por mais 10 anos. Projetado para 30 anos de serviço e desempenhando um papel estratégico na MB — incluindo operações anfíbias, apoio humanitário e resposta a desastres —, o navio tem sua disponibilidade diretamente ligada à prontidão operacional e ao alcance dos objetivos estratégicos da Força.

Para este estudo, foi selecionado o motor de combustão principal do NAM *Atlântico*, com base na priorização técnica apresentada na Tabela 2. A classificação considerou o nível de risco dos sistemas, com base em sua criticidade operacional. Utilizaram-se dados nocionais para preservar o caráter não classificado da pesquisa.

Tabela 2: Priorização - NAM *Atlântico*.

Sistema	**Sub-sistema**	**Nível de Risco**
Estrutura	Casco	Alto
Propulsão	Motor principal diesel	Alto
Eletrônica e controle	Comunicação	Moderado
Estrutura	Acomodação da tripulação	Baixo

O sistema de motor de combustão principal do NAM *Atlântico* é responsável por fornecer propulsão primária para navegação em diversas condições marítimas. Este sistema é composto principalmente por um absorvedor de vibração, cilindros do motor, volante de inércia, eixo de transmissão, acoplamento e hélice, conforme ilustrado na Figura 4.

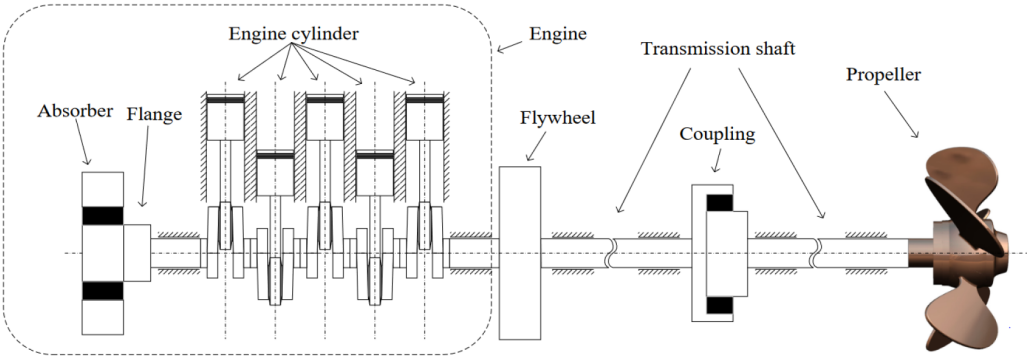


Figura 4: Diagrama de um sistema de propulsão com motor diesel marítimo [Chen et al., 2020].

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

4.1. Análise Weibull

Com base no conjunto de dados de falhas do motor de combustão principal, detalhado na Tabela 3, apresentada a seguir, foi realizada uma estimativa gráfica para determinar os parâmetros de escala e forma.

Tabela 3: Previsão de falha

Falha (dias)	Posição	Probabilidade acumulada	Ln(Falha)	Ln(-ln(1 - Probabilidade acumulada))
43	1	0.1	3.76	-2.25037
54	2	0.2	3.99	-1.49994
90	3	0.3	4.50	-1.03093
93	4	0.4	4.53	-0.67173
132	5	0.5	4.88	-0.36651
145	6	0.6	4.98	-0.08742
167	7	0.7	5.12	0.18563
183	8	0.8	5.21	0.47588
195	9	0.9	5.27	0.83403

O gráfico de Weibull, Figura 5, indicou um parâmetro de forma (β) de 1.794 e um parâmetro de escala (η) de 143,45.

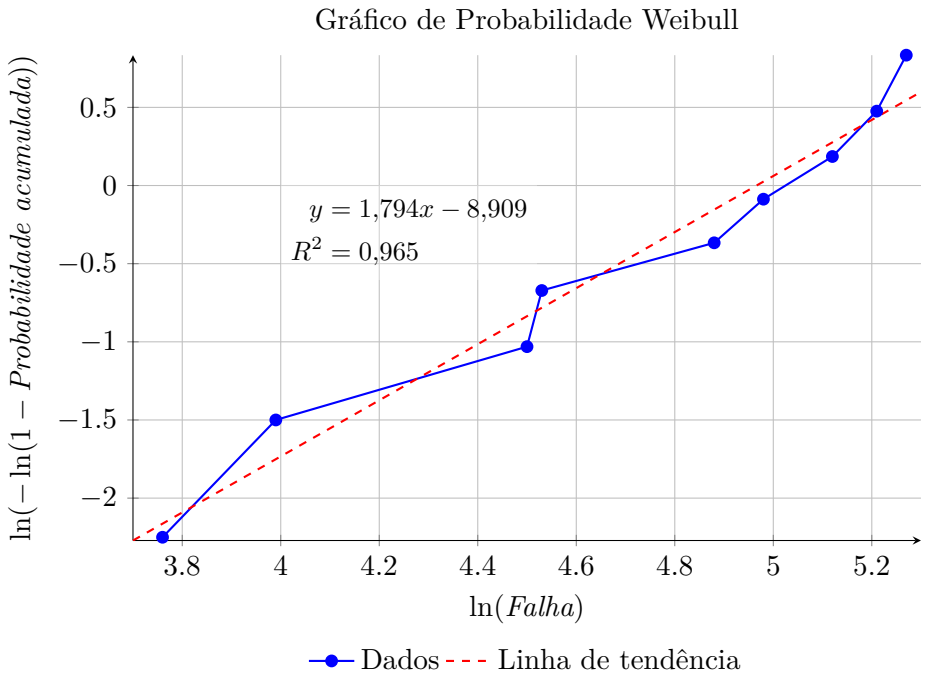


Figura 5: Gráfico Weibull com 9 entradas e linha de tendência ($\beta > 1$)

Os cálculos realizados e o gráfico da função $\lambda(t)$ indicam um aumento da taxa ao longo do tempo. Isso significa que, à medida que o motor de combustão principal do NAM *Atlântico* envelhece, sua confiabilidade tende a diminuir progressivamente, elevando a probabilidade de ocorrências críticas no futuro. A consistência do modelo é reforçada pelo coeficiente de determinação $R^2 = 0{,}965$, que revela um ajuste significativo da linha de tendência aos dados observados. O resultado sustenta a adequação da suposição de uma distribuição Weibull para representar o comportamento do sistema e indica a ausência

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

de outliers significativos que comprometam a validade da análise. Diante desse cenário, a tomada de decisão pode ser guiada pelos seguintes fatores:

Aumento nos custos de manutenção: O crescimento da taxa de falha sugere que manutenções corretivas serão mais frequentes e onerosas. Isso pode impactar a disponibilidade operacional do navio e aumentar os custos ao longo dos anos.

Possível necessidade de reforma: Se a projeção de falhas continuar a crescer, uma reforma estrutural do motor pode ser necessária para mitigar o risco operacional e prolongar sua vida útil.

Viabilidade da substituição: Caso a taxa de falha se torne insustentável e os custos de manutenção ultrapassem um limite aceitável, a substituição do motor pode ser a alternativa mais confiável para garantir a operação segura do NAM *Atlântico* nos próximos 10 anos.

5. Conclusão

A análise Weibull demonstrou-se uma ferramenta eficaz para apoiar decisões sobre o fim do ciclo de vida de sistemas navais complexos, ao oferecer uma base quantitativa para prever falhas e avaliar a confiabilidade operacional. No caso do NAM *Atlântico*, a tendência crescente de falhas em um sistema crítico reforça a importância de decisões proativas quanto a reparo, reforma ou substituição de seus sistemas, especialmente diante de restrições orçamentárias. A crescente complexidade dos navios modernos exige que estratégias de extensão de vida útil considerem a integração sistêmica entre SEC. Futuras pesquisas podem explorar a integração de aspectos econômicos, ambientais e sociais, além de expandir o uso do modelo para diferentes plataformas militares, ampliando sua robustez e aplicabilidade.

Referências

Animah, I., Shafiee, M., Simms, N., e Considine, M. (2017). Techno-economic feasibility assessment of life extension decision for safety critical assets. In *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*, p. 1248–1255.

Animah, I., Shafiee, M., Simms, N., Erkoyuncu, J. A., e Maiti, J. (2018). Selection of the most suitable life extension strategy for ageing offshore assets using a life-cycle cost-benefit analysis approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 24(3):311–330.

Begovic, M., Djuric, P., Perkel, J., Vidakovic, B., e Novosel, D. (2006). New probabilistic method for estimation of equipment failures and development of replacement strategies. In *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, volume 10, p. 246a–265a.

Brown, R. E. e Willis, H. L. (2006). The economics of aging infrastructure. *IEEE Power and Energy Magazine*, 4(3):36–43.

Chen, M., Ouyang, H., Li, W., Wang, D., e Liu, S. (2020). Partial frequency assignment for torsional vibration control of complex marine propulsion shafting systems. *Applied Sciences*, 10:147.

Clement, N. e Lasky, R. (2020). Weibull distribution and analysis: 2019. In *2020 Pan Pacific Microelectronics Symposium*, p. 1–5.

Esa, M. e Muhammad, M. (2023). A comprehensive review of prescriptive analytics for naval vessels risk-based maintenance decision-making. In Ahmad, F., Al-Kayiem, H. H., e King Soon, W. P., editors, *ICPER 2020*. Springer.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br

Lu, Y., Miller, A. A., Hoffmann, R., e Johnson, C. W. (2016). Towards the automated verification of weibull distributions for system failure rates. In *Critical Systems: Formal Methods and Automated Verification*, p. 81–96. Springer.

Marinha do Brasil (2023). NAM Atlântico. URL https://www.marinha.mil.br/meios-navais/navio-aerodromo-multiproposito. [Accessed: 2025-04-01].

McCool, J. (2012). *Using the Weibull distribution: Reliability, modeling, and inference*. John Wiley & Sons.

Morey, S., Chattopadhyay, G., e Larkins, J. (2021). Decision-making in complex asset life extension. In *International Conference on Maintenance and Intelligent Asset Management*, p. 1–6.

Ramírez, P. A. P. e Utne, I. B. (2015). Use of dynamic bayesian networks for life extension assessment of ageing systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 133:119–136.

Shafiee, M. e Animah, I. (2017). Life extension decision-making of safety critical systems: An overview. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 47:174–188.

U.S. Navy (2023). Navy approves service life extension for four arleigh-burke class destroyers. URL https://www.navy.mil/Press-Office/Press-Releases/displaypressreleases/Article/3480104/navy-approves-service-life-extension-for-fourarleigh-burke-class-destroyers/. [Accessed: 2025-04-01].

Wang, J. e Yin, H. (2019). Failure rate prediction model of substation equipment based on weibull distribution and time series analysis. *IEEE Access*, 7:85298–85309.

Yang, Z. e Jine, H. (2020). Modeling and simulation method of ship availability for service period. In *2020 Global Reliability and Prognostics and Health Management*, p. 1–5.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212530
https://proceedings.science/p/212530?lang=pt-br