

GESTÃO DA MANUTENÇÃO E CONFIABILIDADE OPERACIONAL NO TRANSPORTE FLUVIAL MISTO NO ESTADO DO AMAZONAS

MAINTENANCE MANAGEMENT AND OPERATIONAL RELIABILITY IN MIXED RIVER TRANSPORT IN THE STATE OF AMAZONAS

GESTION DEL MANTENIMIENTO Y CONFIABILIDAD OPERACIONAL EN TRANSPORTE FLUVIAL MIXTO EN EL ESTADO DEL AMAZONAS

João D'Anuzio Lima de Azevedo¹
Efraín Eugenio Navas Medina²
Gabrielly Silva dos Santos³
José Ramon Hechavarría Pérez⁴

RESUMO: Este estudo analisa a gestão da manutenção na frota de transporte fluvial misto no Porto de Manaus, objetivando mapear os fatores determinantes da confiabilidade operacional na Amazônia. A coleta de dados se baseou em questionários declarativos, combinando estatística descritiva, Diagrama de Pareto, FMEA e o Teste Exato de Fisher. A FMEA revelou maior criticidade no sistema propulsor (NPR = 504) e menor no motor principal (NPR = 54). O Diagrama de Pareto evidenciou que qualificação (42,1%) e gestão (21,1%) concentram 63,2% dos gargalos. Inferencialmente ($p = 0,0833$), observou-se tendência de associação entre registros de bordo e paradas inferiores a três horas ($MTTR \leq 3$ h). A estocagem por precaução resulta em gastos mensais com manutenção superiores a R\$ 5.000,00 em 62,5% da frota. Ambientalmente, 93,7% descartam lubrificantes adequadamente, mas persistem deficiências no saneamento a bordo. Conclui-se que a continuidade operacional repousa na capacidade contingencial das tripulações, enquanto a dispersão dos custos evidencia a ausência de sistemas integrados ao Custo do Ciclo de Vida.

Palavras-chave: Navegação Interior. Gestão da Manutenção. Confiabilidade Operacional. Transporte Fluvial Amazônico.

¹ Doutor, Professor, Pesquisador e Orientador - Universidade do Estado do Amazonas - UEA.

² Doutor, Professor e Pesquisador Colaborador - Universidad de Holguín - UHO.

³ Discente do Curso de Engenharia Mecânica - Universidade do Estado do Amazonas - UEA.

⁴ Professor, Pesquisador e Coorientador - Universidade do Estado do Amazonas - UEA.

ABSTRACT: This study analyzes maintenance management in the mixed passenger and cargo river transport fleet at the Port of Manaus, aiming to map the key factors determining operational reliability in the Amazon region. Data collection was based on self-reported questionnaires, combining descriptive statistics, Pareto Chart, FMEA, and Fisher's Exact Test. The FMEA revealed higher criticality in the propulsion system (RPN = 504) and lower in the main engine (RPN = 54). The Pareto Chart showed that workforce qualification (42.1%) and management systems (21.1%) account for 63.2% of operational bottlenecks. Inferentially ($p=0.0833$), a trend of association was observed between formal onboard records and downtime of less than three hours ($MTTR \leq 3$ h). Precautionary stocking results in monthly maintenance expenses exceeding BRL 5,000.00 in 62.5% of the fleet. Environmentally, 93.7% dispose of lubricants properly, though onboard sanitation deficiencies persist. It is concluded that operational continuity relies on the contingency capability of the crews, while cost dispersion highlights the lack of systems integrated with Life-Cycle Costing.

Keywords: Inland Navigation. Maintenance Management. Operational Reliability. Amazon River Transport.

RESUMEN: Este estudio analiza la gestión del mantenimiento en la flota de transporte fluvial mixto en el Puerto de Manaus, con el objetivo de mapear los factores determinantes de la confiabilidad operacional en la Amazonía. La recopilación de datos se basó en cuestionarios declarativos, combinando estadística descriptiva, Diagrama de Pareto, FMEA y la Prueba Exacta de Fisher. El FMEA reveló una mayor criticidad en el sistema propulsor (NPR = 504) y menor en el motor principal (NPR = 54). El Diagrama de Pareto evidenció que la capacitación (42,1%) y la gestión (21,1%) concentran el 63,2% de los cuellos de botella. Inferencialmente ($p = 0,0833$), se observó una tendencia de asociación entre los registros de a bordo y paradas inferiores a tres horas ($MTTR \leq 3$ h). El almacenamiento por precaución resulta en gastos mensuales de mantenimiento superiores a R\$ 5.000,00 en el 62,5% de la flota. En el aspecto ambiental, el 93,7% desecha los lubricantes adecuadamente, pero persisten deficiencias en el saneamiento a bordo. Se concluye que el nivel de disponibilidad operacional radica en la capacidad de contingencia de las tripulaciones, mientras que la dispersión de los costos evidencia la ausencia de sistemas integrados al Costo del Ciclo de Vida.

Palabras clave: Navegación Interior. Gestión del Mantenimiento. Confiabilidad Operacional. Transporte Fluvial Amazónico.

INTRODUÇÃO

Na Região Amazônica, o transporte fluvial desempenha papel estratégico na mobilidade de pessoas e no abastecimento de mercadorias, configurando, em diversas localidades, o único meio de acesso existente. Dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários e da Universidade Federal do Pará (ANTAQ; UFPA, 2018) apontam uma movimentação anual aproximada de 9,8 milhões de passageiros e 3,4 milhões de toneladas de cargas, dimensão que consolida as embarcações de transporte misto como ativos fundamentais para a integração territorial e a sustentação econômica regional.

A continuidade e a segurança dessa navegação dependem diretamente da integridade operacional da frota, o que coloca a gestão da manutenção no centro da confiabilidade do serviço. Em uma rede hidroviária de grandes extensões e com restrições severas de infraestrutura terrestre de apoio, a indisponibilidade não programada de um navio gera impactos sociais e econômicos expressivos. Ao analisar acidentes com embarcações na Bacia Amazônica, Padovezi (2025) aponta o caráter multifatorial desses eventos, identificando a precariedade das condições de conservação e as falhas nas rotinas de manutenção entre os vetores determinantes de risco. Em convergência, o estudo de Fontes et al. (2023) sublinha que a estruturação de procedimentos preventivos é indispensável para a mitigação de acidentes no transporte fluvial de passageiros na Amazônia.

3

A literatura internacional recente sobre navegação interior registra avanços no emprego de sistemas de monitoramento, aquisição de dados e tecnologias digitais de diagnóstico (Zhou et al., 2025; Zou et al., 2026). Contudo, a produção científica dedicada à manutenção de embarcações fluviais permanece incipiente quando comparada ao acervo voltado ao setor marítimo ou à infraestrutura de vias navegáveis. No cenário nacional, identificam-se estudos pontuais, como a aplicação da Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) em sistemas elétricos de embarcações (Cruz Brilhante; Rocha Pinto, 2019) e o diagnóstico de práticas de manutenção em rebocadores (Belloni et al., 2019). Apesar dessas contribuições, investigações que correlacionem empiricamente essas ferramentas à gestão operacional em embarcações de transporte misto continuam escassas.

A superação dessa lacuna requer o alinhamento da navegação regional às práticas da engenharia de manutenção contemporânea, na qual o emprego de modelos de confiabilidade e

o tratamento estatístico de dados de campo fornecem a sustentação técnica necessária para elevar a disponibilidade física dos ativos e otimizar recursos em ambientes operacionais remotos.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar a gestão da manutenção na frota de transporte fluvial que opera no Porto de Manaus, avaliando a criticidade dos subsistemas navais, o impacto da formalização dos registros de bordo na disponibilidade operacional e o perfil econômico-logístico do setor. Para consubstanciar essa análise, a pesquisa mapeia o perfil construtivo e operacional da frota, mensura os índices de risco funcional dos equipamentos via matriz FMEA, testa a associação estatística entre o controle formal de manutenção e a redução do tempo de inatividade por meio do Teste Exato de Fisher, e hierarquiza os gargalos operacionais, econômicos e ambientais prioritários com o auxílio do Diagrama de Pareto.

METODOLOGIA

Caracterização do Estudo e Área Amostral

A pesquisa classifica-se como um estudo de campo, quantitativo-qualitativo, exploratório e aplicado, focado na gestão e nas técnicas de manutenção do transporte fluvial de passageiros e cargas no Estado do Amazonas. O recorte espacial concentrou-se na infraestrutura aquaviária do Porto de Manaus (AM), reconhecido como o principal polo logístico e ponto de confluência das linhas de navegação intermunicipal e interestadual da Bacia Amazônica. Levantamentos censitários primários realizados na área de acostagem e nos terminais de embarque identificaram uma população delimitada de $N = 63$ embarcações regionais de médio e grande porte em operação comercial regular.

Delineamento Amostral e Critério de Saturação

A seleção das unidades amostrais ocorreu por amostragem não probabilística por conveniência e tipicidade, direcionada aos operadores, proprietários e maquinistas das embarcações de maior representatividade operacional e capacidade de transporte. A amostra final consolida dados de $n = 16$ embarcações de grande porte, o que corresponde a uma taxa de cobertura direta de 25,4% de toda a frota cadastrada no Porto de Manaus.

Para contextualizar o rigor estatístico em populações finitas, a determinação do tamanho amostral teórico seguiu a formulação de Cochran (1977) apresentada na Equação 1, conforme abaixo.

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{(N-1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot p \cdot (1-p)} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde $N = 63$ representa a população total; $Z = 1,645$ denota o escore normal padronizado para um nível de confiança de 90%; $p = 0,5$ representa a variância máxima da população; e indica a margem de erro admitida. Para a amostra obtida de $n = 16$, o erro de amostragem absoluto situa-se em aproximadamente 18%. Contudo, como a amostragem priorizou os navios-motores e barcos de grande porte (com capacidades de até 862 passageiros e 965 toneladas de carga), a amostra abrange mais de 60% do volume total diário de passageiros e cargas movimentados no terminal.

A adequação da amostra baseou-se adicionalmente no princípio da saturação teórica de dados (Hennink; Kaiser, 2022; Saunders et al., 2018). Durante as etapas de campo, observou-se a repetição sistemática dos padrões de resposta a partir da 12ª entrevista. A ausência de novos modos de falha, condutas ambientais ou práticas de manutenção inéditas nas abordagens subsequentes confirmou a redundância informativa, atestando que a amostragem de 16 unidades atingiu a estabilidade conceitual necessária para fundamentar as inferências estatísticas e os modelos de confiabilidade do setor.

Instrumento de Coleta de Dados e Validação

A coleta de dados primários baseou-se na aplicação de um formulário de pesquisa estruturado contendo 37 questões, subdivididas em 11 blocos temáticos desenhados para mapear a cadeia operacional e técnica das embarcações. A operacionalização das variáveis está detalhada na Tabela 1.

O instrumento foi submetido à validação de face e de conteúdo por um comitê de peritos em engenharia naval e gestão da manutenção, atendendo aos preceitos de validade e confiabilidade metodológica (Miguel, 2018). Visando eliminar vieses de aferição decorrentes da disparidade na formação acadêmica do corpo operacional, a sintaxe das perguntas passou por adequação sociolinguística. A substituição de jargões acadêmicos por termos operacionais de uso corrente nos conveses assegurou a compreensão semântica homogênea por parte dos

comandantes, maquinistas e proprietários, sem comprometer o rigor taxonômico das variáveis coletadas.

Tabela 1 - Operacionalização das Variáveis do Instrumento de Pesquisa

Bloco Temático	Questões	Dimensão Avaliada	Tipo de Variável
1. Identificação Básica	Q ₁ a Q ₃	Perfil da empresa, função do entrevistado e embarcação	Categorizada Nominal
2. Projeto e Construção	Q ₄ a Q ₈	Material do casco, idade, local de fabricação e reformas	Nominal / Ordinal
3. Características da Operação	Q ₉ a Q ₁₃	Rota, distância linear, tempo de viagem, paradas e capacidade	Razão / Discreta
4. Práticas de Manutenção	Q ₁₄ a Q ₂₁	Rotinas (preventiva/corretiva), frequência, peças e registros	Nominal / Ordinal
5. Problemas Frequentes	Q ₂₂ a Q ₂₃	Tipologia das falhas enfrentadas e tempo de parada (MTTR)	Categorizada / Ordinal
6. Segurança e Custos	Q ₂₄ a Q ₂₅	Condição dos equipamentos de salvatagem e OPEX mensal	Ordinal / Razão
7. Recursos Humanos	Q ₂₆ a Q ₂₇	Quantitativo da tripulação e treinamento em mecânica/naval	Discreta / Nominal
8. Apoio Externo	Q ₂₈ a Q ₂₉	Local para manutenções maiores e facilidade de peças	Nominal / Ordinal
9. Impactos da Manutenção	Q ₃₀ a Q ₃₂	Histórico de perdas de viagem, acidentes e gravidade	Nominal / Ordinal
10. Questões Ambientais	Q ₃₃ a Q ₃₆	Descarte de efluentes sanitários, resíduos de óleo e treinamento	Categorizada Nominal
11. Sugestões e Demandas	Q ₃₇	Oportunidades de melhoria e gargalos na visão do operador	Qualitativa Aberta

Fonte: Azevedo, Santos e Pérez (2026).

Procedimentos de Análise Estatística e Modelagem de Confiabilidade

Os dados foram tabulados, higienizados e processados por meio do software Microsoft Excel®, utilizando recursos de Tabelas Dinâmicas, funções estatísticas nativas e equações personalizadas. Inicialmente, aplicou-se a estatística descritiva e o agrupamento via Tabelas

Dinâmicas para o cálculo de frequências absolutas, relativas e consolidações percentuais referentes à caracterização construtiva, operacional, logística e econômica da frota (OPEX).

Em seguida, para a análise de qualidade, empregou-se a Metodologia de Análise e Solução de Problemas (MASP) por meio do Diagrama de Pareto aplicado às respostas abertas da Questão 37. As categorias foram agrupadas, ordenadas de forma decrescente por frequência relativa e processadas via cálculo de porcentagens acumuladas.

Na etapa de análise inferencial não paramétrica, testou-se a hipótese de que a prática declarada de controle e registro de manutenção (identificada via autodeclaração sobre o uso de planilhas ou fichas de bordo) associa-se à percepção de redução do tempo médio de inatividade por falha (MTTR estimado em faixas ordinais declaratórias), estruturando-se uma tabela de contingência 2×2 . A verificação da significância estatística deu-se pela aplicação do Teste Exato de Fisher, executado por meio do cálculo das probabilidades hipergeométricas e fatoriais diretas estruturadas em planilha. A escolha do teste exato justifica-se pelo tamanho da amostra e pela presença de frequências esperadas inferiores a 5 nas células da tabela (Montgomery; Runger, 2021), adotando-se o nível de significância de $\alpha = 0,10$ (90% de confiança), adequado para estudos exploratórios de campo em ambientes industriais isolados.

Por fim, a parametrização do risco dos subsistemas navais deu-se pela matriz FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Os dados de propulsão, governo, geração e motor principal foram tabulados via planilha para o cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR), conforme apresentado na Equação 2 (Silva et al., 2022; Stamatis, 2019).

$$NPR = S \cdot O \cdot D \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde a Severidade (S) avaliou a gravidade da perda funcional; a Ocorrência (O) mensurou a frequência histórica da falha; e a Detecção (D) mediu a probabilidade de a tripulação identificar a anomalia antes da parada funcional. Os parâmetros foram graduados de 1 a 10 com base nos registros obtidos pelo questionário.

Diante da ausência de sistemas formais de registro de falhas e de banco de dados informatizado na frota regional, os dados utilizados na matriz FMEA, bem como a categorização do tempo médio de inatividade (MTTR), pautaram-se na elicitación do conhecimento operacional tácito e no julgamento declaratório dos comandantes e maquinistas entrevistados. A conversão da experiência prática relatada em escalas ordinais padronizadas (1

a 10) alinha-se aos procedimentos recomendados para a avaliação de confiabilidade em sistemas operacionais remotos destituídos de histórico de manutenção ou automatizado de avarias.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização da Frota e Operação

Esta seção caracteriza a frota amostral em termos de material do casco, idade de construção, origem do estaleiro e parâmetros operacionais de rota. A estratificação dessas variáveis fornece a base técnica para correlacionar o esforço físico exigido das embarcações com as práticas de manutenção adotadas pelas empresas de navegação estudadas. A caracterização detalhada das variáveis construtivas, etárias e operacionais da frota amostral está consolidada na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização Construtiva, Etária e Operacional da Frota Amostrai

Categoria / Variável	Intervalo / Faixa	Frequência Relativa (%)
Material do Casco e Superestrutura	Aço Naval	100,00%
	Madeira / Outros	0,00%
Ano de Construção	Após 2020	37,50%
	2011 – 2020	31,30%
	2000 – 2010	25,00%
	Anterior a 2000 / Não informado	6,20%
Origem de Construção	Manaus (AM)	43,80%
	Outros Municípios do Amazonas	31,30%
	Outros Estados	25,00%
Extensão da Rota (Trecho de Ida)	≥ 500 km	43,80%
	501 a 1.000 km	37,50%
	> 1.000 km	18,70%
Capacidade de Passageiros	Até 250 passageiros	25,00%
	251 a 500 passageiros	43,80%
	Acima de 500 passageiros	31,20%
Capacidade de Carga Útil	Até 300 t	31,30%
	301 a 600 t	43,80%

Acima de 600 t

25,00%

Fonte: Azevedo, Santos e Pérez (2026).

Os resultados evidenciam uma transição estrutural consolidada na navegação comercial formal da região. A totalidade das embarcações pesquisadas possui casco e superestrutura em aço (Tabela 2). Essa característica contrasta com o tradicional uso da madeira, material que ainda prevalece em embarcações de menor porte, mas que vem sendo substituído na matriz de transporte de passageiros. Esse perfil reflete uma adequação do setor ao rigor técnico exigido para a emissão de outorgas, em concordância com as regulamentações vigentes que estipulam parâmetros de segurança naval e conforto no transporte intermunicipal misto (Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados e Contratados do Estado do Amazonas [ARSEPAM], 2022).

A análise do perfil etário e da origem de construção (Tabela 2) demonstra que a frota se encontra em processo de modernização e renovação de capital. Observa-se que 68,8% das embarcações foram construídas a partir de 2011, sendo 37,5% entregues na presente década (após 2020). Essa renovação é sustentada diretamente pela indústria naval local, visto que 75% dos navios foram fabricados em estaleiros no próprio estado do Amazonas, distribuídos entre Manaus, Parintins e Iranduba. A fabricação regional estreita a cadeia de suprimentos e facilita o acesso posterior das empresas à infraestrutura original para docagem e grandes reformas estruturais.

No aspecto da severidade de uso, a amostra atende a eixos logísticos de longa distância, operando sob regime de alta carga contínua. Mais de 56% das rotas analisadas ultrapassam 500 km de distância linear por trecho (ida), com navios operando no eixo Manaus-Tabatinga em trajetos superiores a 1.100 km. Em conjunto com lotações que ultrapassam 500 passageiros em 31,2% da frota e capacidades de carga útil superiores a 600 toneladas em um quarto das embarcações (Tabela 2), as longas jornadas ininterruptas submetem os motores de combustão interna e os geradores de energia a altos índices de desgaste térmico e mecânico (Alves; Duarte, 2026). Essa configuração operacional sublinha a necessidade de programas de vistorias internas frequentes, fundamentando a aplicação de metodologias preditivas e preventivas de manutenção centrada na confiabilidade.

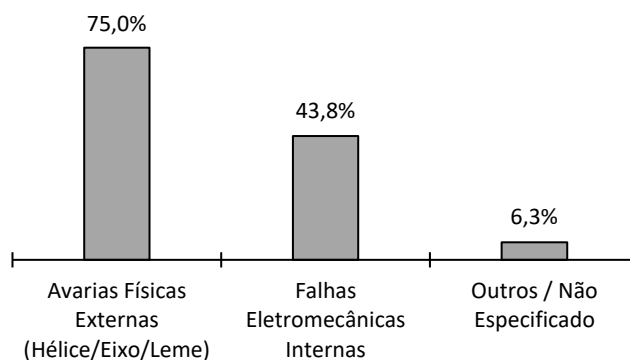
Tipologia de Falhas e Capacitação Técnica para Manutenção Contingencial

Para compreender a eficácia dos sistemas de gestão da manutenção empregados pelas empresas de navegação, foi correlacionada a tipologia das falhas mais frequentes com o nível de qualificação da tripulação e os tempos médios de inatividade das embarcações, relatados no questionário, estabelecendo um diagnóstico da capacidade de contingência e resposta operacional da frota frente aos desafios da navegação fluvial.

O cruzamento entre as rotinas de manutenção informadas e os relatos sobre perda de viagens indica uma elevada continuidade operacional nas embarcações amostradas, sustentada pela combinação entre intervenções preventivas básicas e a capacidade de resposta imediata da tripulação. Observou-se que a totalidade dos navios aplica, em alguma medida, a manutenção preventiva, geralmente fragmentada em duas frentes: as intervenções básicas (troca de óleo e filtros) executadas pela própria tripulação de forma contínua, e revisões complexas delegadas a técnicos terceirizados dos fabricantes, pautadas por horímetros (p. ex., a cada 1.000 horas de operação). Como resultado direto dessa hibridização, 81,2% (13 de 16) das embarcações relataram nunca ter sofrido perda de viagem ou passagem de carga devido a falhas mecânicas, enquanto os 18,8% restantes consideraram o evento raro. Esses dados confirmam os postulados de Telles (2019) sobre a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), que demonstra como a adoção de rotinas preventivas baseadas na criticidade minimiza a probabilidade de falhas sistêmicas catastróficas.

10

Figura 1 - Tipologia das Principais Falhas Enfrentadas na Operação Fluvial



Fonte: Azevedo, Santos e Pérez (2026).

Um dos aspectos mais relevantes da pesquisa reside na tipologia das avarias. Conforme ilustrado na Figura 1, as falhas eletromecânicas internas (43,8%) são secundárias em relação às avarias físicas externas, reportadas por 75,0% das embarcações. O principal vetor de falhas mecânicas se concentra no conjunto de propulsão e governo (hélices, eixos e lemes), frequentemente danificados pelo impacto direto com obstáculos submersos (troncos e detritos) inerentes à hidrodinâmica dos rios amazônicos. Como essas variáveis físicas do meio ambiente fogem ao controle do planejamento de manutenção convencional, o indicador de disponibilidade passa a depender estritamente da capacidade de contingência da embarcação.

Nesse aspecto, o fator humano desponta como a principal âncora de segurança do sistema. O cruzamento estatístico revela que 100% das embarcações possuem tripulantes com treinamento formal em mecânica ou rotinas navais, predominantemente certificados pela Capitania Fluvial (Marinha do Brasil) ou instituições como o SENAI. Em decorrência dessa qualificação, em 100% dos casos de falha durante a viagem, a primeira linha de ação é a tentativa de conserto no próprio local pela tripulação, muitas vezes utilizando peças de reposição mantidas a bordo (como hélices de metal e eixos sobressalentes). Esse alto nível de resiliência in loco justifica os curtos tempos médios de parada por falha, cenário em que a maioria esmagadora dos eventos de manutenção corretiva não programada é resolvida em menos de três horas, sem a necessidade de reboque ou interrupção do trajeto (segundo entrevistados). Este panorama corrobora a visão de Albertin et al. (2021) sobre o benchmarking operacional, provando que, no isolamento geográfico da Amazônia, a descentralização do conhecimento técnico para os operadores diretos da máquina é o diferencial mais crítico para um desempenho superior.

Oportunidades de Melhoria Técnica e Impactos Ambientais da Frota

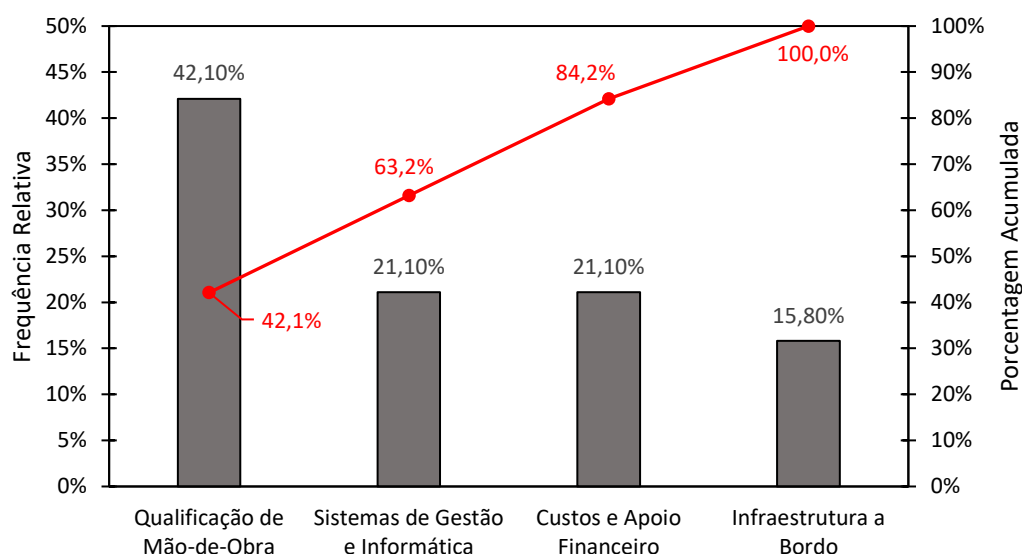
Superar as deficiências operacionais da frota regional exige converter os diagnósticos de campo em um ordenamento de prioridades técnicas. Para isto, esta seção aplica ferramentas consagradas de qualidade, especificamente a Metodologia de Análise e Solução de Problemas (MASP), para categorizar os gargalos operacionais percebidos pelos próprios gestores e tripulantes. Adicionalmente, consolida-se um panorama das externalidades

ambientais geradas pela frota, cruzando as práticas de contingência de bordo com o impacto ecológico nos rios da região.

A análise de Pareto (Figura 2) sistematiza as demandas reportadas pelo corpo operacional e confirma a premissa de que o principal gargalo logístico e técnico na Amazônia não reside exclusivamente na tecnologia embarcada, mas no desenvolvimento humano e gerencial. Observa-se que a qualificação de mão de obra isoladamente responde por 42,1% das citações, enquanto a carência de sistemas de gestão e informática representa 21,1% das demandas. Em conjunto, esses dois fatores acumulam 63,2% dos gargalos prioritários apontados pelas tripulações (Figura 2), compondo a base do diagrama. Esses resultados estão em consonância com o diagnóstico do Legislativo brasileiro sobre a infraestrutura fluvial, que aponta o encarecimento do transporte e a interrupção de serviços essenciais como consequências diretas da ausência de estruturas descentralizadas de apoio técnico e de capacitação na Amazônia (Brasil, 2026). A superação desse cenário requer a transição de um modelo de manutenção empírico (baseado na memória e fichas de papel) para uma manutenção centrada na confiabilidade e orientada por indicadores de classe mundial.

No que tange às externalidades operacionais, os dados revelam uma assimetria severa nas práticas ambientais a bordo. Por um lado, o manuseio de derivados de petróleo apresenta alta maturidade, pois 93,7% (15 de 16) das embarcações adotam protocolos rigorosos para o descarte de óleos e graxas, armazenando os resíduos em recipientes próprios para entrega ou revenda em oficinas e portos estruturados. Em caso de vazamentos no convés, as tripulações empregam barreiras de contenção (serragem e panos) ou sistemas de bombeamento, refletindo a eficácia das normativas de prevenção da poluição hídrica fiscalizadas pela Autoridade Marítima (Marinha do Brasil, 2023).

Figura 2 - Hierarquização das demandas técnicas e gerenciais relatadas pelas tripulações via Diagrama de Pareto



Fonte: Azevedo, Santos e Pérez (2026).

Entretanto, esse rigor não se estende ao saneamento básico das embarcações. O levantamento estatístico denuncia que 93,7% da frota pesquisada ainda realiza o descarte de dejetos sanitários diretamente nos rios. Apenas uma embarcação relatou o uso de tanques de retenção. Essa lacuna infraestrutural e procedimental valida as conclusões de Ferreira (2016), que classifica o lançamento direto de dejetos humanos pelos navios comerciais como um dos mais graves vetores de risco microbiológico ao meio ambiente e às populações ribeirinhas que captam água no mesmo corpo hídrico. A estruturação de uma gestão de manutenção holística, portanto, deve obrigatoriamente englobar a adequação (e a respectiva manutenção preventiva) de sistemas de tratamento de efluentes a bordo, superando a visão restrita que limita a manutenção naval apenas à propulsão e à estrutura do casco.

Análise Inferencial da Disponibilidade Operacional e dos Controles Declarados

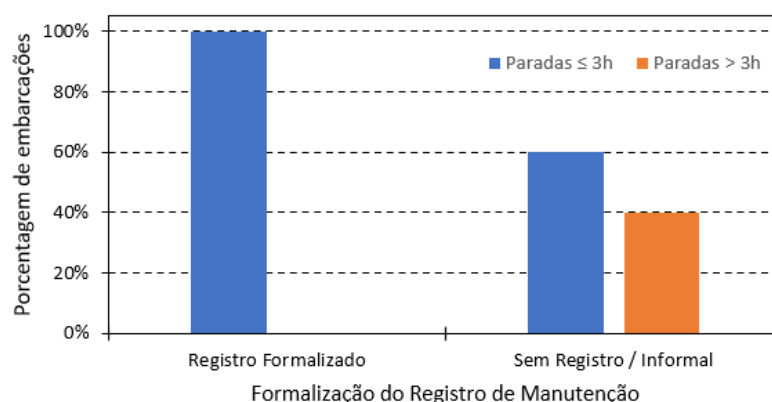
A avaliação da associação entre a formalização declarada dos controles de manutenção e o tempo de inatividade das embarcações foi realizada por meio do Teste Exato de Fisher. A variável de controle se baseou nas declarações dos gestores quanto à existência de acompanhamento documental contínuo (fichas de máquinas ou diários de bordo), categorizando a amostra entre empresas com registro sistematizado relatado (n=11) e com

controle informal ou ausente ($n=5$), sem a realização de auditorias documentais diretas no acervo das empresas.

Conforme observado na Figura 3, entre as embarcações cujos entrevistados declararam manter controle sistematizado de manutenção, 100% ($n=11$) apresentaram paradas não programadas por falha inferiores a três horas ($MTTR \leq 3$ h). Em contrapartida, no grupo de empresas com controle informal ou ausente, 40% ($n=2$) relataram paradas superiores a três horas, enquanto 60% ($n=3$) mantiveram tempos reduzidos suportados pela capacidade de resposta emergencial da tripulação.

A aplicação do teste resultou em $p=0,0833$. Embora o valor ultrapasse o nível de significância tradicional de $\alpha=0,05$, ele estabelece uma tendência marginalmente significativa no nível de confiança de 90% ($\alpha=0,10$), aceito na literatura para pesquisas exploratórias em setores operacionais com restrição amostral (Field, 2013).

Figura 3 - Disponibilidade operacional autorreportada em função do controle declarativo de registros de manutenção



Fonte: Azevedo, Santos e Pérez (2026).

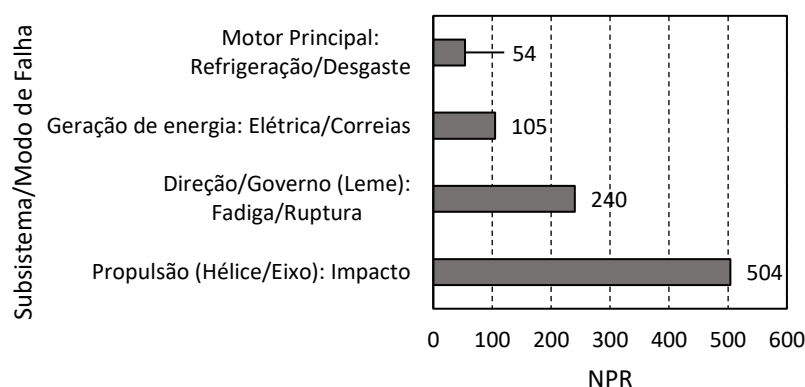
Os dados apontam uma tendência de associação entre a formalização declarada dos controles e a redução do tempo médio de reparo. Esse panorama corrobora os princípios da Confiabilidade Operacional defendidos por Wireman (2014) e Telles (2019), demonstrando que o acompanhamento documental contínuo, mesmo em formato físico, favorece a previsibilidade e a agilidade nas intervenções corretivas ao longo das rotas fluviais.

Avaliação de Criticidade de Sistemas Navais por meio da Metodologia FMEA

A transposição dos dados empíricos de falha para um modelo estruturado de confiabilidade exige a parametrização do risco associado a cada subsistema da embarcação. Para mapear essa vulnerabilidade, aplicou-se a matriz de Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) a partir da percepção técnica declarada e da experiência operacional relatada pelas tripulações. O Número de Prioridade de Risco (NPR) foi calculado a partir da Equação 2. Esta quantificação direciona o foco da engenharia para os gargalos que efetivamente comprometem a disponibilidade operacional e a segurança da navegação na bacia amazônica.

A estratificação do NPR (Figura 4) demonstra que os componentes de propulsão externa, especificamente hélices e eixos, lideram isoladamente a matriz de criticidade com um escore de 504. A principal causa-raiz para este índice elevado é o fator de Detecção (D). Diferentemente do desgaste interno de motores (que pode ser monitorado por horímetros e análise de vibração), a colisão do conjunto propulsor com troncos e detritos submersos é um evento de detecção visual quase nula nas águas turvas dos rios regionais. Embora a severidade de uma quebra de hélice seja atenuada pela presença de peças sobressalentes mantidas a bordo, a altíssima ocorrência destes impactos exige intervenções corretivas emergenciais, muitas vezes demandando o alagamento controlado ou a inclinação da embarcação para a substituição in loco.

Figura 4 - Número de Prioridade de Risco (NPR) dos Sistemas Navais - Metodologia FMEA



Fonte: Azevedo, Santos e Pérez (2026).

Em segundo lugar, o sistema de direção e governo (leme) apresenta um NPR de 240. Falhas neste subsistema foram classificadas na pesquisa primária como estruturais e de alta

gravidade. A fadiga do material nos cabos ou a quebra do conjunto do leme resulta na perda imediata de manobrabilidade, expondo a embarcação a riscos de encalhe ou colisão com as margens. Este cenário corrobora os estudos de Silva et al. (2022), que ao aplicarem FMEA em sistemas navais, destacam que a perda de governo possui um fator de severidade crítico (frequentemente avaliado entre 8 e 9 numa escala de 10) devido à ameaça direta à integridade do casco e da vida humana.

O motor principal apresentou o menor índice de prioridade de risco (NPR = 54) no escopo de avarias frequentes. Este resultado não diminui a importância do motor, mas reflete o sucesso das rotinas de manutenção adotadas. Conforme documentado, os motores principais contam com inspeções diárias rigorosas, troca regular de fluidos pela tripulação e intervenções periódicas executadas por técnicos certificados dos fabricantes. O acompanhamento operacional contínuo e a detecção precoce de anomalias visuais e sonoras inibem a ocorrência de falhas catastróficas no motor principal, alinhando-se aos princípios da Manutenção Centrada na Confiabilidade (Stamatis, 2019), onde o rigor nas rotinas preventivas neutraliza a criticidade funcional do ativo.

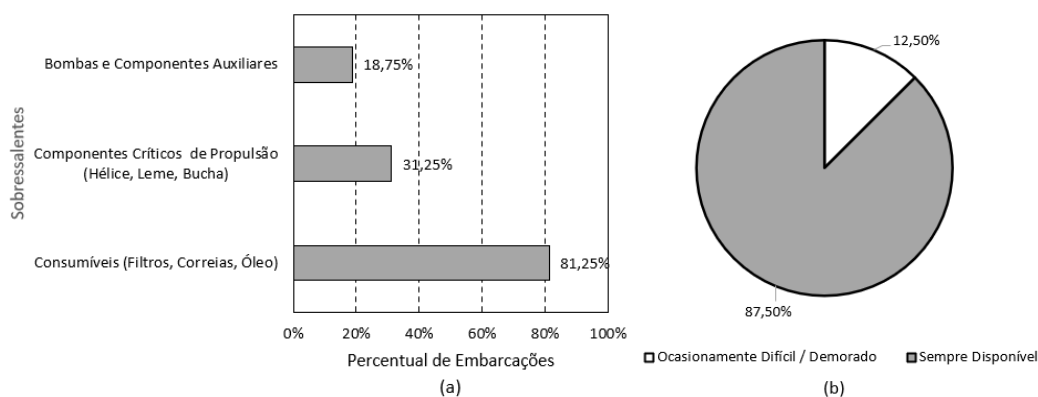
Políticas de Estoque e Disponibilidade de Componentes Navais na Amazônia

16

Esta seção avalia como as empresas de navegação equacionam a disponibilidade de peças nos grandes centros urbanos com a necessidade imperativa de garantir a continuidade operacional durante jornadas fluviais que, frequentemente, duram dias ou semanas longe de qualquer infraestrutura de reparo. A análise do perfil de sobressalentes mantidos a bordo permite mensurar o custo logístico da confiabilidade na região.

Os dados referentes à tipologia dos sobressalentes (Figura 5a) evidenciam a predileção pelo estoque de consumíveis de rotina, mantidos por 81,3% das embarcações (filtros, correias e óleos). Contudo, o perfil desse inventário revela a severidade imposta pelo ambiente operacional: 31,3% da frota imobiliza capital de giro no armazenamento de componentes críticos de propulsão e governo (hélices, lemes e buchas), enquanto 18,8% transportam bombas e componentes auxiliares (Figura 5a). Um dos entrevistados destacou o carregamento de hélices reservas cujo valor unitário atinge R\$ 30.000,00, evidenciando o alto custo de imobilização financeira necessário para garantir a resiliência da embarcação em rota.

Figura 5 - Sobressalentes de Bordo e Disponibilidade de Peças: (a) Categorias de peças estocadas a bordo; (b) Facilidade de aquisição no mercado



Fonte: Azevedo, Santos e Pérez (2026).

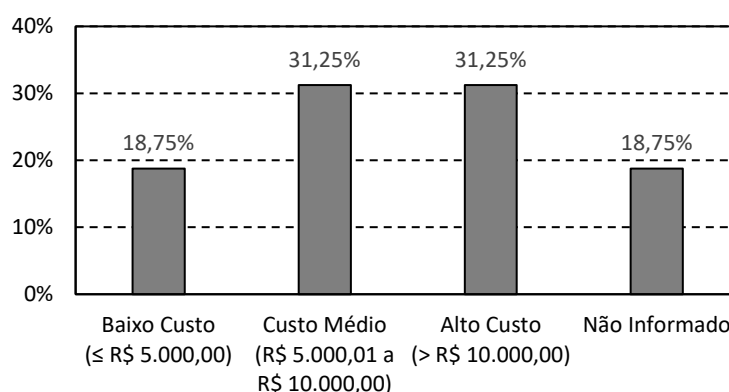
Este comportamento logístico configura um modelo clássico de estoque por precaução, altamente demandado em operações remotas de alta criticidade (Faria; Costa, 2020). Paralelamente, o diagnóstico sobre o fornecimento (Figura 5b) indica que 87,5% dos entrevistados afirmam que as peças estão sempre disponíveis no mercado, enquanto 12,5% relatam que o acesso é ocasionalmente difícil ou demorado. Esse aparente paradoxo entre a alta disponibilidade mercadológica urbana e o elevado volume de estoque a bordo se explica pela assimetria geográfica. A facilidade de compra se concentra nos polos industriais e comerciais, primordialmente em Manaus, não se estendendo à rota navegável. Uma falha no conjunto propulsor a centenas de quilômetros da capital anula a vantagem da disponibilidade comercial, forçando a tripulação a atuar como sua própria cadeia de suprimentos autônoma. A Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2022) ressalta que essa assimetria infraestrutural é um dos principais fatores de encarecimento do frete e das passagens fluviais na Região Norte.

A alta frequência de substituição de componentes propulsores e o elevado custo logístico de manutenção desses estoques apontam para a necessidade de inovações no design das embarcações. Obras futuras podem modelar o comportamento físico do escoamento ao redor do casco, aplicando rotinas de fluidodinâmica computacional e aproximações numéricas ancoradas no Método das Diferenças Finitas para projetar defletores hidrodinâmicos ou túneis de proteção para o sistema propulsor. A minimização do impacto de detritos contra as pás pode reduzir a ocorrência de falhas, desonerando o inventário de bordo e otimizando o fluxo de caixa das empresas de transporte fluvial.

Análise Econômica e Impacto Financeiro da Manutenção Operacional

Com base na Figura 6, observa-se que o levantamento estatístico da estrutura de OPEX revela uma forte assimetria no dispêndio financeiro mensal das empresas de navegação fluvial. Do universo de entrevistados que estimou seus dispêndios mensais (excluindo-se 18,75% de abstenções de retorno), constata-se que 76,9% das embarcações operam com custos médios a altos, desembolsando regularmente valores superiores a R\$ 5.000,00 mensais apenas em atividades de conservação mecânica e estrutural (31,25% na faixa média e 31,25% na faixa alta da amostra total, conforme Figura 6). Deste montante, cinco embarcações situam-se na faixa de alto custo (31,25%), ultrapassando a barreira dos R\$ 10.000,00 mensais. Casos extremos da amostra relataram custos que alcançam até R\$ 150.000 anuais, inflacionados por variáveis como alta lotação (acima de 700 passageiros), distâncias superiores a 1.000 km por trajeto (como a rota Manaus-Tabatinga) e a contratação de profissionais terceirizados com honorários fixados em dólar pelos fabricantes de propulsores.

Figura 6 - Distribuição dos Gastos Mensais com Manutenção Naval (OPEX)



Fonte: Azevedo, Santos e Pérez (2026).

Este panorama financeiro atesta que a confiabilidade naval na Amazônia é um passivo oneroso. A literatura de economia dos transportes esclarece que modais isolados geograficamente sofrem com o “Custo Amazônia”, um sobrepreço logístico decorrente da carência de infraestrutura (Souza; Oliveira, 2021). No contexto da manutenção, este custo se manifesta através do transporte aéreo de peças de reposição urgentes, da imobilização de capital em estoques de contingência a bordo e do deslocamento de técnicos especializados de Manaus

para o interior a fim de solucionar panes eletromecânicas complexas que extrapolam o escopo de atuação da tripulação residente.

Adicionalmente, os dados empíricos concordam diretamente com as demandas corporativas apontadas na análise de Pareto. As reclamações frequentes de que a mão de obra de manutenção é cara e os pedidos por apoio governamental via subsídios e financiamentos são reflexos diretos de margens de lucro espremidas pela depreciação agressiva dos ativos físicos (cascos e motores). Conforme Assis (2018) defende em seus estudos sobre logística fluvial operante, a viabilidade econômica do transporte na Bacia Amazônica, sem repasse integral de custos ao passageiro de baixa renda, demanda políticas públicas de isenção tributária para peças navais de reposição e incentivos à capacitação técnica descentralizada em calhas de rios estratégicos. A ausência dessas políticas de subsídio converte a gestão de manutenção em um contínuo exercício de redução de prejuízos.

Sob a ótica metodológica, cumpre ressaltar que a variável de impacto financeiro foi mensurada por meio de faixas ordinais declaratórias de percepção, constituindo uma limitação intrínseca da pesquisa de campo frente à ausência de auditoria em demonstrativos contábeis ou notas fiscais das empresas. Longe de invalidar o achado, a dispersão e a imprecisão nas estimativas de gastos informadas por parcela dos comandantes e maquinistas traduzem um diagnóstico estrutural do setor, ou seja, a carência de ferramentas de Planejamento e Controle de Manutenção integradas à gestão de Custos do Ciclo de Vida. Sem o fracionamento entre custos preventivos e corretivos, a gestão financeira do transporte fluvial permanece majoritariamente reativa, pautada pela percepção do fluxo de caixa imediato em detrimento da previsibilidade orçamentária de longo prazo.

CONCLUSÃO

O mapeamento das práticas de manutenção naval no Porto de Manaus permitiu diagnosticar aspectos estruturais, operacionais e econômicos da gestão, execução e controle de manutenção do transporte fluvial misto de passageiros e cargas no Estado do Amazonas.

Os resultados evidenciam uma frota submetida a regimes severos de carga e a viagens que podem ultrapassar 1.000 km de extensão, com embarcações fabricadas predominantemente em aço e inserida em um processo contínuo de modernização, impulsionado pelos estaleiros regionais.

As embarcações mantêm elevados níveis de disponibilidade por meio de uma abordagem híbrida de manutenção, que combina inspeções realizadas pelas tripulações, intervenções periódicas especializadas e reparos planejados ou decorrentes de falhas imprevistas.

A aplicação da matriz FMEA revelou que as falhas de maior frequência e impacto nas embarcações não estão associadas aos motores principais, mas à exposição mecânica do sistema propulsor. Os impactos de hélices e eixos contra troncos e detritos submersos resultaram no maior Número de Prioridade de Risco (NPR = 504), influenciado pela baixa capacidade de detecção prévia desses obstáculos nas águas dos rios amazônicos.

O monitoramento preventivo do motor principal contribuiu para que esse equipamento apresentasse o menor índice de criticidade (NPR = 54), evidenciando a importância do controle sistemático dos ativos para a redução da ocorrência de falhas funcionais de maior gravidade.

A análise estatística inferencial, realizada por meio do Teste Exato de Fisher ($p=0,0833$), indicou uma tendência de associação entre a prática declarada de controle de manutenção e menores tempos de reparo (MTTR). As embarcações cujos entrevistados relataram a prática de registros sistematizados (como diários de bordo ou fichas físicas) apresentaram 100% de paradas por falha inferiores a três horas ($MTTR \leq 3$ h), contra 40% de paradas prolongadas no grupo com controle estritamente informal.

O mapeamento de prioridades pela análise de Pareto (MASP) reforçou esse diagnóstico ao demonstrar que a qualificação da mão de obra (42,1%) e a carência de sistemas de gestão (21,1%) concentram 63,2% de todas as demandas reportadas, confirmando que o desenvolvimento humano e a informatização constituem os "poucos vitais" para elevar a resiliência operacional da frota.

Sob a perspectiva econômica e logística, a pesquisa demonstrou que a assimetria geográfica exige a manutenção de estoques de contingência a bordo (presentes em 81,3% para consumíveis e 31,3% para componentes de propulsão), forçando a tripulação a atuar como sua própria cadeia de suprimentos autônoma em rota. Esse modelo de precaução se reflete na estrutura de OPEX, na qual 62,5% das embarcações operam com gastos mensais de manutenção superiores a R\$ 5.000,00, situando-se 31,25% da frota no patamar de alto custo (acima de R\$ 10.000,00).

A dispersão das estimativas financeiras relatadas pelas tripulações evidencia limitações no uso de ferramentas de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) integradas à análise

do Custo do Ciclo de Vida (LCC), indicando que o controle econômico ainda se concentra predominantemente nas despesas operacionais imediatas.

No âmbito ambiental, identificou-se uma assimetria entre a gestão de resíduos de óleos lubrificantes e o saneamento básico a bordo. Enquanto a coleta e a destinação dos óleos lubrificantes apresentam elevado grau de conformidade com as normas vigentes, a descarga de resíduos sanitários diretamente nos corpos hídricos ainda constitui um problema relevante na frota analisada, evidenciando a necessidade de incorporar soluções ambientais às rotinas de manutenção e reforma das embarcações.

Como continuidade da pesquisa, recomenda-se avaliar, por meio de modelagem computacional (CFD/MEF), soluções de proteção do sistema propulsor, como defletores hidrodinâmicos, bem como investigar o desenvolvimento de sistemas compactos de tratamento de efluentes a bordo ou estratégias adequadas de armazenamento e coleta.

Recomenda-se também aprofundar a incorporação do Custo do Ciclo de Vida (LCC) à gestão da manutenção. Adicionalmente, a ampliação da amostra para outros polos hidroviários da Bacia Amazônica poderá permitir a realização de análises comparativas e a consolidação de um diagnóstico de maior abrangência regional.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS; UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. **Caracterização da oferta e da demanda do transporte fluvial de passageiros e cargas na Região Amazônica**: relatório executivo. Brasília: ANTAQ, 2018.

ALBERTIN, M. R.; ELIAS, S. J. B.; ARAGÃO JR, D. P. **Benchmarking para um desempenho superior**: manual, teoria, prática. Rio de Janeiro: Alta Books, 2021.

ALVES, P. V.; DUARTE, S. M. P. **Transição energética do transporte fluvial entre Humaitá e Manicoré (AM) na perspectiva da Saúde Planetária**. Relatório de Pesquisa. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2026.

AMAZONAS (Estado). Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados e Contratados do Estado do Amazonas. **Regulamento do Serviço Público de Transporte Hidroviário Intermunicipal de Passageiros e Cargas do Estado do Amazonas**. Diário Oficial do Estado do Amazonas, Manaus, 2022.

ASSIS, L. F. Custos e tarifação no transporte fluvial de passageiros na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Transportes e Logística**, v. 5, n. 2, p. 115-132, 2018.

BELLONI, E. S. et al. Desenvolvimento de uma ferramenta de diagnóstico de manutenção para embarcações de navegação interior. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO HIDROVIÁRIO INTERIOR, 11., 2019. **Anais...** Rio de Janeiro: SOBENA, 2019.

BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 4.519/2026**. Institui o Programa Nacional de Pequenos Estaleiros Comunitários e Manutenção de Embarcações – PROESTALEIRO COMUNITÁRIO. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2026.

BRASIL. Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas. **Relatório de segurança do tráfego aquaviário**. Rio de Janeiro: DPC, 2023.

COCHRAN, W. G. **Sampling techniques**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1977.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Navegação interior no Brasil: desafios e oportunidades**. Brasília: CNT, 2022.

CRUZ BRILHANTE, J.; ROCHA PINTO, F. Preventive maintenance in an electrical river vessel system. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 6, n. 11, p. 50-56, 2019.

FARIA, L. B.; COSTA, M. A. Gestão de estoques de peças de reposição em operações de alta criticidade: uma abordagem multicritério. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 11, n. 2, p. 45-62, 2020.

FERREIRA, E. R. Saneamento nas embarcações fluviais de passageiros na Amazônia: uma análise de risco ao meio ambiente. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 501-508, 2016.

FIELD, A. **Discovering statistics using IBM SPSS statistics**. 4th ed. London: SAGE Publications, 2013.

FONTES, J. V. H. et al. Marine accidents in the Brazilian Amazon: the problems and challenges in the initiatives for their prevention focused on passenger ships. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 328, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010328>.

HENNINK, M.; KAISER, B. N. Sample sizes for saturation in qualitative research: a systematic review of empirical tests. **Social Science & Medicine**, v. 292, p. 114523, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.114523>.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

PADOVEZI, C. D. Análise dos acidentes com embarcações na região amazônica, a partir de uma atualização das estatísticas e de uma revisão dos fatores de risco. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO HIDROVIÁRIO INTERIOR, 14., 2025. **Anais...** São Paulo: SOBENA/IPT, 2025.

SAUNDERS, B. et al. Saturating the saturation: a discussion of theory and empirical saturation in qualitative and quantitative research. **Qualitative Research**, v. 18, n. 2, p. 189-207, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/1468794117733210>.

SILVA, L. G.; MACHADO, V. N.; SOARES, C. G. Análise de confiabilidade e manutenibilidade aplicada a sistemas navais. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 7, n. 2, p. 112-125, 2022.

SOUZA, A. M.; OLIVEIRA, R. S. O Custo Amazônia e a competitividade do modal hidroviário no escoamento de cargas e pessoas. **Journal of Regional Economics and Management**, v. 14, n. 1, p. 88-105, 2021.

STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. 3rd ed. Milwaukee: Quality Press, 2019.

TELLES, J. **Bíblia do RCM: manutenção centrada na confiabilidade**. Salvador: Engeteles Editora, 2019.

WIREMAN, T. **Developing performance indicators for managing maintenance**. 3rd ed. New York: Industrial Press, 2014.

ZHOU, Y. et al. Framework for detecting abnormal behaviors of passenger ships: a case study from the Yangtze River Estuary. **Ocean Engineering**, v. 325, p. 120796, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120796>.

ZOU, T. et al. Experimental performance analysis of inland vessel remote operation: a case study on the Yangtze River. **Ocean Engineering**, v. 357, p. 125512, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125512>.