

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

JONAS ANDRADE DE SOUZA

ACIDENTES DE EMBARCAÇÕES NO RIO MADEIRA E OS DESAFIOS
PARA A ENGENHARIA NAVAL REGIONAL

Manaus

2023

JONAS ANDRADE DE SOUZA

ACIDENTES DE EMBARCAÇÕES NO RIO MADEIRA E OS DESAFIOS
PARA A ENGENHARIA NAVAL REGIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, na Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas.

Orientador: Jassiel Vladimir Hernández Fontes

Manaus

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

S729aa Souza, Jonas Andrade de
Acidentes de embarcações no rio Madeira e os desafios
para a Engenharia Naval regional / Jonas Andrade de
Souza. Manaus : [s.n], 2023.
74 f.: color.; 29 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade
do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.
Inclui bibliografia
Orientador: Fontes, Jassiel Vladimir Hernández

1. Acidentes fluviais. 2. Amazônia. 3. Embarcações.
4. Rio Madeira. 5. Engenharia Naval. I. Fontes, Jassiel
Vladimir Hernández (Orient.). II. Universidade do
Estado do Amazonas. III. Acidentes de embarcações no rio
Madeira e os desafios para a Engenharia Naval regional

JONAS ANDRADE DE SOUZA

ACIDENTES DE EMBARCAÇÕES NO RIO MADEIRA E OS DESAFIOS
PARA A ENGENHARIA NAVAL REGIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito para obtenção do título de Bacharel em En-
genharia Naval, na Escola Superior de Tecnologia
da Universidade do Estado do Amazonas.

Aprovado em: 24 de agosto de 2023

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. Elvis Jhoarsy Osório Santander
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. Eduardo Rafael Barreda del Campo
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. José Ramón Hechavarría Pérez
Universidade do Estado do Amazonas

Manaus

2023

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Governo do Estado do Amazonas com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM por meio do projeto de pesquisa intitulado “Acidentes com embarcações na região amazônica: identificação de causas e alternativas de prevenção”, chamada N° 010/2021 - C, T&I Áreas Prioritárias.

Gostaria de agradecer à Deus, que me deu forças para concluir este trabalho.

Agradeço aos professores que estiveram presentes na jornada desta graduação. Especialmente ao Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes, meu orientador, que esteve presente para tirar dúvidas, orientar e comentar melhorias no trabalho sempre que precisei.

Também agradecer a minha noiva Gessica que me apoiou nos momentos que precisei. Aos meus pais que me ajudaram desde o início desta graduação.

RESUMO

Os acidentes com embarcações nos rios da Amazônia têm sido problemas marcantes ao longo dos anos, tornando necessária a busca por medidas de prevenção desse tipo de problemas. Dentre os rios da região amazônica, o rio Madeira é uma via navegável importante devido à intensa atividade de transporte de cargas e pessoas, sendo motivo de estudo. O presente trabalho propõe uma análise integrada da problemática de acidentes de embarcações que têm ocorrido em águas do rio Madeira, identificando desafios nos quais a Engenharia Naval pode contribuir. Primeiro, foi feita uma análise qualitativa dos acidentes mais comuns. Subsequentemente, foi realizada uma análise dos acidentes documentados, com base nos dados fornecidos pelos Inquéritos Administrativos sobre Acidentes e Fatos da Navegação (IAFN's) da Marinha do Brasil, entre os anos de 2018 e 2022. Logo, foram discutidos os principais desafios que a Engenharia Naval poderia ter em iniciativas de prevenção de acidentes. Finalmente, algumas alternativas de estudo e melhoramento da navegação no rio Madeira e rios similares foram propostas, considerando avanços científicos recentes. De acordo com a pesquisa, foi verificado que, nos últimos cinco anos, a natureza de acidente mais comum, documentado no rio Madeira, foi o abalroamento. O tipo de embarcação que esteve mais presente nos dados de acidentes no rio em questão foi o empurrador com balsa (comboio). Os desafios propostos estão relacionados com o transporte de sedimentos, variação do nível da água, acessibilidade e falta de sinalização. Por outro lado, as alternativas de melhora estão relacionadas com o aumento de análises batimétricas, acrescentar atividades de monitoramento e sinalização, avaliar riscos estruturais e comportamento hidrodinâmico das embarcações, e aumentar atividades de capacitação. Os dados apresentados no presente trabalho podem contribuir para planejar estratégias de prevenção de acidentes de embarcações no rio Madeira ou vias navegáveis similares.

Palavras-chave: Acidentes fluviais, Amazônia, embarcações, Engenharia Naval, IAFN, rio Madeira.

ABSTRACT

Marine accidents in rivers of the Amazon have been significant problems over the years, making it necessary to look for measures to prevent this type of problems. Among the rivers of the Amazon region, the Madeira River is an important waterway due to the intense activity of transporting cargo and people, being the subject of study. The present work proposes an integrated analysis of the problem of marine accidents that have occurred in the Madeira River, identifying challenges in which Naval Engineering can contribute. First, a qualitative analysis of the most common accidents was carried out. Subsequently, an analysis of documented accidents was carried out, based on data provided by the Administrative Inquiries on Accidents and Navigation Facts (IAFN's) of the Brazilian Navy, between the years 2018 and 2022. Then, main challenges that Naval Engineering could take on accident prevention initiatives were discussed. Finally, some alternatives for studying and improving navigation on the Madeira River and similar rivers were proposed, considering recent scientific advances. According to the research, it was verified that, in the last five years, the most common type of accident, documented in the Madeira River, was collision. The type of vessel that was most present in the accident data on the river in question was the pusher-barge system. The proposed challenges are related to sediment transport, water level variation, accessibility, and lack of monitoring and signalization. On the other hand, the alternatives for improvement are related to enhancing bathymetric analysis, increasing monitoring and signalization initiatives, assessing structural risks and hydrodynamic behaviour of vessels, and encouraging training activities. The data presented in the present work can contribute to plan strategies in the prevention of marine accidents in the Madeira River or similar waterways.

Keywords: River accidents, Amazon, vessels, IAFN, Madeira River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Bacia Amazônica com a localização do rio Madeira dentro do território brasileiro. Imagem utilizada sob a licença Creative Commons CC. (b) Visão geral do Rio Madeira. Imagem (a) e (b) utilizadas sob a licença Creative Commons CC BY-SA 3.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/) e CC BY-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), respectivamente.	15
Figura 2. Ilustrações representativas do rio Madeira. (a) Terminal hidroviário o Cai na água em Porto Velho, Roraima. (b) Comboio balsa-empurrador navegando no Rio Madeira. (c) Ponte do Abunã que atravessa o rio Madeira, localizada no Porto Velho/Rondônia. A Figura (a) foi usada sob a licença Creative Commons CC BY-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). As figuras (b) e (c) estão disponíveis no domínio público.	16
Figura 3. Etapas consideradas para desenvolver o presente estudo.	26
Figura 4. Embarcações de passageiros e mistas que operam na região amazônica e possivelmente também no rio Madeira. (a) Gaiola/recreio. (b) Ferryboat. (c) Embarcação de alta velocidade Expresso. (d) Embarcação menor motorizada (exemplo de lancha escolar)...	28
Figura 5. Comboio de empurrador com um sistema de seis barcaças operando no rio Madeira.	29
Figura 6. Tipos de rebocadores classificados de acordo com a propulsão e localização dos propulsores.	30
Figura 7. Bombeiros fazem busca por família que desapareceu no rio Madeira, em Nova Olinda do Norte (AM).	31
Figura 8. Rebocador afundando após balsa do comboio colidir com um banco de areia no rio Madeira, em Porto Velho.	32
Figura 9. Exemplo de rebocador de uso típico em atividades de transporte aquaviário regional, o qual naufragou no rio Madeira.	32
Figura 10. Bombeiros fazem buscas por vítimas no rio Madeira.	33

Figura 11. Imagens ilustrativas de uma balsa de carga de alimentos que virou no rio Madeira após colisão com pedral.....	34
Figura 12. Acidente de uma carreta que deslizou ao tentar embarcar em balsa no rio Madeira.	35
Figura 13. Total de acidentes obtidos dos relatórios IAFN's, classificados por natureza, com embarcações no Brasil durante o período de 2018 a 2022.	37
Figura 14. Total de acidentes com embarcações no rio Madeira classificados por ano, no período de 2018 a 2022.....	39
Figura 15. Acidentes com embarcações no rio Madeira durante o período de 2018 a 2022, classificados segundo a sua natureza.....	39
Figura 16. Acidentes com embarcações no rio Madeira durante o período de 2018 a 2022, classificados segundo o tipo de embarcação.	40
Figura 17. Acidentes com embarcações do tipo empurrador com balsa (comboio) no rio Madeira durante o período de 2018 a 2022, classificados por natureza do acidente.....	41
Figura 18. Alguns desafios no rio Madeira a serem considerados pela Engenharia Naval para planejar iniciativas de prevenção de acidentes com embarcações. Imagens de livre acesso obtidas com o gerenciador de imagens online do Microsoft Office Word.....	43
Figura 19. Mapa de localização da localização da bacia hidrográfica do rio Madeira, incluindo o município de Manicoré.....	44
Figura 20. Exemplo de sinuosidades no rio Madeira, considerando o trecho Porto Velho – Calama.	45
Figura 21. Problema de aparecimento de ilhas ou bancos de areia durante a seca na região amazônica. (a) Exemplo de banco de areia formado durante a temporada da seca no rio Madeira; na localidade de Terra Firme (Calama). (b) Exemplo de banco de embarcação de transporte de passageiros navegando perto de um banco de areia que não existia durante a época de cheia. Imagens utilizadas sob a licença Creative Commons CC BY-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).....	46

Figura 22. Exemplo de problema de acessibilidade para o embarque de pessoas e carga nos distritos do rio Madeira. (a) Foto da entrada ao distrito de Demarcação. (b) Exemplo de embarcações de ribeirinhos atracadas em estacas, e carregando produtos em um barranco, na localidade de Cavalcante, distrito de São Carlos, no rio Madeira.	47
Figura 23. Alternativas para prevenir acidentes com embarcações no rio Madeira, considerando a interação com a Engenharia Naval.	49
Figura 24. Exemplos de dispositivos usados em embarcações para realizar levantamentos batimétricos na região amazônica. (a) ADP modelo ADP-RiverSurveyor-M9. (b) DGPS instalado em uma embarcação.	50
Figura 25. Exemplo da possível variação de calado com a velocidade de avanço durante um levantamento batimétrico, influenciando possivelmente a medição do ecobatímetro, segundo a pesquisa de Barbosa et al. (2005). (a) Calado para diversas velocidades. (b) Modelo de correção da medição da profundidade em função da velocidade da embarcação, proposto para o caso específico da pesquisa de Barbosa et al. (2005).	51
Figura 26. Levantamento batimétrico feito no rio Madeira por Barbosa et al., (2013). (a) Região de estudo. (b) Definição de seções transversais (ST's). (c) Exemplo de perfil transversal do rio na ST3. (d) Mapa batimétrico obtido para a área de estudo.	52
Figura 27. Levantamento feito para atualizar os dados de carta náutica existente no Rio Tapajós, Pará. (a) Carta náutica disponível antes do levantamento. (b) Comparação dos dados anteriores com os recentes. Imagem utilizada sob a licença Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).	53
Figura 28. Exemplo de análise de imagens aéreas para mapeamento batimétrico. (a) Foto aérea do rio. (b) Resultado do mapa de agrupamento por regiões caracterizadas (cluster map). Imagem usada sob a licença Creative Commons CC-BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).	54
Figura 29. Exemplo de veículo não tripulado para fazer batimetrias. (a) Protótipo em operação. (b) Região de estudo. (c) Trajetórias seguidas durante a operação. (d) Detalhes das trajetórias.	55

Figura 30. Exemplo de embarcação de superfície não tripulada que pode ser utilizada para realizar levantamentos batimétricos de maneira remota.....	56
Figura 31. O sistema de mapeamento batimétrico “Bathy-drone”. (a) Foto do drone rebocando o veículo de superfície. (b) Detalhes do veículo de superfície. (c) Regiões de profundidade interpoladas. (c) Linhas de contorno obtidas. Imagens usadas sob a licença Creative Commons CC-BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).....	57
Figura 32. Alguns exemplos de boias inteligentes publicados recentemente na literatura científica. (a) Fases de instalação e ancoragem de uma boia chamada INBUS-2 para monitoramento costeiro. (b) Exemplo de boia de baixo custo com sistema de inteligência artificial para monitoramento de sistemas de aquicultura. Imagens usadas sob licença Creative Commons CC BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).....	59
Figura 33. Diagrama mostrando os principais desafios de engenharia correspondentes a vários sistemas de energia em bóias. Imagem usada sob licença Creative Commons CC BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).....	60
Figura 34. Tipos de simulações estruturais que podem ser realizadas com o Método dos Elementos Finitos para avaliar o problema de colisão, incluindo os efeitos do encalhe na embarcação. Figuras usadas sob a licença Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).....	61
Figura 35. Exemplo de análise do problema de encalhe usando simulação pelo Método de Elementos Finitos. Imagens usadas a partir de um documento de livre acesso no domínio público.	62
Figura 36. Exemplo de análise estrutural para avaliar os efeitos estruturais causada pela colisão de uma embarcação com uma rocha e um banco de areia. Imagens utilizadas sob licença Creative Commons CC BY-NC-ND (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)...	63
Figura 37. Exemplo do campo de pressão (P) gerado quando duas embarcações se aproximam (resultados de uma simulação de fluidodinâmica computacional).....	64
Figura 38. Exemplo de estudo hidrodinâmico do trem de ondas gerado quando um comboio navega em águas restritas. No estudo foi avaliada a influência da variação da boca do canal na geração de ondas. Imagem usada sob licença Creative Commons.....	65

Figura 39. Imagens dos experimentos feitos em uma embarcação Ro-Pax para avaliar os efeitos de inundação de espaços internos nos movimentos. Imagens usadas sob a licença Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).....66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns acidentes de embarcações no rio Madeira noticiados por mídias locais.	36
Tabela 2. Percentual da natureza de acidentes marítimos registrados no Brasil de 2018 a 2022.	38
Tabela 3. Percentual do total de acidentes com embarcações no rio Madeira no período de 2018 a 2022, classificados por tipo de embarcação.....	41
Tabela 4. Comparativo do número de acidentes de navegação no Rio Madeira com o Brasil entre os anos de 2018 e 2022.....	42

SUMÁRIO

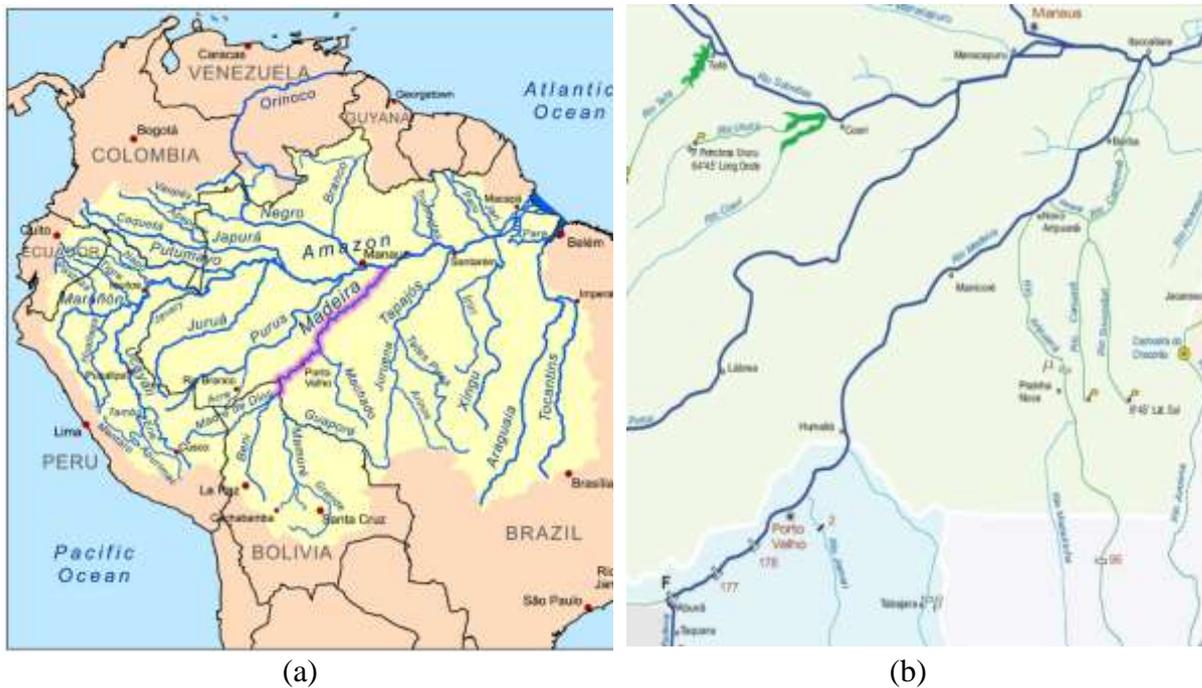
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Descrição do problema	15
1.2. Revisão bibliográfica	18
1.3. Justificativa	21
1.4. Objetivos	21
1.4.1. Objetivo geral	21
1.4.2. Objetivos específicos	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1. Acidentes de embarcações comuns no rio Madeira e na região amazônica	22
2.2. Normativas regionais	23
2.2.1. Inquéritos Administrativos e Fatos De Navegação	24
3. METODOLOGIA	26
4. REVISÃO QUALITATIVA DE ACIDENTES COM EMBARCAÇÕES NO RIO MADEIRA	28
4.1. Alguns tipos de embarcações regionais que podem navegar no rio Madeira	28
4.2. Revisão de exemplos de acidentes com embarcações no rio Madeira.....	31
5. RESULTADOS DA ANÁLISE QUANTITATIVA	37
5.1. Resultados no Brasil em geral	37
5.2. Resultados de acidentes no rio Madeira.....	38
5.3. Discussão sobre os resultados quantitativos	42
6. ALGUNS DESAFIOS A SEREM CONSIDERADOS PELA ENGENHARIA NAVAL	43
6.1. Transporte de sedimentos e turbidez	44
6.2. Variação do nível da água (possibilidade de encalhe)	45
6.3. Acessibilidade	46
6.4. Falta de sinalização	47
7. ALTERNATIVAS DE ESTUDO E PREVENÇÃO	49
7.1. Melhorar análises batimétricas	49
7.2. Aumentar monitoramento e sinalização	58
7.3. Avaliação de riscos estruturais.....	61
7.4. Avaliação da hidrodinâmica de embarcações	64
7.5. Acrescentar atividades de capacitação.....	66
7.6. Sugestões para implementação	66
8. CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

1.1. Descrição do problema

A bacia amazônica (Figura 1a) possui um dos maiores sistemas de rios do mundo, sendo muitos deles utilizados para o transporte cotidiano de cargas e passageiros. Dentre eles, cabe mencionar o rio Madeira (Figura 1b), que é o 17º maior rio do mundo em extensão, com cerca de 3.240 km de comprimento (IBGE, 2023). O Rio Madeira é um dos afluentes do rio Amazonas e banha dois estados, Rondônia e Amazonas, sendo muito importante para a economia da região. O rio é navegável durante todo o ano, permitindo o tráfego de comboios de barcaças de carga com até 18 mil toneladas. A hidrovia do Madeira é uma das mais importantes vias de transporte localizadas no chamado Corredor Logístico Norte, sendo considerada como a segunda hidrovia mais importante do Norte, atrás apenas da hidrovia do Amazonas (DNIT, 2021).

Figura 1. (a) Bacia Amazônica com a localização do rio Madeira dentro do território brasileiro. Imagem utilizada sob a licença Creative Commons CC. (b) Visão geral do Rio Madeira. Imagem (a) e (b) utilizadas sob a licença Creative Commons CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>) e CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), respectivamente.



Fonte: (a) Knusser (2008). (b) Lopes et al. (2018).

O rio Madeira é muito importante para deslocamentos de mercadorias e pessoas na região, sendo essencial para o desenvolvimento econômico da região amazônica. As Figuras 2a e 2b apresenta algumas das embarcações mais utilizadas no rio Madeira. A Figura 2a mostra embarcações diversas no terminal hidroviário do Cai N'água em Porto Velho, Roraima. Dentre essas embarcações é possível observar uma embarcação de carga e passageiros do tipo

gaiola/recreio, para transporte e passeio pelas águas do rio Madeira. Também, é possível observar embarcações menores de alta velocidade, de passageiros, e algumas embarcações utilizadas pela Marinha do Brasil. Por outro lado, a Figura 2b mostra outro tipo de embarcação muito comum na região, a qual consiste em um comboio (sistema de balsas de carga empurradas por um rebocador) navegando pelas águas do rio Madeira. Na Figura 2c podemos ver a ponte do Abunã, localizada em Porto Velho, atravessando este importante rio.

Figura 2. Ilustrações representativas do rio Madeira. (a) Terminal hidroviário o Cai na água em Porto Velho, Roraima. (b) Comboio balsa-empurrador navegando no Rio Madeira. (c) Ponte do Abunã que atravessa o rio Madeira, localizada no Porto Velho/Rondônia. A Figura (a) foi usada sob a licença Creative Commons CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). As figuras (b) e (c) estão disponíveis no domínio público.



(a)



(b)



(c)

Fonte: (a) e (b) Lopes et al. (2018); (c) Acre (2021).

Segundo Luz (2017), no cenário mundial, o transporte marítimo se apresenta como a única alternativa economicamente viável para o transporte de grandes quantidades de mercadorias entre países e diferentes continentes. Essa característica pode ser considerada

também na região Norte do Brasil, onde existe uma escassez de rodovias, sendo os rios as principais vias de transporte entre cidades amazônicas, utilizando embarcações. Luz (2017) também salienta que o aumento do PIB mundial, juntamente com a globalização dos mercados consumidores, motiva a construção de navios maiores e em maior quantidade, visto que são eles que transportam cerca de 95% de todo o PIB comercializado no mundo.

A pesquisa das causas e motivos de acidentes marítimos e fluviais, desperta o interesse dos envolvidos na área naval, tendo em vista que entender as causas desses acidentes, é algo importante tanto pelo fator humano (evitar feridos e óbitos), quanto pelo fator financeiro, já que acidentes em sua grande maioria geram prejuízos, incluindo perda de carga, danificação nas embarcações, danos ambientais etc.

A região amazônica possui vários rios extensos e com grande volume de água e possui extensas florestas densas. Essas características fazem com que, ao longo do tempo, as viagens e de pessoas e transporte de cargas sejam realizados por embarcações de diversos tamanhos. A Amazônia possui milhares de embarcações, de tipos e tamanhos variados, sendo construídas de materiais diferentes e operando em igarapés, zonas de difícil de acesso e pelos principais rios da região.

Segundo o Caderno de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Recursos Hídricos – ANA (ANA, 2023), os sistemas de navegação na Amazônia brasileira podem ser classificados de acordo com a capacidade de carga e as características de navegabilidade como: embarcações rústicas, de linha, comboios de balsas, comboios com tecnologia avançada, navios. Segundo esse caderno, os rios da Rede Hidroviária Brasileira apresentam condições distintas de navegabilidade (MORGADO; PORTUGAL; MELLO, 2013), incluindo diferenças no calado, largura e os raios de curvatura dos rios; a presença de corredeiras, cachoeiras, eclusas e barragens; bem como as variações relacionadas com o ciclo hidrológico (época de cheia e seca).

Na região, há muitas de embarcações que, devido a deficiência de aplicação de conceitos técnicos nos seus projetos ou há falta de vistorias e certificação, possuem problemas de segurança durante a navegação. Também, existem problemas de estabilidade operacional gerada pela mistura, em um mesmo convés, de cargas e passageiros colocados sem procedimentos de distribuição de pesos, sendo comum a utilização de conveses altos para transporte de cargas e passageiros (FONTES et al., 2023a; MAIA et al., 2023).

Existe a necessidade de contribuir com pesquisas que contribuam na prevenção de acidentes de embarcações em vias navegáveis da Amazônia, seja para planejar alternativas de prevenção em políticas públicas, ou para melhorar aplicações da Engenharia Naval. Para contribuir com essa necessidade, o presente trabalho apresenta um estudo integrado do

problema de acidentes com embarcações que têm acontecido no rio Madeira, considerado como um caso de estudo relevante na região amazônica.

1.2. Revisão bibliográfica

A navegação nos rios da região amazônica, incluindo a que é realizada no rio Madeira, é alvo de interesse na indústria e na Academia, devido à relevância nas atividades comerciais que acontecem na região norte do Brasil. Diariamente, navegam pelo rio Madeira balsas de carga e embarcações mistas (de carga e passageiros). Diversos itens são transportados, incluindo cimento, combustíveis, fertilizantes, alimentos perecíveis e não perecíveis, milho, contêiners, automóveis, eletrônicos e cargas gerais (PORTOSENÁVIOS, 2015).

Vários estudos regionais têm sido feitos relacionados com diversas atividades no rio Madeira. Por exemplo, Doria et al. (2012) pesquisaram aspectos relacionados com a pesca comercial na bacia do rio Madeira, no estado de Rondônia (Guajará-Mirim e Porto Velho). A maior parte da pesca desenvolvida na região é do tipo artesanal de pequena escala, sendo utilizadas, em sua maioria, embarcações do tipo canoas motorizadas e barcos pesqueiros. Fearnside (2014) discutiu a influência das barragens e as inundações que têm acontecido no rio Madeira. Subsequentemente, Adamy (2016) apresentou aspectos relevantes da dinâmica fluvial desse rio, incluindo a sua variabilidade altimétrica, a hidrografia, a morfologia fluvial, a ação erosiva nas margens dos rios, o escorregamento dos taludes fluviais por efeito da pressão hidrostática, efeitos do câmbio climático, entre outros aspectos.

Pinto et al. (2016) escreveram um trabalho no qual destacaram a importância da Amazônia para o planeta, estabelecendo a relação do meio ambiente com a segurança. Foi concluído que a Amazônia está passando por um processo de interesse internacional no sentido de garantir a criação de políticas ambientais regionais, por meio de cooperação internacional, dirigidas à preservação e ao planejamento estratégico para garantir a segurança ambiental e sustentabilidade das florestas tropicais do planeta. Cabe mencionar que a indústria naval da região tem grande interesse nessas questões, visto que o uso de embarcações e outras estruturas navais na região poderia ser influenciada por essas políticas. Desde uma perspectiva interdisciplinar, pesquisas relacionadas com estudos de arqueologia também têm tido relevância no rio Madeira, como os desenvolvidos por Zuse et al (2020) e Almeida e Mongeló (2020).

Por outro lado, estudos relacionados com a prevenção de desastres tecnológicos na região amazônica, onde se inclui a prevenção de acidentes com embarcações, também sido feito ao longo dos anos. Parente e Szlafstein (2022) salientaram a importância de monitorar os riscos

de desastres tecnológicos na região amazônica, com a finalidade de propor ações de governança e planejar políticas públicas. A prevenção de acidentes pode contribuir nesse objetivo, como definido por Fontes et al. (2023c).

Padovezi (2012) realizou um trabalho de pesquisa que visou avaliar os riscos do transporte fluvial de passageiros na região amazônica, discutindo o grau de risco das avarias de acordo com o material da embarcação. Esse trabalho ainda proporciona informações relevantes relacionadas com a problemática de acidentes regionais.

Padovezi (2019) estudou a segurança operacional de comboios fluviais. Segundo ele, esses sistemas flutuantes são um meio de transporte fluvial de grande eficiência para certos tipos de cargas como graneis e contêineres. No entanto, bastante cuidado deve ser tomado com relação à segurança operacional do comboio, já que este consiste em várias embarcações interagindo constantemente: um empurrador e um conjunto de barcaças ligados um ao outro. O autor menciona que aspectos relacionados com a segurança de navegação devem ser considerados de maneira diferente de um navio tradicional. Com relação ao empurrador navegando isolado (“escoteiro”), a minimização dos riscos requer de algumas ações, tais como o projeto de empurrador com a maior boca possível; avaliação da superfície livre dos tanques de lastros e combustíveis; restrição de aceleração dos motores; restrição de ângulo de lemes; e atenção da navegação em condições ambientais adversas (com ondas e ventos intensos, principalmente).

Outra situação que Padovezi (2019) descreve é quando o empurrador é acoplado a um conjunto de barcaças, em comboio. Nessa situação, a preocupação deve ser com a qualidade e o fator de segurança das amarras de acoplamento. Elas devem ser capazes de suportar possíveis esforços dinâmicos que possam acontecer em caso de uma colisão do comboio. Já em situações de navegação em que o risco de colisão é relativamente alto (incluindo velocidades altas de correntes, larguras estreitas da via etc.), uma forma eficaz de reduzir o risco de ruptura das amarras entre empurrador e as barcaças consiste em fazer com que o empurrador se encaixe em parte do conjunto de barcaças, deslocando a linha de barcaças onde o empurrador está alinhado.

Mais recentemente, Aziz et al. (2022a) apresentaram os principais tipos de acidentes que têm ocorrido na região amazônica por meio de uma publicação nacional, destacando-se os acidentes de colisão, encalhe, explosão/fogo, naufrágio e derramamento de óleos. Nesse trabalho, também foram descritos alguns dos principais métodos numéricos e experimentais utilizados atualmente para pesquisar esses problemas, ressaltando a necessidade de avaliar aspectos estruturais e hidrodinâmicos usando ferramentas de simulação computacional.

Numa pesquisa posterior, Aziz et al. (2022b) apresentaram os principais usos das tecnologias da indústria 4.0 para prevenir acidentes com embarcações, discutindo a problemática da região amazônica. Na pesquisa, foi exemplificado o uso de tecnologias como realidade aumentada, internet das coisas, computação em nuvem, e sistemas ciberfísicos, mostrando vários exemplos de uso.

Alunos e pesquisadores do curso de Engenharia Naval da Universidade do Estado do Amazonas apresentaram a problemática de acidentes fluviais de embarcações na região amazônica por meio de uma publicação internacional em Fontes et al. (2023a), descrevendo os desafios que enfrentam as iniciativas para a sua prevenção. Nessa pesquisa foram consideradas os três principais tipos de embarcações de transporte de pessoas e cargas regionais, conhecidas como *gaiola/recreio*, *ferryboat* e expresso. Além de descrever detalhes dessas modalidades de transporte, os autores discutiram os principais desafios que precisam ser considerados para prevenir acidentes na região. Dentre eles, cabe mencionar a proteção ao meio ambiente, fauna flutuante, variação da geometria dos rios, falta de sinalização e fiscalização, dentre outros fatores. A pesquisa também apresentou as principais normativas aplicáveis para monitorar as atividades navais na região amazônica e propôs os principais avanços científicos para prevenir riscos de acidentes com embarcações de passageiros. Recomenda-se, por exemplo, a avaliação do comportamento de embarcações sob diversas condições ambientais (numérica e experimentalmente), bem como incentivar a participação da indústria e academia na melhora de problemas associados com atividades de navegação.

É sabido que a região amazônica enfrenta a necessidade de conhecer mais as características dos seus rios, pelo que Fontes et al. (2023b) publicaram uma pesquisa relacionada com os principais tipos de veículos subaquáticos não tripulados que poderiam ser implementados no futuro para realizar atividades de inspeção e monitoramento das hidrovias na Amazônia (e.g., análise da variação da profundidade), contribuindo com a prevenção de acidentes regionais.

Finalmente, Fontes et al (2023c) pesquisaram os possíveis impactos no meio ambiente aquático da região amazônica que poderiam acontecer devido a diversos tipos de acidentes com embarcações. Foi concluído que acidentes que envolvem o afundamento total ou parcial de embarcações, bem como explosões que afetam a segurança da estrutura e das cargas, podem liberar substâncias tóxicas e oleosas que podem afetar significativamente o ecossistema aquático. Visa-se necessário acrescentar a pesquisa relacionada com a prevenção de acidentes na região amazônica, visando preservar o futuro sustentável da região.

1.3. Justificativa

Embora existam diversos trabalhos de pesquisa relacionados a estudos de acidentes navais ao redor do mundo, não são encontrados muitos trabalhos que discutam essa problemática em regiões muito transitadas na região amazônica, como no rio Madeira. A importância do rio em questão para o desenvolvimento comercial da região é significativa, de tal modo que é necessário acrescentar os estudos relacionados com a identificação de desafios e de alternativas que permitam melhorar as atividades da indústria naval. Por esse motivo, o presente trabalho visa contribuir no entendimento da problemática de acidentes de embarcações nessa via navegável, assim como nos desafios que tem a Engenharia Naval para prevenir acidentes de embarcações nesse rio e em regiões similares.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo geral

Estudar a problemática de acidentes com embarcações no rio Madeira, na região amazônica, identificando possíveis principais desafios que tem a Engenharia Naval e propondo algumas alternativas para solucioná-los.

1.4.2. Objetivos específicos

- Revisar, apresentar e discutir o problema de acidentes com embarcações no rio Madeira, na região amazônica, incluindo os tipos de embarcações envolvidas e os acidentes comuns.

- Realizar uma análise quantitativa dos dados de acidentes no rio Madeira entre os anos de 2018 e 2022, a partir de relatórios técnicos dos Inquéritos Administrativos sobre acidentes e Fatos de Navegação (IAFNs), proporcionados anualmente pela Marinha do Brasil.

- Discutir os desafios significantes que pode enfrentar a Engenharia Naval para melhorar as atividades de navegação no rio Madeira, contribuindo com a redução de acidentes navais.

- Apresentar algumas soluções relevantes para reduzir o risco de acidentes no rio Madeira e regiões similares, discutindo alternativas propostas em avanços científicos recentes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Acidentes de embarcações comuns no rio Madeira e na região amazônica

Segundo as definições da Marinha do Brasil, acidente marítimo (considerado neste trabalho como acidente fluvial) pode ser descrito como um acontecimento ou sequência de acontecimentos, que resulte no óbito de uma pessoa, ou ferimentos graves nela, a perda de um passageiro de uma embarcação, a perda ou abandono de um navio, danos materiais a uma embarcação, o encalhe ou colisão de um navio, um dano material à infraestrutura marítima estranha a um navio, que possa colocar seriamente em perigo a segurança do navio, de um outro navio ou de uma pessoa, ou danos graves ao meio ambiente, ou a possibilidade de danos graves ao meio ambiente, provocados pelos danos causados a um navio ou a navios.

Acidente marítimo muito grave: significa um acidente marítimo envolvendo a perda total do navio ou óbito de pessoa, ou danos graves ao meio ambiente (MARINHA-DO-BRASIL, 2023).

Incidente marítimo: é um acontecimento, ou sequência de acontecimentos, que não um acidente marítimo, que tenha ocorrido diretamente em relação à operação de um navio e que tenha colocado em perigo ou, que se não for corrigido, pode colocar em perigo a segurança do navio, dos seus ocupantes, de qualquer pessoa ou o meio ambiente (MARINHA-DO-BRASIL, 2023).

Ao serem consultados os relatórios da Marinha do Brasil (IAFNs), constataram-se as seguintes naturezas de acidentes comuns: Abalroamento, naufrágio, queda de pessoa na água, colisão, encalhe, explosão, incêndio etc.

De maneira sucinta, o abalroamento é o choque entre dois ou mais navios. Abalroação ou abalroamento: choque mecânico entre embarcações ou seus pertences e acessórios (MARINHA-DO-BRASIL, 2023). Outra definição de abalroação é o choque entre dois navios ou embarcações, que navegam, ou estão em condições de navegar, dentro fora dos portos (DE MATTOS, 1955).

O acidente marítimo/naval em que um navio/embarcação colide com um alvo móvel é chamado de abalroamento. Neste caso não importa onde seja a colisão.

O afundamento de uma embarcação que sofreu algum acidente é chamado de naufrágio.

Naufrágio: afundamento total ou parcial da embarcação por perda de flutuabilidade, decorrente de embarque de água em seus espaços internos devido a adernamento, emborcamento ou alagamento (MARINHA-DO-BRASIL, 2023).

A queda de pessoas na água é um acidente perigoso para a vida humana, este tipo de evento ocorre em algumas vezes por falta de atenção dos passageiros ou tripulantes e outras vezes em consequência de outros acidentes.

A colisão é um choque mecânico entre a embarcação e/ou seus apêndices ou acessórios, contra algum outro objeto que não seja outra embarcação ou, então, contra uma pessoa (banhista, mergulhador etc.). Assim, haverá colisão se a embarcação se chocar com um corpo fixo ou flutuante insusceptível de navegar ou manobrar, tal como: recife, cais, casco soçobrado, boia, cabo submarino etc. (MARINHA-DO-BRASIL, 2023).

Encalhe: o encalhe acontece quando a embarcação atinge o fundo de um corpo d'água ou lado do rio. O acidente encalhe tem grande relevância, tendo em vista que isso pode levar à perda de operação da embarcação. O impacto do casco com o fundo da via navegável pode causar fraturas no mesmo. Essas fraturas podem gerar desastres ambientais devido a vazamentos de substâncias químicas nocivas ao meio ambiente.

Definições alternativas de acidentes com embarcações regionais podem ser encontradas com maior detalhe nas Normas da Autoridade Marítima Brasileira (NORMAMs) e nos trabalhos de Padovezi (2012), Aziz et al. (2022a), e Fontes et al. (2023a).

2.2. Normativas regionais

A NORMAN/02 (MARINHA-DO-BRASIL, 2023) são normas da autoridade marítima brasileira (marinha do Brasil), para embarcações empregadas na navegação interior.

Tendo em vista que o abalroamento vem sendo a maior causa de acidentes navais, na hidrovia do rio Madeira, uma forma de evitar tais acidentes é seguir as recomendações da NORMAN/02, mais especificamente capítulo 11. Este capítulo trata de regras especiais para evitar abalroamento na navegação interior.

Tais regras são complementares a RIPEAM-72 (DPC, 1972), que é o Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar. Essas regras são importantes para evitar abalroamento.

Toda embarcação deverá manter, permanentemente, vigilância apropriada, visual e auditiva, bem como, através de todos os meios apropriados às circunstâncias e condições predominantes, a fim de obter inteira apreciação da situação e do risco de colisão. (DPC, 1972)

Segundo (DPC, 1972), toda embarcação deverá navegar a uma velocidade que lhe possibilite evitar colisões. Fatores importantes para determinar a velocidade de segurança: o grau de visibilidade, a densidade do tráfego, a capacidade de manobra da embarcação, presença de luzes a noite, estado do vento, o calado da embarcação, dentre outros.

Aos fatores para determinar a velocidade de segurança a NORMAN/02 acrescenta que toda embarcação deverá navegar com velocidade apropriada quando cruzar com embarcações pequenas, e comboios (rebocando/empurrando), e quando se aproximar de embarcações atracadas.

De acordo com a NORMAN/02, uma embarcação com propulsão mecânica, navegando a favor da corrente, terá preferência de passagem ao cruzar com uma embarcação navegando contra a corrente. A embarcação que tem a preferência, deverá se comunicar através de apito. Caso esteja guinando para boreste: um apito curto. Se estiver guinando para bombordo: dois apitos curtos. E três apitos curtos, caso esteja dando a ré.

Referente a ultrapassagem, (DPC, 1972) afirma que caso uma embarcação esteja ultrapassando, ela deverá permanecer fora do caminho da embarcação que está sendo ou foi ultrapassada. Sobre este assunto, a NORMAN/02 acrescenta que só poderá haver ultrapassagem em vãos de pontes, caso o canal tenha largura compatível para passagem simultânea.

Quando duas embarcações com propulsão mecânica estiverem se aproximando uma da outra, em sentidos opostos, cada uma deverá guinar para boreste. Lembrando que em caso de navegação interior, a embarcação a favor da corrente, tem preferência.

As luzes de uma embarcação, também é um fator determinante quando se trata de evitar acidentes navais, como o abalroamento. A intensidade das luzes em uma embarcação deve seguir a fórmula descrita na (DPC, 1972).

2.2.1. Inquéritos Administrativos e Fatos De Navegação

A NORMAM 09 (MARINHA-DO-BRASIL, 2023) apresenta as características das Normas da Autoridade Marítima para Inquéritos Administrativos sobre Acidentes e Fatos da Navegação (IAFN) e para Investigação de Segurança dos Acidentes e Incidentes Marítimos (ISAIM).

O propósito da autoridade marítima em caso de acidentes é definir regras para instauração de inquérito administrativo e fatos de navegação e sua tramitação, até o tribunal marítimo.

Respeitando-se os regimes jurídicos previstos para o Mar Territorial, Zona Contígua, Zona Econômica Exclusiva e Plataforma Continental, as embarcações mercantes e de esporte e recreio de qualquer nacionalidade, em águas jurisdicionais brasileiras, estão sujeitas as normas da NORMAM 09 que trata da instauração dos IAFNs, assim como toda pessoa física ou jurídica,

envolvida em qualquer atividade naval. Segundo a NORMAN 09, a instauração de IAFN, é feita da seguinte maneira:

Quando se chegar ao conhecimento de algum agente da autoridade marítima o acontecimento de um acidente, deverá ser instaurado o IAFN, que poderá ser realizado apenas pelas Capitânicas e Delegacias. O IAFN pode ser instaurado até 5 dias após o agente ter tomado conhecimento do acidente, e deverá ser concluído em até 90 dias. Ao se concluir o inquérito, ele será levado ao tribunal marítimo.

Este trabalho pretende verificar quais tipos de embarcações mais se envolvem em acidentes na região do rio Madeira, assim como qual natureza de acidente é mais frequente na mesma. Por tanto, serão consultados os relatórios IAFNs disponibilizados pela Marinha do Brasil nos últimos cinco anos.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando diversas técnicas de análise científica, baseadas principalmente em revisão bibliográfica e análises estatísticas relacionados com acidentes de embarcações e procedimentos para o seu estudo e prevenção.

A pesquisa realizada foi dividida em quatro etapas, como mostrado na Figura 3: revisão qualitativa de acidentes (Etapa 1), análise quantitativa de acidentes (Etapa 2), desafios encontrados na navegação do rio Madeira que devem ser considerados pela Engenharia Naval (Etapa 3) e proposta de alternativas para realizar análises que ajudem no planejamento de ações para prevenir acidentes (Etapa 4).

Figura 3. Etapas consideradas para desenvolver o presente estudo.



Fonte: O autor.

Primeiramente, na Etapa 1 foi feito um levantamento em diversas fontes de informação, incluindo artigos, revistas e notícias postadas na internet, para verificar quais tipos de acidentes com embarcações são os mais comuns no rio Madeira. Dentre as fontes consultadas podem se mencionar notícias em sites e blogs regionais que divulgam o dia a dia de acidentes na região amazônica.

A Etapa 2 considerou uma análise quantitativa realizada com as informações documentadas em relatórios publicados pela Marina do Brasil. Foram utilizados os Inquéritos Administrativos sobre Acidentes e Fatos de Navegação (IAFN's), como base para estatística de

acidentes com embarcações no rio Madeira. Os documentos utilizados são referentes aos anos de 2018 a 2022. Cabe mencionar que os relatórios de IAFN's são atualizados anualmente pela Marinha do Brasil (MARINHA-DO-BRASIL, 2021a). Com os arquivos dos relatórios em PDF, encontrados no site da Marinha do Brasil, foi feito um filtro de quais acidentes ocorreram no rio Madeira, classificando-os por Natureza do acidente e tipo de embarcação envolvida. Os dados foram analisados utilizando o software Microsoft Excel, o qual também foi usado para realizar análises estatísticas dos acidentes, elaborados gráficos comparativos para uma melhor compreensão.

Na Etapa 3, foi necessário identificar desafios para prevenir acidentes no rio Madeira. Para esta etapa foi consultada a literatura científica relacionada com diversos trabalhos que têm sido feitos no rio Madeira. Foi possível encontrar literatura relacionada com aspectos ambientais e variações das características hidrológicas dele. A maior parte das referências utilizadas foram encontradas em literatura científica em português. Com essas fontes, foram feitos resumos para discutir os desafios encontrados baseados nos objetivos do presente trabalho.

Por fim, na Etapa 4 foram propostas algumas alternativas de pesquisa técnica e científica que poderiam ser consideradas em próximos estudos para contribuir com a redução de acidentes no rio Madeira e vias navegáveis similares. Para fazer esta etapa da pesquisa, foram consultadas bases de dados científicas a nível internacional, procurando imagens de livre acesso para poder ilustrar os conceitos apresentados. As fontes obtidas foram traduzidas ao português, e as informações resultantes foram sintetizadas para apresentar uma discussão organizada.

4. REVISÃO QUALITATIVA DE ACIDENTES COM EMBARCAÇÕES NO RIO MADEIRA

4.1. Alguns tipos de embarcações regionais que podem navegar no rio Madeira

O problema de acidentes com embarcações de passageiros na região amazônica tem sido bem documentado previamente na literatura, principalmente no trabalho de Fontes et al. (2023a). Porém, é importante apresentar alguns tipos de embarcações envolvidos comumente em acidentes no rio Madeira. Dentre as embarcações que têm tido a maior ocorrência de acidentes nessa hidrovia, segundo as IAFN's, é possível mencionar as embarcações de passageiros e as embarcações de carga do tipo comboio, compostos por um rebocador empurrador e um sistema de balsas.

Embarcações de passageiros transporte de longo percurso podem transportar pessoas e cargas pesadas (e.g., eletrônicos, carros, motos etc.), sendo conhecidas como Gaiolas/recreios (Figura 4a) e ferryboats (Figura 4b). Por outro lado, também existem embarcações menores de maior velocidade, que podem transportar pessoas com cargas apenas pessoais (FONTES et al., 2023a, 2023b; HERNÁNDEZ-FONTES et al., 2021), tais como os expressos (Figura 4c) e embarcações menores motorizadas (Figura 4d).

Figura 4. Embarcações de passageiros e mistas que operam na região amazônica e possivelmente também no rio Madeira. (a) Gaiola/recreio. (b) Ferryboat. (c) Embarcação de alta velocidade Expresso. (d) Embarcação menor motorizada (exemplo de lancha escolar).



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: (a) – (c) Fontes et al. (2023a); (d) Hernández-Fontes et al. (2021).

Com relação ao transporte de cargas usando comboios, segundo a DPC-b (2005), um empurrador pode ser definido como uma embarcação do tipo rebocador cujo objetivo consiste em empurrar uma barcaça, ou um conjunto delas, formando assim um sistema flutuante do tipo comboio. Por outro lado, uma barcaça pode ser definida como uma embarcação de carga, destinada ao auxílio de carga e descarga de navios fundeados (ancorado, preso ao fundo do rio). É comum que as barcaças não possuam propulsão própria, nem sejam tripuladas, tendo o fundo achatado. A Figura 5 mostra uma fotografia de um comboio de seis barcaças sendo movimentadas por um rebocador no rio Madeira.

Figura 5. Comboio de empurrador com um sistema de seis barcaças operando no rio Madeira.

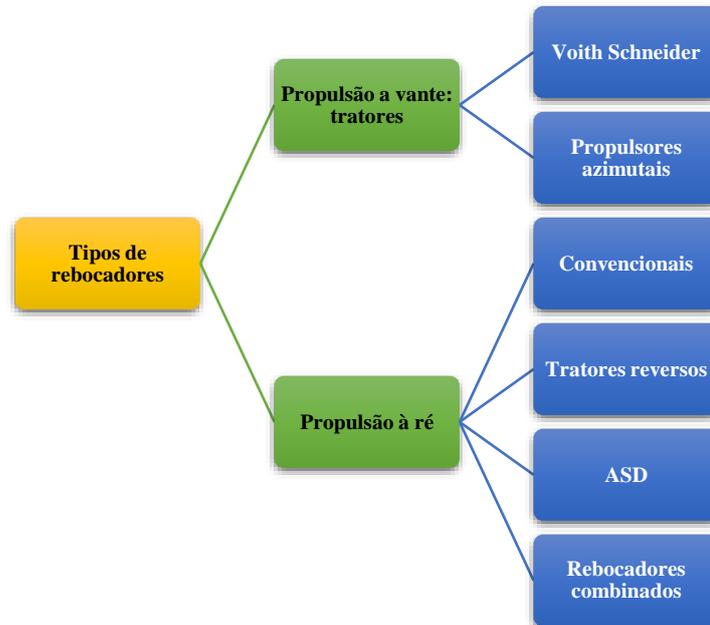


Fonte: Adaptado de DNIT (2021).

O rebocador é uma embarcação muito usada no transporte hidroviário na região amazônica, pois ela é planejada para realizar manobras, empurrar e rebocar sistemas de barcaças, dentre outras embarcações. Também, é útil para realizar manobras mais delicadas, incluindo a atracação e desatracação. Algumas das suas características mais relevantes são o seu porte pequeno combinado com a capacidade de alta potência dos seus motores, assim como a sua excelente capacidade de manobrar (MARINHA-DO-BRASIL, 2021b).

Devido à importância que os rebocadores têm nas atividades de transporte no rio Madeira, considera-se importante conhecer a maneira na qual eles se classificam. A Figura 6 apresenta uma classificação dos tipos de rebocadores de acordo com a propulsão e localização dos propulsores, segundo o trabalho desenvolvido por Filho (2009).

Figura 6. Tipos de rebocadores classificados de acordo com a propulsão e localização dos propulsores.



Fonte: Adaptado de Filho (2009).

Pode-se observar na Figura 6 que os propulsores dos rebocadores podem se localizar avante ou a ré da embarcação. Com relação à propulsão avante, podem-se destacar o propulsor Voith Schneider e os propulsores azimutais. O primeiro é um sistema de propulsão versátil e de manutenção fácil, formado por uma alavanca e um volante, tendo capacidade de mudança abrupta do ângulo de ataque das pás em 180°. Por outro lado, os propulsores azimutais fornecem boa manobrabilidade durante o posicionamento das embarcações utilizando conjuntos de hélices e motores localizados de maneira externa ao navio.

Com relação à propulsão a ré, a qual é importante para desencalhar grandes embarcações usando rebocadores, é possível mencionar os rebocadores convencionais, tratores reversos / ASD, e os rebocadores combinados.

O rebocador trator reverso (ASD) é uma embarcação de propulsão a ré que tem a sua propulsão distante do seu centro de pressão, proporcionando a capacidade de ficar perpendicular ao costado do navio e de aumentar a velocidade de operação. O rebocador com propulsão combinada pode ser definido como um rebocador convencional com a implementação de um *bow thruster* 360 graus, facilitando a realização de manobras mais elaboradas, assim como a movimentação de embarcações nos portos. Estes rebocadores são necessários para operar em locais de mais difícil acesso em relação aos rebocadores convencionais, incluindo a realização de manobrar mais complexas.

4.2. Revisão de exemplos de acidentes com embarcações no rio Madeira

É importante mencionar que, embora não seja difundido completamente, os acidentes com embarcações na região amazônica têm sido bastante comuns, envolvendo vários tipos de embarcações. Este tipo de informações pode ser encontrado principalmente na mídia regional e local. A seguir, são apresentados alguns exemplos de acidentes que têm acontecido no rio Madeira, cujas informações foram documentadas por meio de notícias na mídia digital.

Segundo G1globo (2022), no dia 12 de janeiro de 2022, uma embarcação de pequeno porte naufragou enquanto navegava no rio Madeira, em proximidade do município de Nova Olinda do Norte – AM. O acidente teve 6 vítimas desaparecidas. A Figura 7 mostra uma lancha dos bombeiros, que é uma ambulância fluvial utilizada para procurar as vítimas do acidente. Esse tipo de acidente demonstra a ocorrência de acidentes com embarcações menores no rio Madeira, causando impactos sociais negativos devido à perda de vidas humanas.

Figura 7. Bombeiros fazem busca por família que desapareceu no rio Madeira, em Nova Olinda do Norte (AM).



Fonte: Adaptado de G1globo (2022).

Segundo o portal de notícias Rondônia ao vivo (RONDONIAOVIVO, 2023), no dia 10 de março de 2023, um rebocador afundou após bater em um banco de areia (Figura 8). Ele seguia no rio Madeira, em direção a Porto Velho. Esse rebocador conduzia uma balsa, quando bateu com o banco de areia. Esse tipo de acidentes faz evidente o problema de transporte de sedimentos nos rios da região amazônica, os quais são acumulados em diversas regiões, causando variações na elevação do fundo dos rios. Essa situação, somada à falta de levantamentos batimétricos, agrava os riscos de acidentes devido a colisão com o fundo e encalhamento.

Figura 8. Rebocador afundando após balsa do comboio colidir com um banco de areia no rio Madeira, em Porto Velho.



Fonte: Adaptado de Rondoniaovivo (2023).

Na mesma região do rio Madeira, em Porto Velho, foi documentado outro incidente envolvendo um rebocador. Na Figura 9 é mostrado um rebocador que foi utilizado para desenvolver atividades de transporte no rio Madeira, o qual naufragou na região do rio Madeira em Porto Velho. Embora houve perdas econômicas, não foram documentadas perdas humanas nem impactos ambientais (NOTICIASTUDO AQUI, 2023).

Figura 9. Exemplo de rebocador de uso típico em atividades de transporte aquaviário regional, o qual naufragou no rio Madeira.



Fonte: Adaptado de Noticiastudoaqui (2023).

No 2019, o site de notícias G1 da Globo (G1GLOBO, 2019) noticiou outro acidente ocorrido no rio Madeira. Nesse acidente, um barco virou durante um vendaval enquanto navegava no rio, entre 19h e 20h do dia 6 de setembro de 2019, em Porto Velho. Segundo informações iniciais do corpo de bombeiros, três pessoas que estavam na embarcação desapareceram. Devido à extensão da região, foi necessário utilizar embarcações menores e um helicóptero do Núcleo de Operações Aéreas (NOA) para as buscas (Figura 10). Esse tipo de acidente evidencia o desafio relacionado com a extensão das hidrovias e da turbidez da água do rio Madeira para realizar atividades de busca e resgate.

Figura 10. Bombeiros fazem buscas por vítimas no rio Madeira.



Fonte: G1globo (2019).

O site G1 Globo (G1GLOBO, 2021) também documentou uma balsa com alimentos se envolveu em um acidente no rio Madeira, em Porto Velho, após ter colidido com um pedral (Figura 11). O acidente ocorreu a 140 km da área urbana de Porto Velho, no dia 9 de agosto de 2021. Segundo um morador local, o acidente ocorreu próximo a uma vila chamada Catarina. A balsa seguia para Manaus e levava, principalmente, açúcar, óleo, dentre outros alimentos. Esse tipo de acidente mostra as possíveis perdas econômicas que podem acontecer devido a acidentes com embarcações de carga. Também, é necessário considerar os possíveis impactos ambientais que podem ocorrer desses tipos de acidentes.

Figura 11. Imagens ilustrativas de uma balsa de carga de alimentos que virou no rio Madeira após colisão com pedral.



Fonte: G1globo (2021).

O site Portal Único (PORTALUNICO, 2022) documentou que uma carreta de dois vagões deslizou na entrada de uma balsa e caiu no rio Madeira (Figura 12). O acidente aconteceu no dia 11 de novembro de 2022. A carreta ficou parcialmente submersa enquanto tentava embarcar na balsa, para fazer a travessia de Humaitá para Apuí. Nesse incidente apenas foram documentadas perdas econômicas e materiais; o cavalo que estava sendo transportado ficou na balsa. A Figura 12 mostra o acidente com a carreta parcialmente submersa. Esse tipo de acidente mostra os riscos que existem no transporte de cargas móveis e vivas pelos rios da região Amazônia. Além de pôr em risco a carga, esse tipo de acidentes pode causar impactos ambientais, como documentado por Pinheiro et al. (2019). Esses pesquisadores estudaram os efeitos de matéria orgânica derivada de acidentes com embarcações que transportavam animais na região amazônica.

Figura 12. Acidente de uma carreta que deslizou ao tentar embarcar em balsa no rio Madeira.



Fonte: Portalunico (2022).

Outro problema característico no rio Madeira é a colisão de embarcações por causa de tentativas de ultrapassagem, como aconteceu no primeiro dia do ano 2020, quando duas embarcações colidiram ao um tentar fazer uma ultrapassagem no rio Madeira, próximo ao município de Humaitá, no estado do Amazonas (G1GLOBO, 2020).

Também, os efeitos das correntezas do rio Madeira podem influenciar a ocorrência de acidentes. Por exemplo, em abril de 2022, uma Draga afundou no rio Madeira, causando impactos negativos na segurança dos trabalhadores (EMRONDONIA, 2022). Segundo Emrondonia (2022), a alça da broca da draga quebrou, e devido à correnteza a embarcação alagou até afundar.

Acidentes de pessoas que caem na água do rio Madeira também têm sido documentados na mídia. Segundo o portal de notícias SINTERO (SINTERO, 2013), um funcionário da SEDUC (Secretaria de Educação) desapareceu quando caiu no rio Madeira. O membro da equipe fazia entrega de kits de materiais escolares aos moradores de uma região de Porto Velho, durante uma viagem aos Distritos de São Carlos e Aliança. Esse tipo de acidentes também demonstra a necessidade de prever os que existem devido aos efeitos de turbidez e correnteza no rio Madeira.

Record TV (2022) noticiou que uma balsa que levava várias carretas pelo rio Madeira, na divisa entre os estados do Amazonas e Rondônia, bateu em um banco de areia em maio de 2010. Após o impacto no banco de areia, ela tombou. Os veículos que eram levados pela balsa, submergiram. Esse foi um exemplo de encalhe no rio Madeira, causado por bancos de areia. Nesse exemplo se pode perceber a grande perda material de mercadoria.

Os acidentes no rio Madeira têm causado perdas lamentáveis de pessoas. Segundo reportagem do site Gazeta Digital (GAZETADIGITAL, 2003), oito pessoas tiveram óbito no mês de agosto de 2003 por causa do acidente com o barco Orlandina, que naufragou no rio Madeira, nas proximidades da Ilha da Pupunha, em Humaitá, no estado do Amazonas. A embarcação navegava com destino à Porto Velho, com cerca de 70 passageiros a bordo. Por causa do mau tempo, incluindo com chuva e vento intenso, a embarcação foi atirada contra as pedras, na margem do rio, e subsequentemente, ela adernou e afundou, embora o nível do rio estar baixo e estreito nessa época do ano.

Os parágrafos acima resumem apenas alguns acidentes ocorridos no rio Madeira, registrados por mídias locais. Na Tabela 1, se encontram os acidentes descritos neste capítulo de forma resumida.

Tabela 1. Alguns acidentes de embarcações no rio Madeira noticiados por mídias locais.

Data	Natureza	Embarcação envolvida	Causa do acidente
12/01/2022	Naufrágio	Embarcação de pequeno porte	Desconhecida
10/03/2023	Colisão	Rebocador com balsa(comboio)	Colisão com banco de areia submerso
06/09/2019	Naufrágio	Embarcação de pequeno porte	Vendaval
09/08/2021	Colisão	Balsa	Colisão com pedra que estava submersa
11/11/2022	Queda de mercadoria na água	Balsa	Carreta desliza ao tentar embarcar na balsa
01/01/2020	Abalroamento	Duas embarcações de passageiros	Uma embarcação tentou ultrapassar a outra, fazendo uma manobra arriscada
06/04/2022	Naufrágio	Draga	Falha mecânica na alça da broca
15/10/2013	Queda de pessoa na água	Embarcação de pequeno porte	Desconhecida
01/05/2010	Encalhe	Balsa (comboio)	Colisão com banco de areia
16/08/2003	Naufrágio	Embarcação de passageiros	Mau tempo, colisão com pedras

Fonte: O autor.

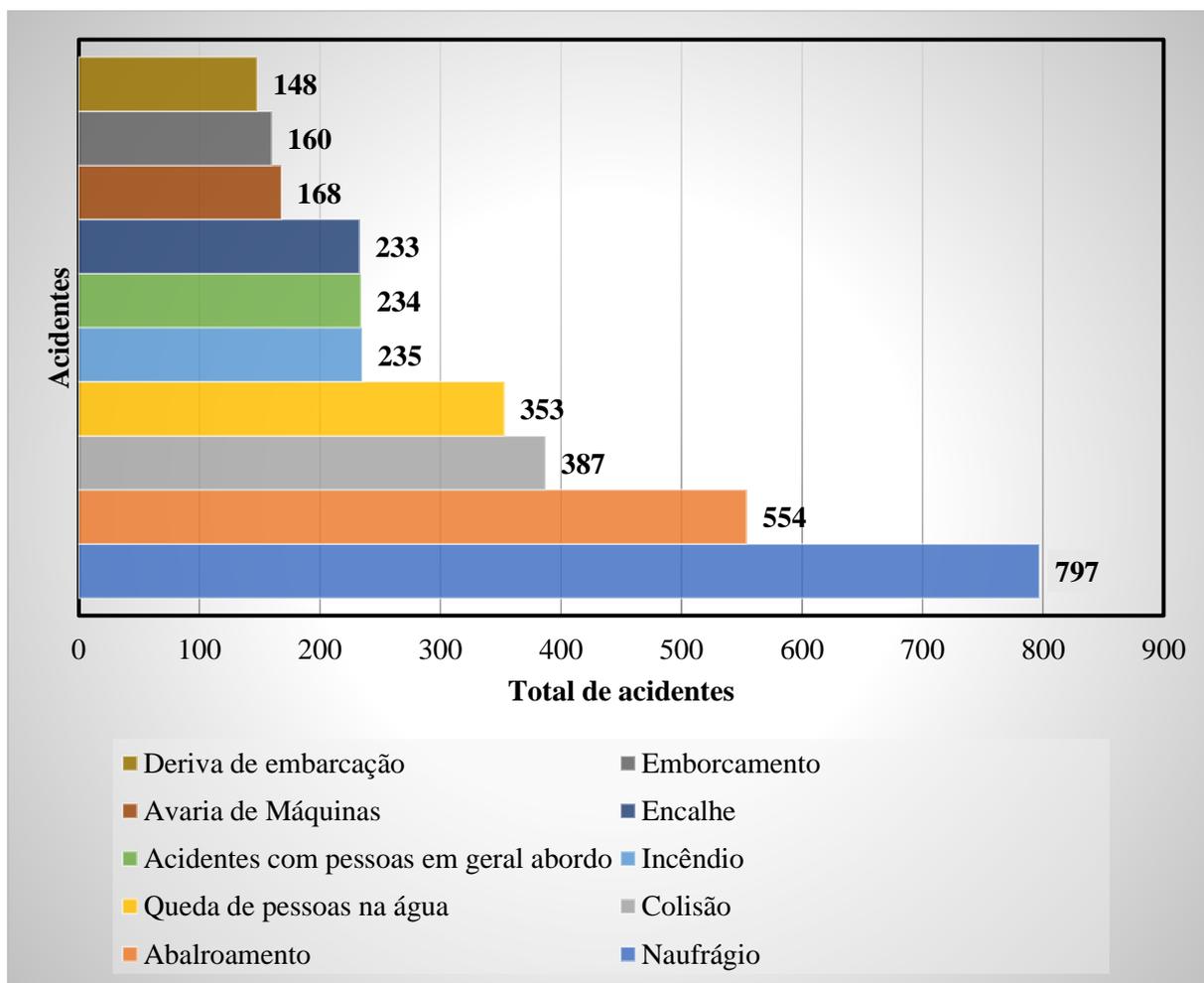
5. RESULTADOS DA ANÁLISE QUANTITATIVA

5.1. Resultados no Brasil em geral

A partir dos relatórios dos Inquéritos Administrativos sobre Acidentes e Fatos de Navegação (IAFN's) proporcionados pela Marinha do Brasil foi feita a análise estatística de acidentes. Com base na pesquisa realizada dos IAFN's, foi possível primeiramente ter uma visão nacional em relação a natureza dos acidentes envolvendo embarcações, no período de 2018 a 2022. Constatou-se um total de 4.387 acidentes registrados durante esse período no Brasil, destacando-se os do tipo naufrágio, abalroamento, colisão dentre outros.

A Figura 13 mostra a comparação de ocorrências de acidentes, classificados por sua natureza, que obtiveram frequência maior que 100 casos durante o período 2018 a 2022. Nota-se que o naufrágio foi o tipo de acidente mais comum.

Figura 13. Total de acidentes obtidos dos relatórios IAFN's, classificados por natureza, com embarcações no Brasil durante o período de 2018 a 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Marinha-do-Brasil (2023).

Por outro lado, a Tabela 2 mostra, de maneira percentual, os dados da Figura 18. Esses dados estão na forma percentual, de tal maneira que possamos ter uma outra visão dos dados, comparando-os. Podemos notar na Tabela 2, que naufrágio, abalroamento e colisão juntos, representam quase 40% dos acidentes de embarcações no Brasil.

Naufrágio é o tipo de acidente mais recorrente, apresentando aproximadamente 18,2% dos acidentes, seguido de abalroamento com 12,6%. É possível notar por meio da Tabela 3, que as naturezas de acidentes enumeradas na Figura 13 (naufrágio, abalroamento, colisão, queda de pessoa na água, incêndio, acidentes com pessoas em geral a bordo, encalhe, avaria de máquinas, emborcamento e deriva da embarcação), representam quase 75% do total de acidentes em águas brasileiras no período de análise.

Ao realizar esta pesquisa no âmbito nacional, em relação a acidentes marítimos, foi iniciado a análise sobre os acidentes. Nota-se que os acidentes que mais se destacam são naufrágio e abalroamento. Entretanto, é importante verificar se tais ocorrências são características também da região amazônica.

Tabela 2. Percentual da natureza de acidentes marítimos registrados no Brasil de 2018 a 2022.

Natureza do acidente	Percentual de acidentes
Naufrágio	18,2%
Abalroamento	12,6%
Colisão	8,8%
Queda de pessoa na água	8%
Incêndio	5,4%
Acidentes c/ pessoas em geral a bordo	5,3%
Encalhe	5,3%
Avaria de Máquinas	3,8%
Emborcamento	3,6%
Deriva da embarcação	3,4%
Outros	25,5%

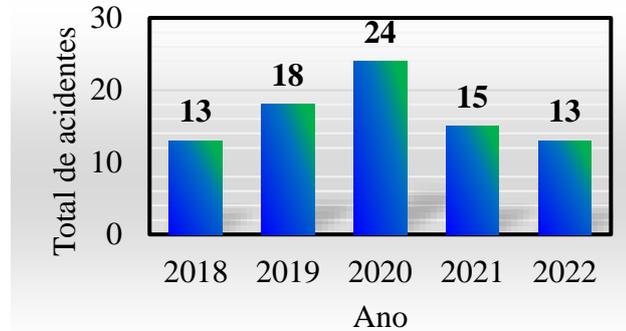
Fonte: O autor.

5.2. Resultados de acidentes no rio Madeira

De maneira similar às ocorrências de acidentes no Brasil, foi feita a análise estatística para os acidentes no rio Madeira, utilizando como base IAFN's. Foram registrados 13 acidentes no rio Madeira no ano de 2018, 18 acidentes em 2019, 24 em 2020, 15 em 2021 e 13 em 2022, como representado na Figura 14. Podemos notar que de 2018 a 2020 houve um aumento no

número de acidentes no rio Madeira, tendo seu máximo em 2020, e decrescendo nos anos seguintes.

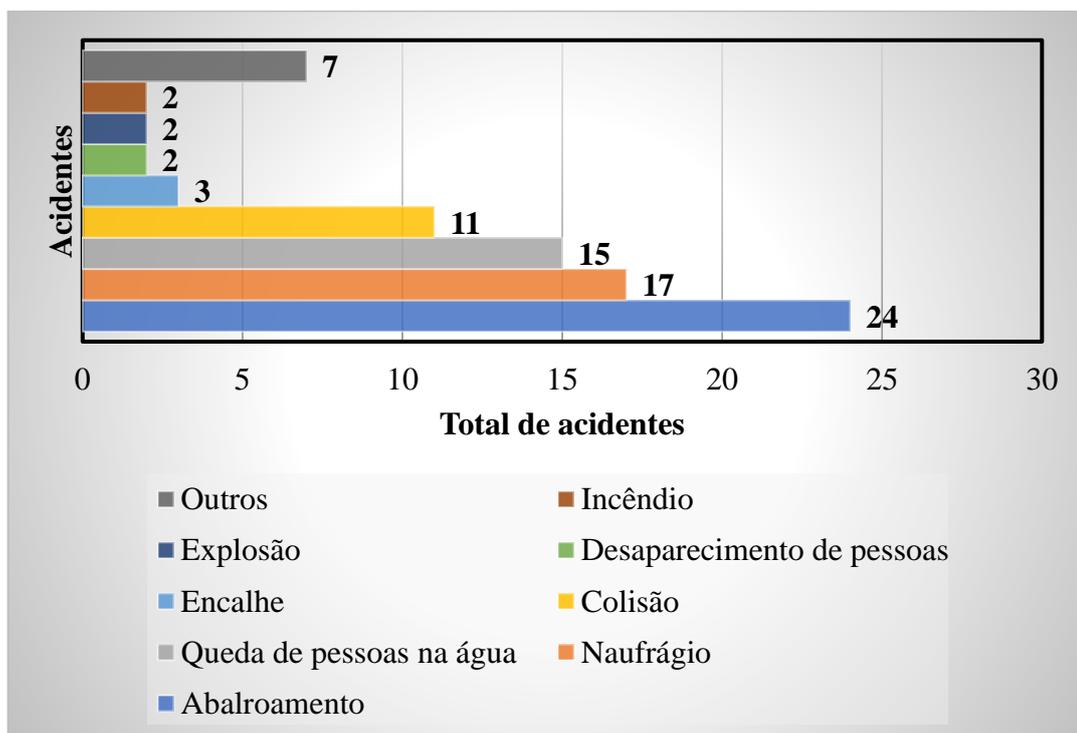
Figura 14. Total de acidentes com embarcações no rio Madeira classificados por ano, no período de 2018 a 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Marinha-do-Brasil (2023).

A Figura 15 mostra a comparação do número de acidentes no rio Madeira segundo o tipo de acidente durante o período 2018-2022. Pode-se verificar que o total de acidentes nesses 5 anos foi de 83. Destes 83 acidentes, a natureza mais comum foi o Abalroamento, com 24 casos. Outras naturezas de acidentes que também se destacam no período de análise, são naufrágio, queda de pessoas na água e colisão, com 17, 15 e 11 ocorrências no período, respectivamente.

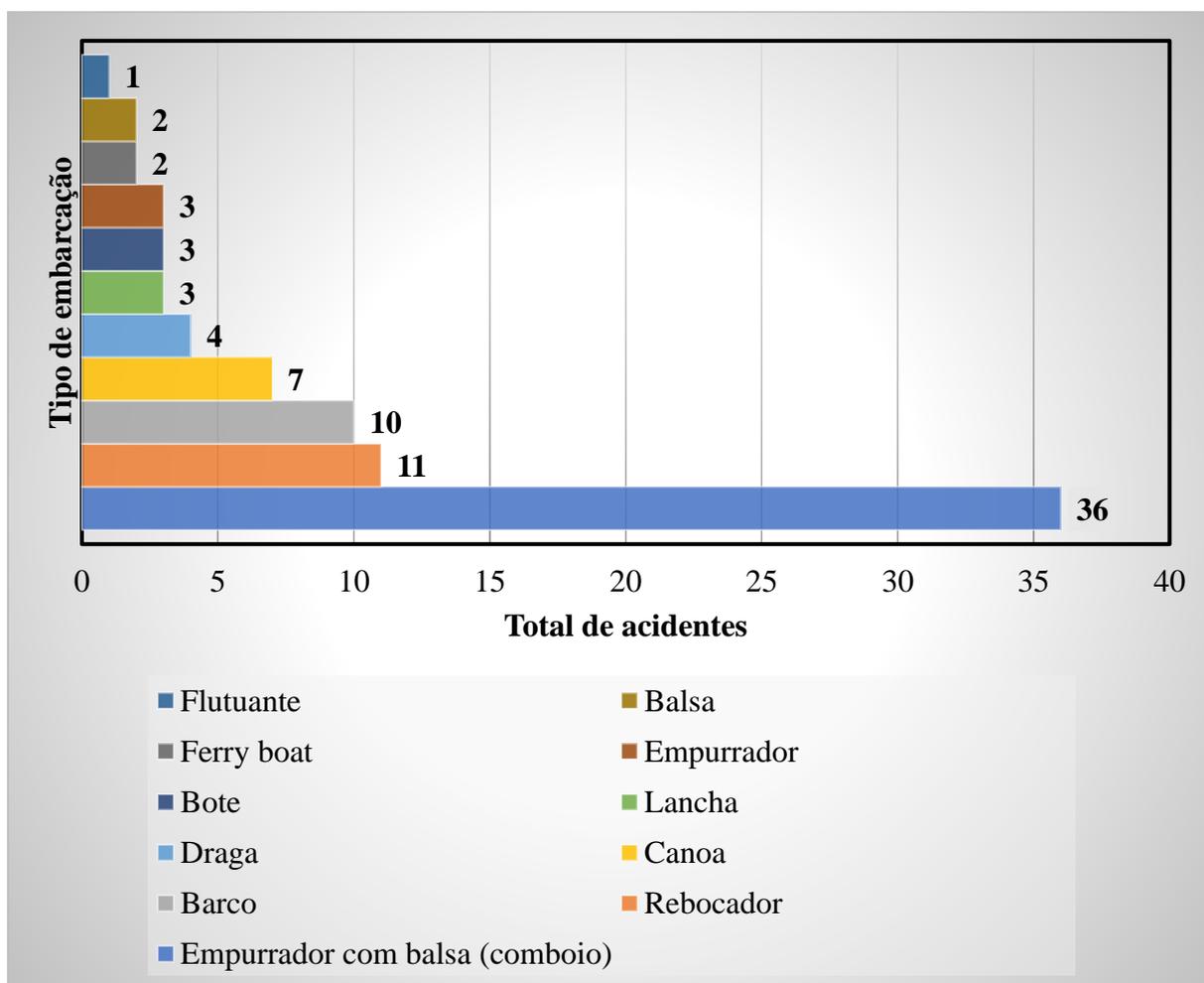
Figura 15. Acidentes com embarcações no rio Madeira durante o período de 2018 a 2022, classificados segundo a sua natureza.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Marinha-do-Brasil (2023).

De maneira alternativa, a Figura 16 mostra a comparação de acidentes no rio Madeira, durante o período 2018 – 2022, classificados por tipo de embarcação envolvida no acidente. Nota-se que os acidentes nessa hidrovia têm acontecido em embarcações de grande (e.g., balsas e ferry boats), médio (e.g., rebocadores) e pequeno porte (e.g., lanchas e canoas). É notável que a maior quantidade de acidentes tem acontecido com embarcações de transporte de cargas, as quais navegam constantemente no rio Madeira.

Figura 16. Acidentes com embarcações no rio Madeira durante o período de 2018 a 2022, classificados segundo o tipo de embarcação.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Marinha-do-Brasil (2023).

A Tabela 3 mostra o percentual de acidentes com embarcações no rio Madeira, segundo os dados apresentados na figura anterior. Quando se trata do tipo da embarcação envolvida em acidentes no rio Madeira, entre 2018 e 2022, o que mais se destaca é o Empurrador com Balsa (Comboio), com 36 acidentes, de 83 totais, representando 43,4% do número de acidentes no período analisado.

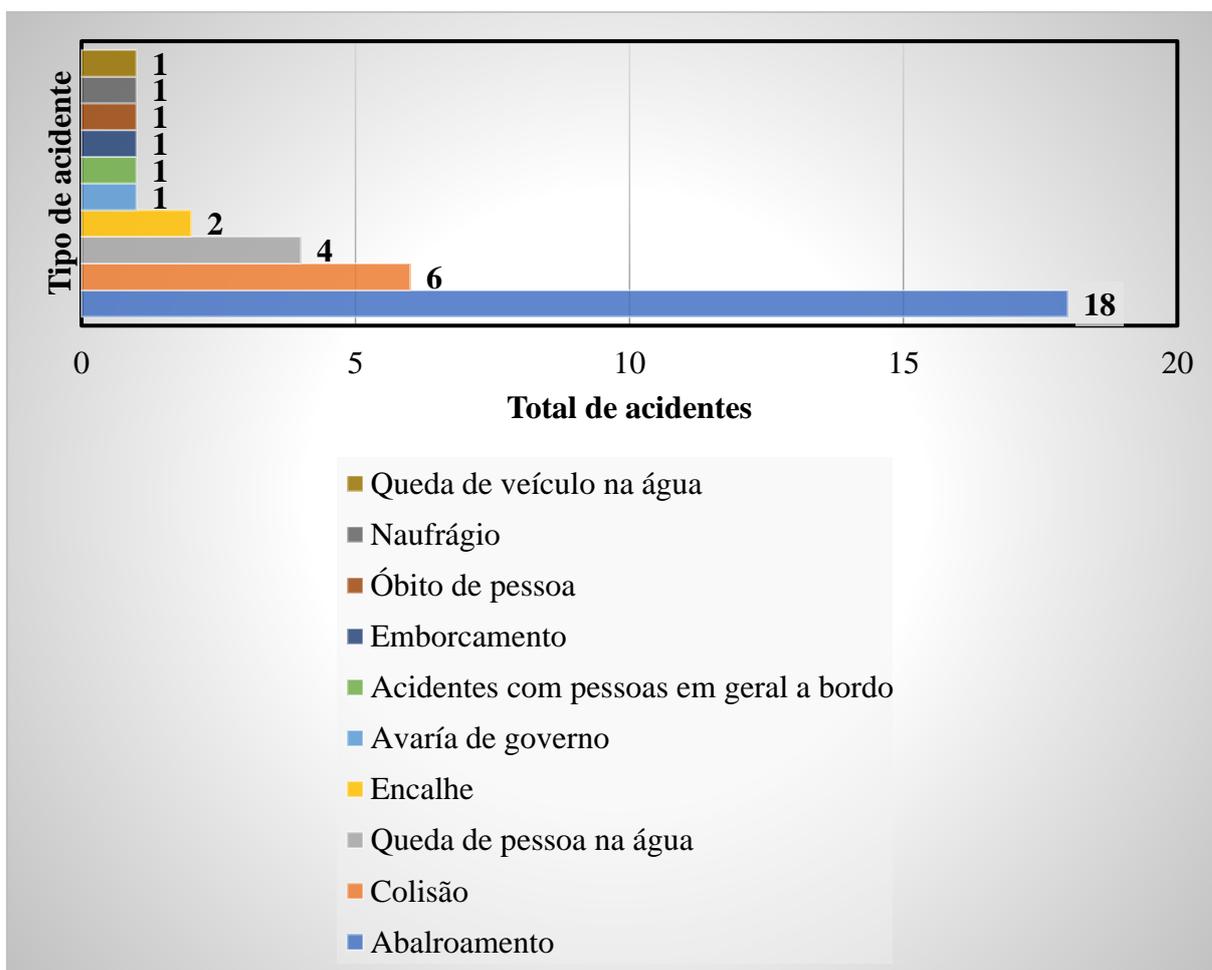
Tabela 3. Percentual do total de acidentes com embarcações no rio Madeira no período de 2018 a 2022, classificados por tipo de embarcação.

Tipo de embarcação	Percentual de acidentes
Empurrador com balsa	43,3%
Rebocador	13,3%
Barco	12%
Outros	31,4%

Fonte: O autor.

Sendo o Empurrador com balsa (comboio) o tipo de embarcação mais comum a se envolver em acidentes no rio Madeira, no período de estudo, foi aprofundada a análise neste tipo de embarcação (Figura 17). A Figura 17 mostra a comparação de acidentes com embarcações do tipo comboio no rio Madeira, no período 2018 – 2022, classificados por natureza do acidente. A natureza de acidente mais frequente com o comboio é o abalroamento, responsável por 50% dos acidentes com comboios no rio Madeira.

Figura 17. Acidentes com embarcações do tipo empurrador com balsa (comboio) no rio Madeira durante o período de 2018 a 2022, classificados por natureza do acidente.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Marinha-do-Brasil (2023).

5.3. Discussão sobre os resultados quantitativos

O número de acidentes fluviais de embarcações no rio Madeira, aferidos pelos relatórios da Marinha do Brasil (IAFN's), é de apenas 83. No mesmo período, o número total de acidentes marítimos no Brasil de forma geral, é de 4387 (Tabela 4). Ou seja, os acidentes registrados no rio Madeira representam ~1,89% do total de acidentes no Brasil (2018-2022). No entanto, cabe mencionar que os IAFN's consideram acidentes que ocorrem em águas interiores e no oceano e que o rio Madeira é apenas uma das principais hidrovias na região amazônica. Sendo assim, considera-se uma quantidade considerável de acidentes navais.

Tabela 4. Comparativo do número de acidentes de navegação no Rio Madeira com o Brasil entre os anos de 2018 e 2022.

Local	Total de acidentes	Percentual
Rio Madeira	83	1,89%
Brasil	4387	100%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Marinha-do-Brasil (2023).

A significativa ocorrência de acidentes com embarcações no rio Madeira pode ter diversas causas, sendo algumas delas as peculiaridades da região amazônica, como mata fechada, difícil acesso à internet, variação das características dos rios, maior dificuldade de comunicação de forma geral, em comparação com as outras regiões brasileiras, dentre outros fatores, como descrito por Fontes et al. (2023a). Sendo assim, quando ocorre um acidente em regiões mais isoladas da região, os locais têm mais dificuldade para comunicar a Marinha. Portanto, é possível que, em certas ocasiões, alguns acidentes, considerados como “pouco graves”, não sejam registrados nem contabilizados pelos relatórios IAFN's.

Outro dado interessante é o baixo número de acidentes do tipo encalhe encontrados registrados nos IAFN's. Uma possibilidade para este fato é o encalhe por muitas vezes, ser apenas o fator inicial para o acidente de navegação. Por exemplo, uma embarcação pode encalhar e em seguida naufragar.

Os dados apresentados neste capítulo trazem importantes conclusões sobre os tipos de acidentes mais ocorridos no rio Madeira. Sendo assim, a base para tomar medidas de segurança que possibilitem a redução destes números está realizada, podendo servir como base para pesquisas futuras.

O abaloamento, colisão, naufrágio e encalhe, se mostraram os acidentes mais comuns no Rio Madeira, tanto na pesquisa qualitativa quanto na quantitativa. Portanto, recomenda-se que as medidas e iniciativas de prevenção de acidentes na região, enfatizem estes tipos de acidentes.

6. ALGUNS DESAFIOS A SEREM CONSIDERADOS PELA ENGENHARIA NAVAL

A região amazônica possui uma grande extensão territorial e é uma das regiões mais preservadas do mundo devido a sua relevância ambiental. Por esses motivos, existem vários fatores que precisam ser levados em consideração para planejar estratégias que visem a prevenção de acidentes com embarcações que navegam em rios dessa região.

A Figura 18 ilustra alguns dos desafios, propostos pelo autor, que precisam ser levados em consideração pela Engenharia Naval para planejar iniciativas de prevenção de acidentes no rio Madeira, e outras regiões similares. Tais fatores serão discutidos nos seguintes parágrafos.

Figura 18. Alguns desafios no rio Madeira a serem considerados pela Engenharia Naval para planejar iniciativas de prevenção de acidentes com embarcações. Imagens de livre acesso obtidas com o gerenciador de imagens online do Microsoft Office Word.



Transporte de sedimentos e turbidez



Variação do nível d'água



Acessibilidade



Falta de sinalização

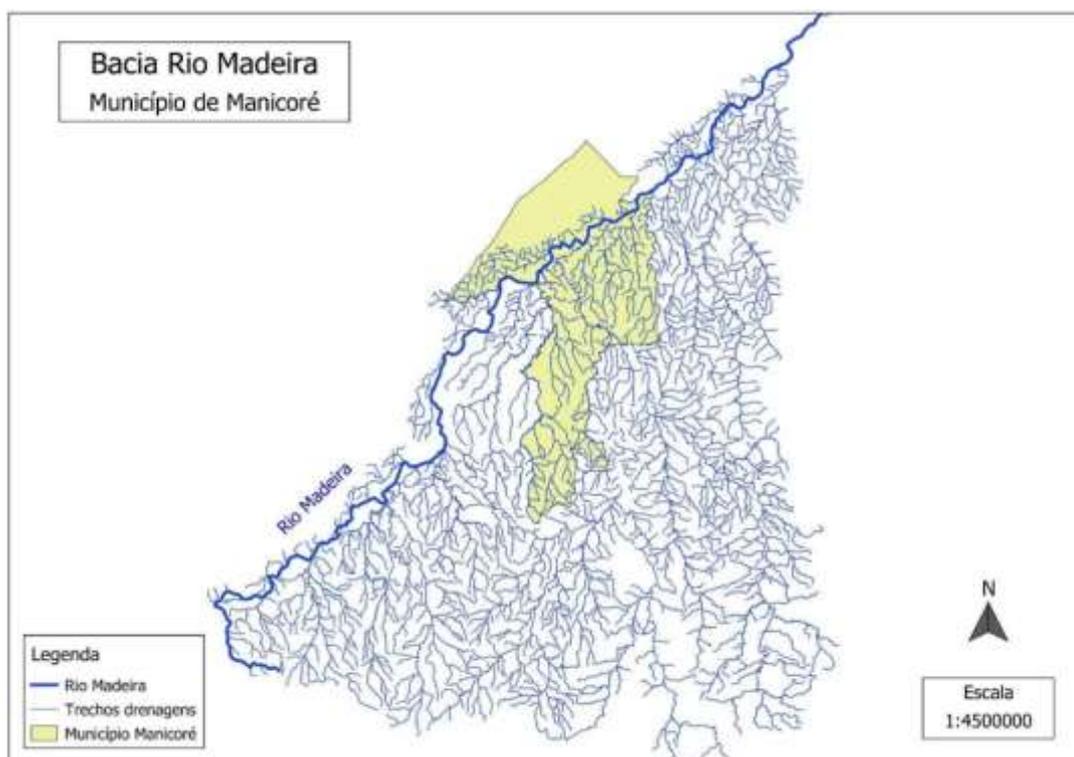
Fonte: O autor.

6.1. Transporte de sedimentos e turbidez

O rio Madeira possui uma das maiores cargas de sedimentos do mundo (ADAMY, 2016), diferenciando-se dos demais rios amazônicos. As instalações de usinas elétricas instaladas ao longo do seu curso podem ter contribuído nos impactos na inundação do rio.

Lopes e Magalhães (2018) descreveram as principais características da bacia do rio Madeira, a qual é formado por rios andinos e brasileiros, representando ~23% da bacia amazônica. A área total de drenagem é de mais de 1.300.000 km²; a Figura 19 apresenta a localização da bacia do rio Madeira, incluindo a região correspondente ao município de Manicoré.

Figura 19. Mapa de localização da localização da bacia hidrográfica do rio Madeira, incluindo o município de Manicoré.



Fonte: Oliveira dos Santos et al. (2021).

Na Amazônia brasileira, o rio Madeira apresenta uma baixa declividade na região do Baixo Madeira, em Porto Velho, onde acontece uma baixa taxa de erosão e desenvolvimento de áreas de inundação, apresentando uma significativa concentração de sedimentos, dando lugar ao fenômeno das Terras Caídas. Por outro lado, no trecho de Porto Velho ao distrito de Calama, o rio Madeira apresenta mais sinuosidade e instabilidade. Nesse trecho, a baixa declividade contribui ao depósito de sedimentos às margens, causando extensas áreas inundáveis, conhecidas como “ilhas”, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20. Exemplo de sinuosidades no rio Madeira, considerando o trecho Porto Velho – Calama.



Fonte: Lopes e Magalhães (2018).

Com relação à turbidez, cabe mencionar que a região amazônica possui rios com diferentes composições químicas, as quais proporcionam um aspecto visual diferente para cada um deles. Fontes et al. (2023b) descreve a composição química dos rios amazônicos como um dos desafios para implementar atividades de inspeção subaquática usando veículos não tripulados. Por outro lado, Horbe et al. (2013) apresentaram uma pesquisa da geoquímica das águas do médio e baixo rio Madeira e seus principais tributários entre a cidade de Humaitá e a sua foz, no rio Amazonas. Nessa pesquisa, são descritas as principais características das águas do rio Madeira, as quais são consideradas como brancas, bicarbonatadas-cálcicas, com pH entre 5 – 6. Por outro lado, nos tributários é comum encontrar águas de cor preta, sendo mais ácidas e quimicamente heterogêneas. A pesquisa de Horbe et al. (2013) também diferenciou a composição dos tributários das margens esquerda e direita do rio Madeira.

6.2. Variação do nível da água (possibilidade de encalhe)

No trecho descrito na figura anterior, o rio Madeira apresenta características de rio de baixo curso ou de planície (LOPES; MAGALHÃES, 2018), favorecendo a navegação por apresentar uma declividade regular e suave. No entanto, existem fatores adversos como o

depósito de sedimentos que se acumulam em algumas regiões ao longo do curso. Esse problema restringe a navegabilidade em alguns trechos e causa a necessidade de obras de dragagem e sinalização, principalmente para possibilitar a navegação de embarcações de grande porte.

No rio Madeira, como todos os rios amazônicos, existem temporadas sazonais de cheia e seca, ou seja, é afetado pela variação do nível da água (Figura 21a). O período de águas baixas (também conhecido como Estiagem) acontece entre julho e outubro. Por outro lado, o período de águas altas é de fevereiro a maio. No período de “seca” é comum a formação de bancos de areia que obrigam às embarcações a escolherem rotas alternativas. Lopes e Magalhães (2018) assinalam que além da necessidade de mudança das rotas, essa condição aumenta os riscos de acidentes de embarcações. Os acidentes comuns estão relacionados com o encalhe nos bancos de areia, colisão com pedras e/ou madeiras, aumento de incidentes com vida aquática, entre outros. Esse problema também é comum em diversas regiões da Amazônia brasileira, como documentado por Fontes et al. (2023a), Figura 21b.

Figura 21. Problema de aparecimento de ilhas ou bancos de areia durante a seca na região amazônica. (a) Exemplo de banco de areia formado durante a temporada da seca no rio Madeira; na localidade de Terra Firme (Calama). (b) Exemplo de banco de embarcação de transporte de passageiros navegando perto de um banco de areia que não existia durante a época de cheia. Imagens utilizadas sob a licença Creative Commons CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



(a) (b)
Fonte: (a) Lopes e Magalhães (2018); (b) Fontes et al. (2023a).

6.3. Acessibilidade

O estudo da acessibilidade é necessário para contribuir no desenvolvimento sustentável da região amazônica, como definido por Morgado et al. (2013), que pesquisaram os padrões de acessibilidade regional através do transporte hidroviário.

Embora grande parte do transporte de pessoas e cargas na região amazônica seja feita por navegação nas hidrovias, ainda há questões relacionadas com a acessibilidade que precisam ser resolvidas. Por exemplo, é comum que diversas cargas móveis como veículos com rodas

sejam embarcadas e transportadas seguindo procedimentos inseguros, como pode ser visto em Extra (2022). Além disso, muitas regiões não contam com instalações portuárias adequadas para o embarque e desembarque de pessoas e cargas. Algumas vezes, são utilizados cais e portos flutuantes para realizar o desembarque de cargas, estando sujeitos a condições ambientais adversas que podem pôr em risco a sua estabilidade. Lopes e Magalhães (2018) documentaram que, em diversas zonas de embarque, chegando aos distritos no rio Madeira, não há instalações adequadas para atracagem das embarcações. Por conseguinte, muitas vezes eles são atracados usando estacas em barrancos próximos aos acessos. Tais acessos comumente são providenciados por escadas de madeira em condições inseguras para as pessoas, apresentando pouca acessibilidade (e.g., Figura 22a). As limitações de acessibilidade em diversos pontos de acesso restringem a possibilidade de transporte dos moradores assim como a mobilidade da produção local. Tipicamente, as atividades de carga e descarga em zonas com acessibilidade limitada tem de ser feita subindo e descendo os barrancos nos quais as embarcações estão atracadas (e.g., Figura 22b). Quando muda a sazonalidade do rio, as condições de acesso mudam. Por exemplo, na época de seca, pode haver atrasos ou até perda de carga devido aos longos processos de retirada dos distritos (LOPES; MAGALHÃES, 2018).

Figura 22. Exemplo de problema de acessibilidade para o embarque de pessoas e carga nos distritos do rio Madeira. (a) Foto da entrada ao distrito de Demarcação. (b) Exemplo de embarcações de ribeirinhos atracadas em estacas, e carregando produtos em um barranco, na localidade de Cavalcante, distrito de São Carlos, no rio Madeira.



Fonte: Lopes e Magalhães (2018).

6.4. Falta de sinalização

Uma matéria publicada pela Revista Portos e Navios (PORTOSENÁVIOS, 2015) descreveu que a navegação no rio Madeira no Amazonas e em Rondônia é grandemente prejudicada por falta de sinalização e dragagem. Menciona-se a relevância que têm os investimentos para melhorar a hidrovia, pois nela se transporta a maior parte do combustível e

alimentos entre os estados do Amazonas, Rondônia, Acre e parte do Mato Grosso. A matéria menciona o tempo estimado para navegar de Porto Velho até Itacoatiara (descendo o rio: ~70 horas; contra a correnteza: ~130 horas), salientando que esse tempo pode mudar por falta de sinalização. Durante as cheias, de Manaus ao Porto Velho, que inclui o trecho do rio Madeira, as embarcações demoram aproximadamente oito dias, enquanto no período de vazante (entre julho e outubro), quando o nível d'água diminui, o mesmo trajeto pode levar até 15 dias, repercutindo economicamente nas atividades navais. Fontes et al. (2023a) também salientaram a falta de sinalização na região amazônica, sendo considerada como um dos principais desafios para o planejamento de estratégias que visem a prevenção de acidentes com embarcações regionais.

7. ALTERNATIVAS DE ESTUDO E PREVENÇÃO

A Figura 23 ilustra as principais alternativas de estudo e prevenção de acidentes no rio Madeira, que poderiam ser implementadas utilizando a Engenharia Naval. No presente trabalho são propostas cinco alternativas principais, as quais consistem em melhorar as análises batimétricas na região, inovar e aumentar a sinalização da hidrovia, realizar pesquisa técnico-científica para avaliar possíveis riscos estruturais e hidrodinâmicos, e acrescentar as atividades de capacitação para as pessoas envolvidas em atividades de navegação.

Figura 23. Alternativas para prevenir acidentes com embarcações no rio Madeira, considerando a interação com a Engenharia Naval.



Fonte: O autor.

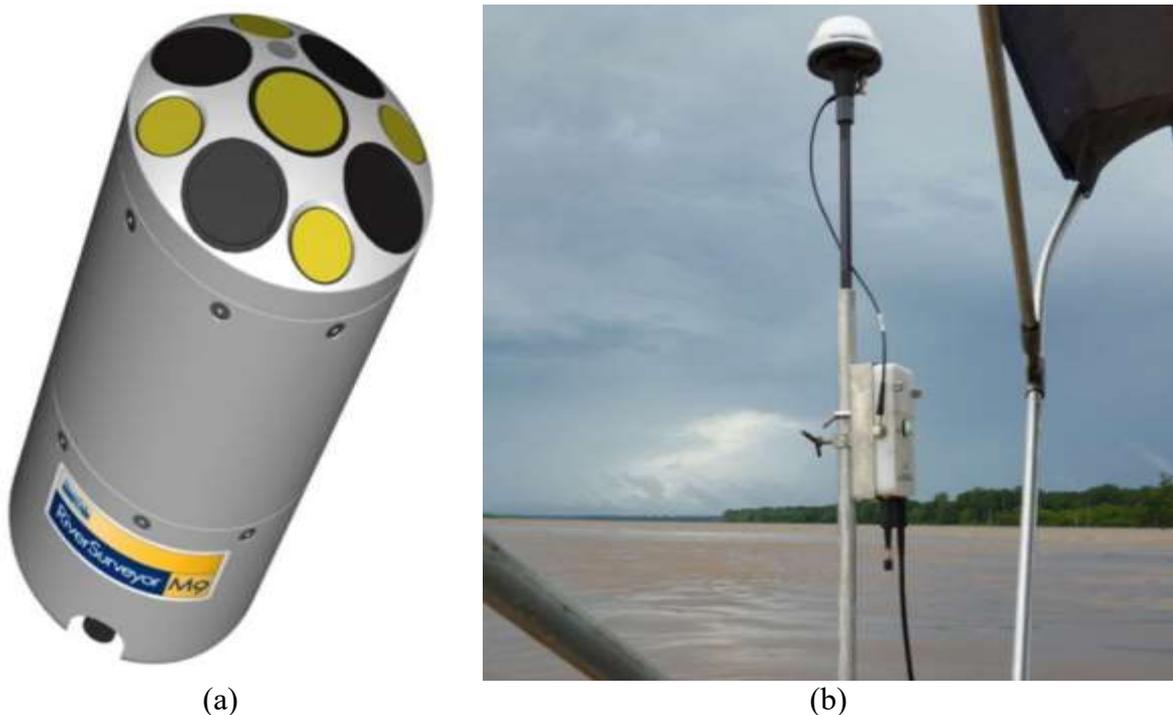
7.1. Melhorar análises batimétricas

Sabe-se que em toda hidrovia onde seja realizado transporte de cargas e pessoas, é necessário que as rotas de navegação sejam planejadas considerando as condições adequadas de calado. Embora o risco de encalhe seja menor para embarcações miúdas como lanchas, o risco aumenta para embarcações maiores como os comboios. Por não existirem obras hidráulicas para manter a geometria dos rios amazônicos invariável, existe um depósito contínuo de sedimentos em lugares não previstos que pode causar problemas de encalhe. No entanto, visa-se necessário aumentar as atividades de reconhecimento batimétrico para

contribuir na prevenção de acidentes desse tipo. Algumas alternativas recentes propostas em pesquisa de Engenharia Naval são descritas a seguir.

Análises batimétricos são comumente realizados com embarcações que realizam medições das profundidades utilizando sensores do tipo ecosonda ou ecobatímetro, ou seja, utilizando o som para mapear a profundidade dos rios. O sensor mais conhecido para este tipo de operações é o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), pois permite conhecer o perfil transversal do curso d'água (i.e., a batimetria) bem como a descarga líquida do fluxo d'água no rio (BARBOSA et al., 2013). Também, é comum utilizar sistemas de posicionamento nas embarcações para registrar as regiões de monitoramento. As Figuras 24a e 24b mostram um exemplo de sonda utilizada para medir as profundidades (ADP – Acoustic Doppler Profiler) e de um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS), respectivamente.

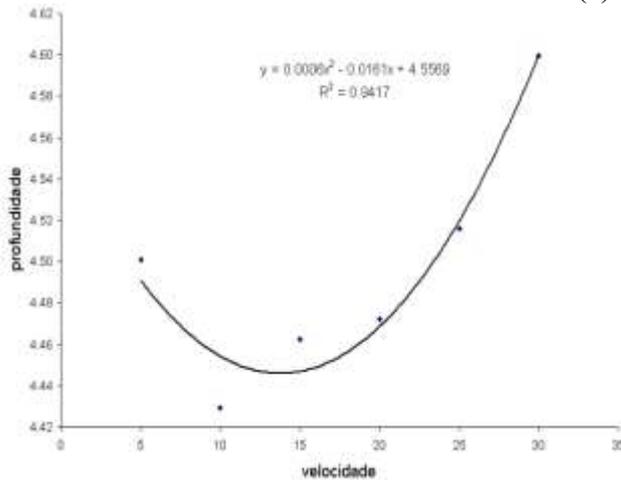
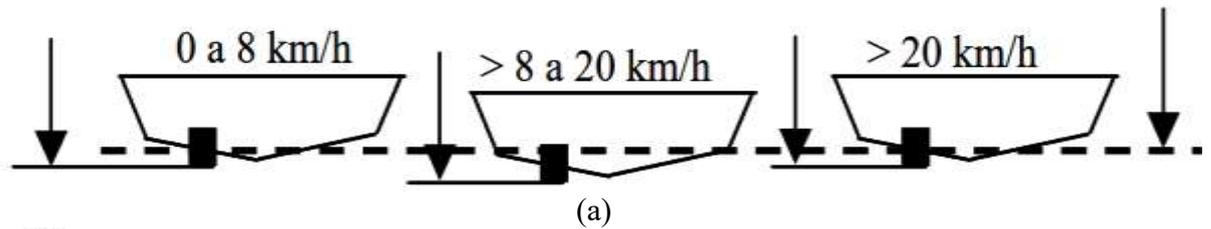
Figura 24. Exemplos de dispositivos usados em embarcações para realizar levantamentos batimétricos na região amazônica. (a) ADP modelo ADP-RiverSurveyor-M9. (b) DGPS instalado em uma embarcação.



Fonte: Barbosa et al., (2013).

É importante salientar que o uso de sistemas de monitoramento batimétrico em regiões de águas rasas pode estar sujeito a possíveis variações do calado da embarcação devido às variações de velocidade de avanço da mesma, como documentado por Barbosa et al. (2005) por meio da Figura 25a. Nessa situação é importante considerar o erro causado por essa variação no mapa gerado, sendo necessário realizar uma correção da profundidade em função da velocidade da lancha (e.g., Figura 25b).

Figura 25. Exemplo da possível variação de calado com a velocidade de avanço durante um levantamento batimétrico, influenciando possivelmente a medição do ecobatímetro, segundo a pesquisa de Barbosa et al. (2005). (a) Calado para diversas velocidades. (b) Modelo de correção da medição da profundidade em função da velocidade da embarcação, proposto para o caso específico da pesquisa de Barbosa et al. (2005).



$$P_c = P_s - (0,0006V_L^2 - 0,0161V_L)$$

Onde:

P_c = Profundidade corrigida

P_s = Profundidade sonar

V_L = Velocidade da lancha

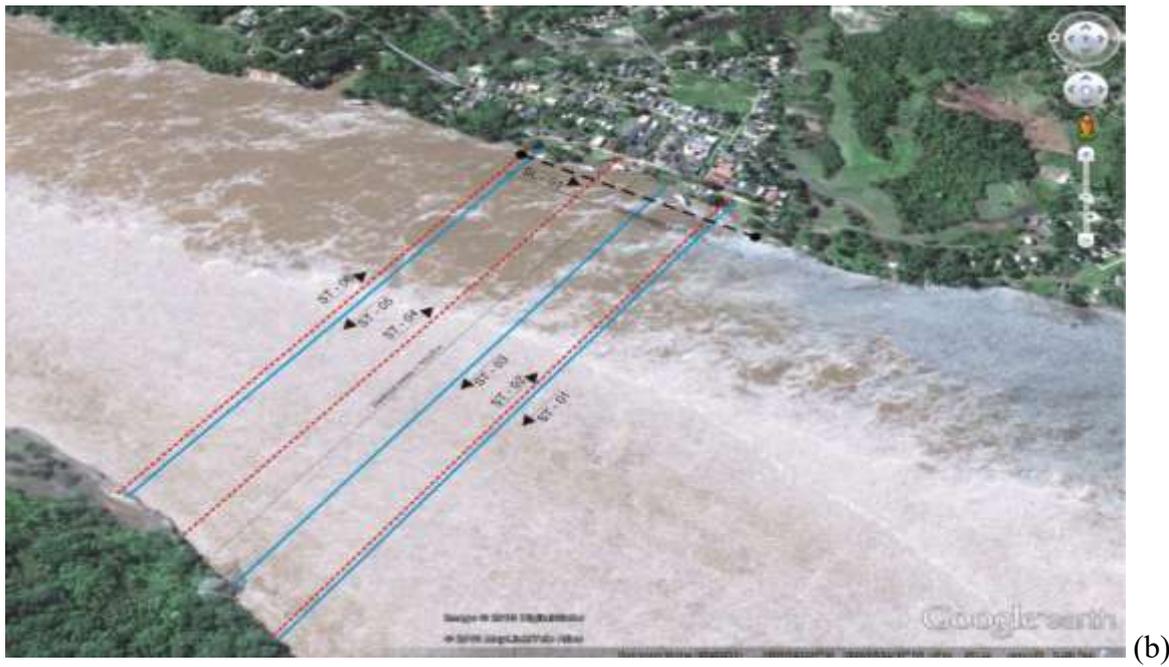
(b)

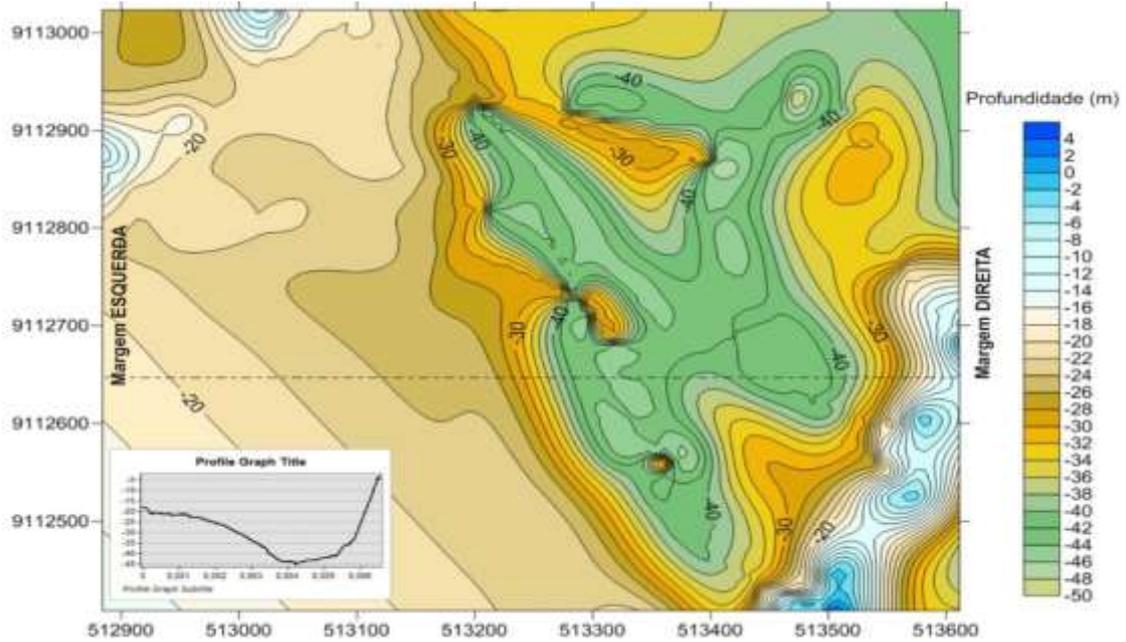
Fonte: Barbosa et al. (2005).

Embora as atividades de levantamento batimétrico tenham sido feitas em algumas regiões da Amazônia brasileira, seja por parte da Marinha, empresas privadas ou instituições de pesquisa, as dimensões da região e o contínuo transporte de sedimentos, faz com que a elaboração de cartas náuticas definitivas seja uma tarefa complicada. Alguns exemplos de levantamentos batimétricos na região amazônica têm sido feitos por Barbosa et al. (2005) para mapear lagos amazônicos (e.g., o Lago Curuai), Barbosa et al., (2013) para mapear a vazão do rio Madeira na região de Calama, e por Mácola et al. (2023) para realizar um mapa de assoreamento como apoio na navegação no Rio Tapajós, no Pará, atualizando medições de Cartas Náuticas obtidas previamente pela Marinha.

A Figura 26 ilustra a pesquisa realizada por Barbosa et al., (2013), incluindo a região de estudo (Figura 26a), a maneira como foi feita a definição das seções transversais de medição (ST's, Figura 26b) e exemplos dos resultados do perfil transversal na ST3 (Figura 26c) e do levantamento batimétrico (Figura 26d).

Figura 26. Levantamento batimétrico feito no rio Madeira por Barbosa et al., (2013). (a) Região de estudo. (b) Definição de seções transversais (ST's). (c) Exemplo de perfil transversal do rio na ST3. (d) Mapa batimétrico obtido para a área de estudo.



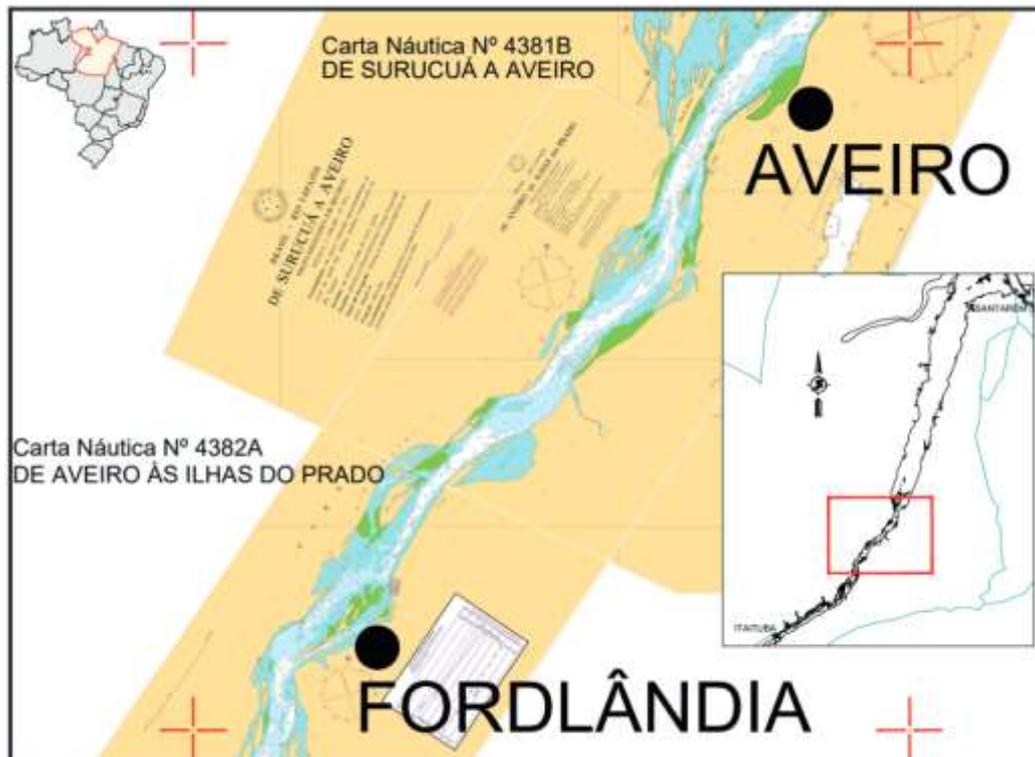


(d)

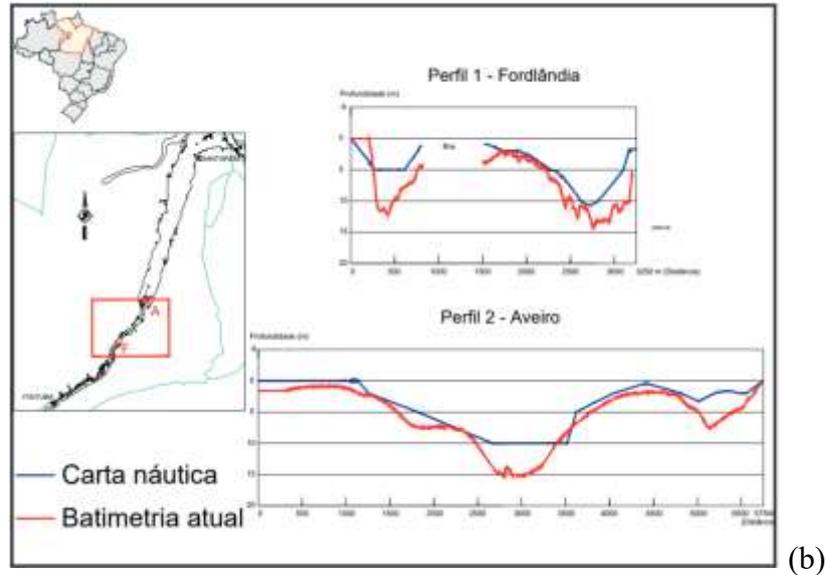
Fonte: Barbosa et al., (2013).

Por outro lado, a Figura 27 ilustra o trabalho desenvolvido por Mácola et al. (2023), no qual pode ser vista a carta náutica inicial (Figura 27a) e os resultados comparativos com as medições obtidas durante o novo levantamento (Figura 27b).

Figura 27. Levantamento feito para atualizar os dados de carta náutica existente no Rio Tapajós, Pará. (a) Carta náutica disponível antes do levantamento. (b) Comparação dos dados anteriores com os recentes. Imagem utilizada sob a licença Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



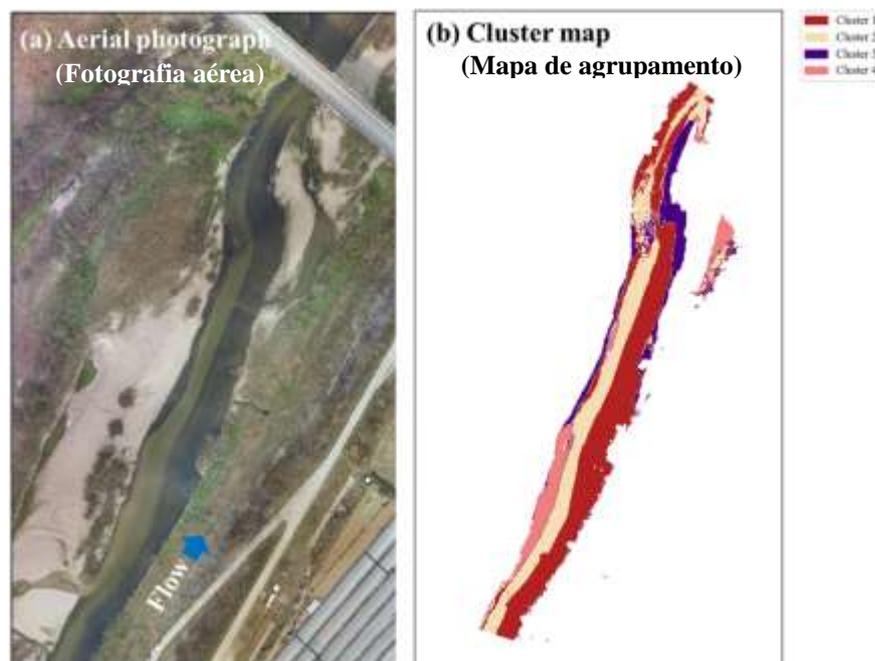
(a)



Fonte: Mácola et al. (2023).

Existem opções baseadas em avanços científicos recentes que podem ajudar nos levantamentos batimétricos do rio Madeira. Por exemplo, em regiões nos quais os rios têm pouca profundidade, pode ser utilizado sensoriamento remoto passivo para mapear a batimetria, como mostrado na Figura 28a. Essa abordagem utiliza técnicas de processamento de imagens aéreas para determinar as profundidades (Figura 28b); porém, para implementar a técnica é necessário conhecer as características do fundo (KWON et al., 2023).

Figura 28. Exemplo de análise de imagens aéreas para mapeamento batimétrico. (a) Foto aérea do rio. (b) Resultado do mapa de agrupamento por regiões caracterizadas (cluster map). Imagem usada sob a licença Creative Commons CC-BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Fonte: Kwon et al. (2023).

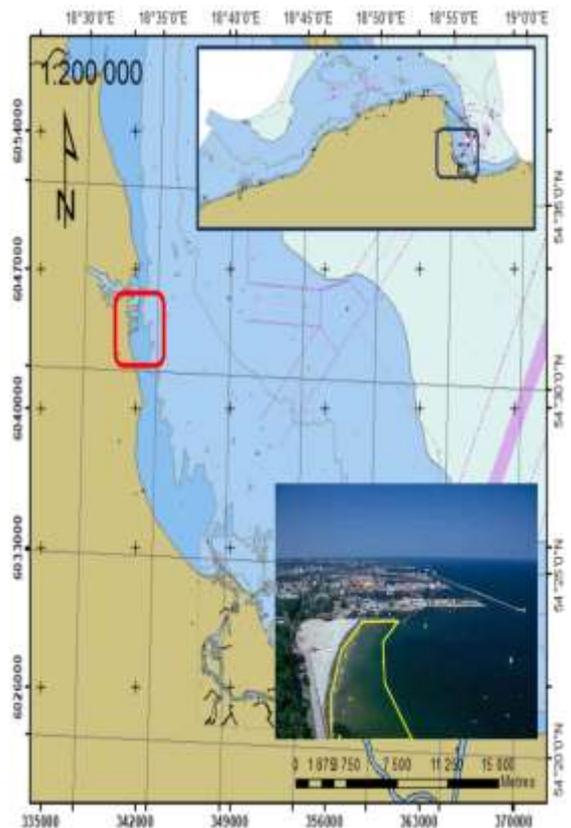
Também é importante mencionar o uso de tecnologias controladas remotamente, seja para realizar inspeções batimétricas com veículos flutuantes ou submersos. Uma pesquisa recente feita por alunos e professores da Universidade do Estado do Amazonas (FONTES et al., 2023b) mostra as possibilidades e desafios existentes para utilizar veículos remotamente controlados submersos na região amazônica. Por outro lado, já existem empresas no Brasil, como a SENVA Engenharia e Geotecnologia (SENV, 2023), que proporcionam o serviço de levantamento batimétrico usando uma embarcação de escala reduzida, equipada com sensores de posicionamento e sensoriamento para mapear profundidades em regiões de águas calmas. Essas tecnologias poderiam ser estendidas para mapear regiões de difícil acesso nos rios da Amazônia.

Um exemplo de veículo não tripulado que foi utilizado para realizar mapeamentos batimétricos na praia pública de Gdynia, na Polônia, é mostrado na Figura 29a (MAKAR, 2023). A Figura 29b mostra a região de estudo, enquanto a Figura 29c mostra a rota do percurso seguido para realizar as medições. Um exemplo das medições obtidas é apresentado na Figura 29d.

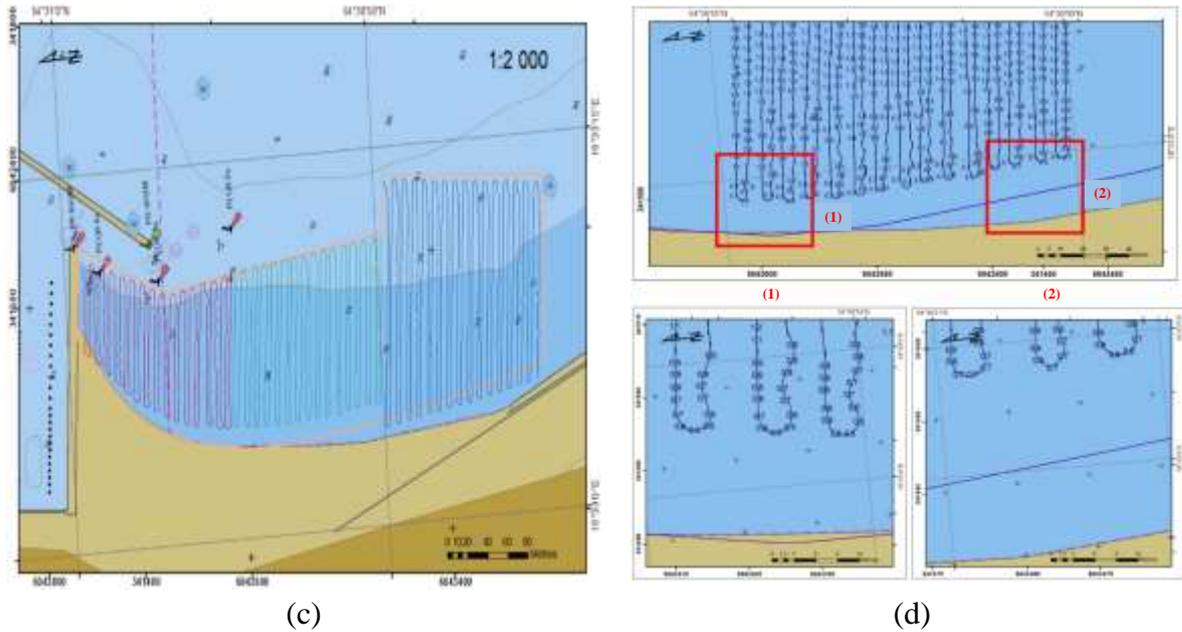
Figura 29. Exemplo de veículo não tripulado para fazer batimetrias. (a) Protótipo em operação. (b) Região de estudo. (c) Trajetórias seguidas durante a operação. (d) Detalhes das trajetórias.



(a)



(b)



Fonte: Makar (2023).

A Figura 30 mostra um exemplo de veículo de superfície não tripulado que foi testado para realizar levantamentos hidrográficos em águas rasas ao longo da costa de Portugal por Constantinoiu et al. (2023). Dentre as atividades de levantamento hidrográfico que esse tipo de embarcações pode realizar, encontram-se os levantamentos de portos, monitoramento de praias e litoral, avaliação ambiental; operações militares, dentre outras. O mapeamento batimétrico também pode ser realizado utilizando os sensores adequados.

Figura 30. Exemplo de embarcação de superfície não tripulada que pode ser utilizada para realizar levantamentos batimétricos de maneira remota.



Fonte: Constantinoiu et al. (2023).

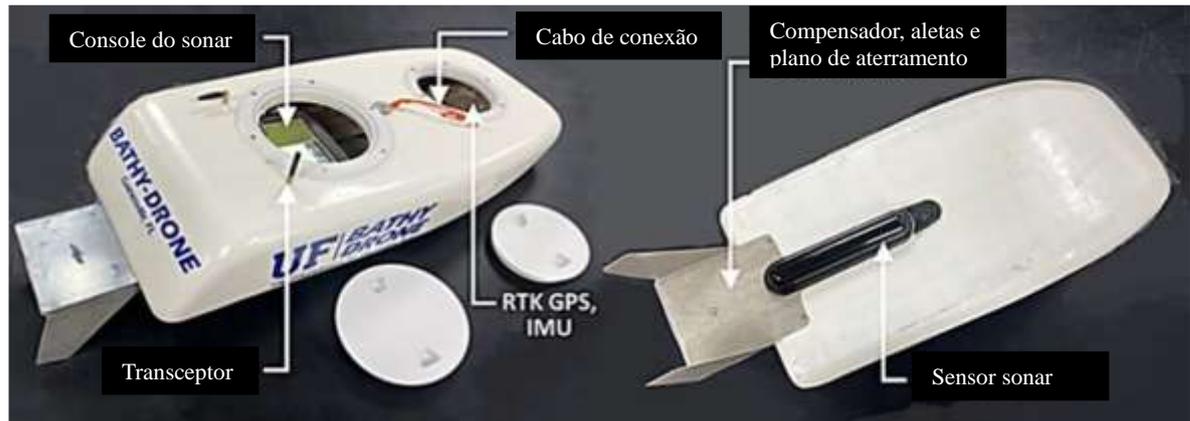
Outra inovação recente consiste no desenvolvimento de um sistema baseado em drone para mapeamento subaquático (batimetria) chamado “Bathy-drone” (Figura 31a), desenvolvido na Universidade da Flórida (DIAZ et al., 2022). O sistema é formado por um drone que arrasta, por meio de uma corda ou cabo, uma pequena embarcação de superfície d’água seguindo um padrão raster. A embarcação está equipada com uma unidade de sonar comercial que permite fazer varreduras laterais e inferiores (Figura 31b). Além disso, a unidade pode registrar dados de sonar referenciados por GPS a bordo ou transmitidos em tempo real através de um link de telemetria. Os dados obtidos podem então ser recuperados após os levantamentos e plotados de várias maneiras.

Dentre as vantagens que o Bathy-drone apresentou em comparação com os métodos convencionais, podem-se destacar a capacidade de iniciar levantamentos colocando a plataforma na água, o baixo custo, peso leve, volume baixo, coleta de dados do drone em velocidades de 0–24 km/h, permitindo seu uso em águas com correntes rápidas. Não existem hélices nem superfícies de controle debaixo da água, contribuindo para que a embarcação não fique presa na vegetação flutuante, podendo ser arrastada sobre bancos de areia. Como resultado da pesquisa, cabe mencionar que foi pesquisada uma área de mais de 10 acres usando o drone Bathy com só uma carga de bateria, em menos de 25 minutos (Figuras 31c e 31d).

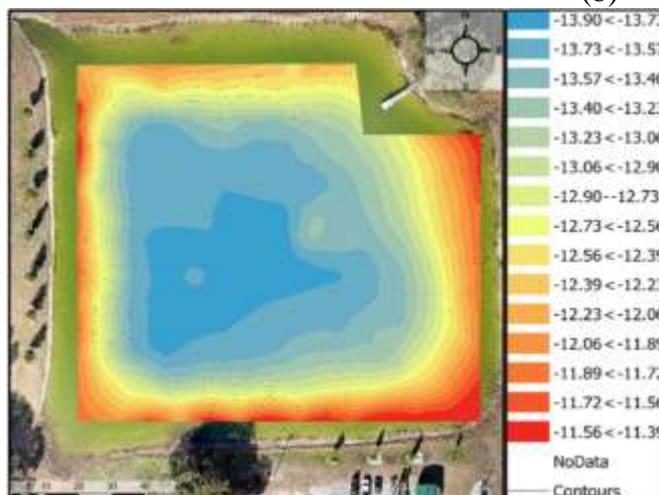
Figura 31. O sistema de mapeamento batimétrico “Bathy-drone”. (a) Foto do drone rebocando o veículo de superfície. (b) Detalhes do veículo de superfície. (c) Regiões de profundidade interpoladas. (d) Linhas de contorno obtidas. Imagens usadas sob a licença Creative Commons CC-BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



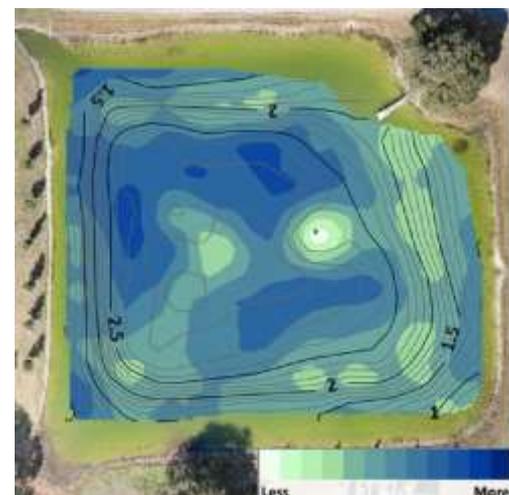
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Diaz et al. (2022).

7.2. Aumentar monitoramento e sinalização

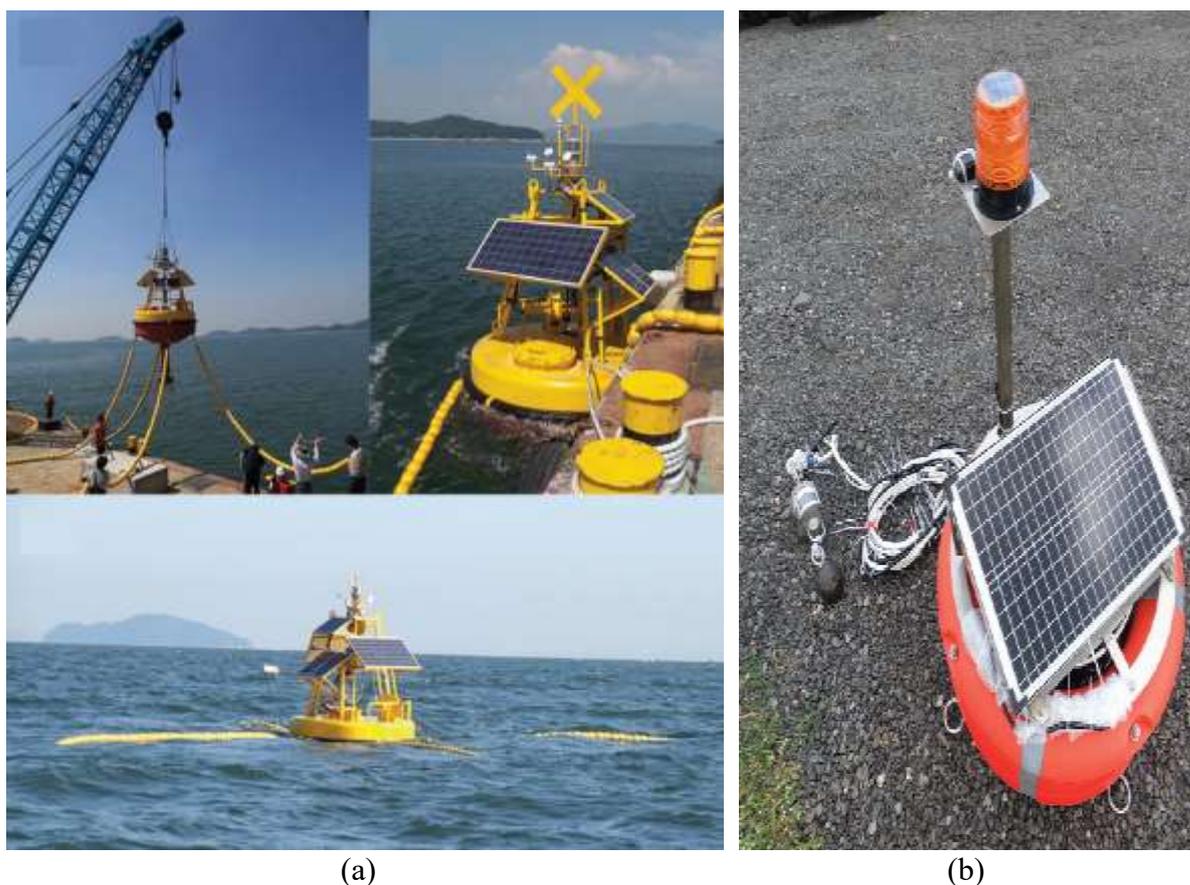
Devido a região amazônica ser muito extensa territorialmente, é complexo em termos de planejamento econômico e socioambiental, realizar uma completa sinalização dos rios navegáveis, assim como monitorar as principais variáveis físicas dos rios. Principalmente, é importante considerar que a maioria dos dispositivos de suporte à navegação (sinalização) e de monitoramento de variáveis físicas precisam de energia elétrica para funcionar, a qual é escassa em diversas regiões do interior nas quais não há comunidades humanas. Nessa situação, o uso de energias renováveis, tais como a solar, a causada pelas correntezas, e a eólica, pode contribuir no desenvolvimento de dispositivos de sinalização que possam ter uma vida útil prolongada. Além disso, os dispositivos controlados remotamente, ou seja, não tripulados, podem ser alternativas para proporcionar sinalização e monitorar variáveis físicas dos rios em zonas remotas ou de difícil acesso.

Alternativas conhecidas como sistemas de boias inteligentes estão sendo desenvolvidas para monitoramento de variáveis oceânicas (AMAECHEI; WANG; YE, 2022; JIN et al., 2021).

A Figura 32a mostra um exemplo de boia inteligente desenvolvida para monitoramento de variáveis costeiras por Jin et al. (2021). Pode-se observar que a boia utiliza um sistema de ancoragem e que é alimentada principalmente por energia solar. A boia pode ser equipada com diversos sistemas de medição de movimentos e variáveis oceânicas, as quais podem ser transmitidos via satélite, como mostrado em Jin et al. (2021), ou armazenados para análise posterior.

Por outro lado, a Figura 32b mostra um exemplo de uma boia menor, que foi desenvolvida por Lu et al. (2022) para realizar monitoramento da qualidade da água em sistemas de aquicultura. Como mostrado na publicação de Lu et al. (2022), a boia utiliza hardware e circuitos de baixo custo, o que faz dela uma alternativa prática para realizar atividades de monitoramento em grande escala.

Figura 32. Alguns exemplos de boias inteligentes publicados recentemente na literatura científica. (a) Fases de instalação e ancoragem de uma boia chamada INBUS-2 para monitoramento costeiro. (b) Exemplo de boia de baixo custo com sistema de inteligência artificial para monitoramento de sistemas de aquicultura. Imagens usadas sob licença Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

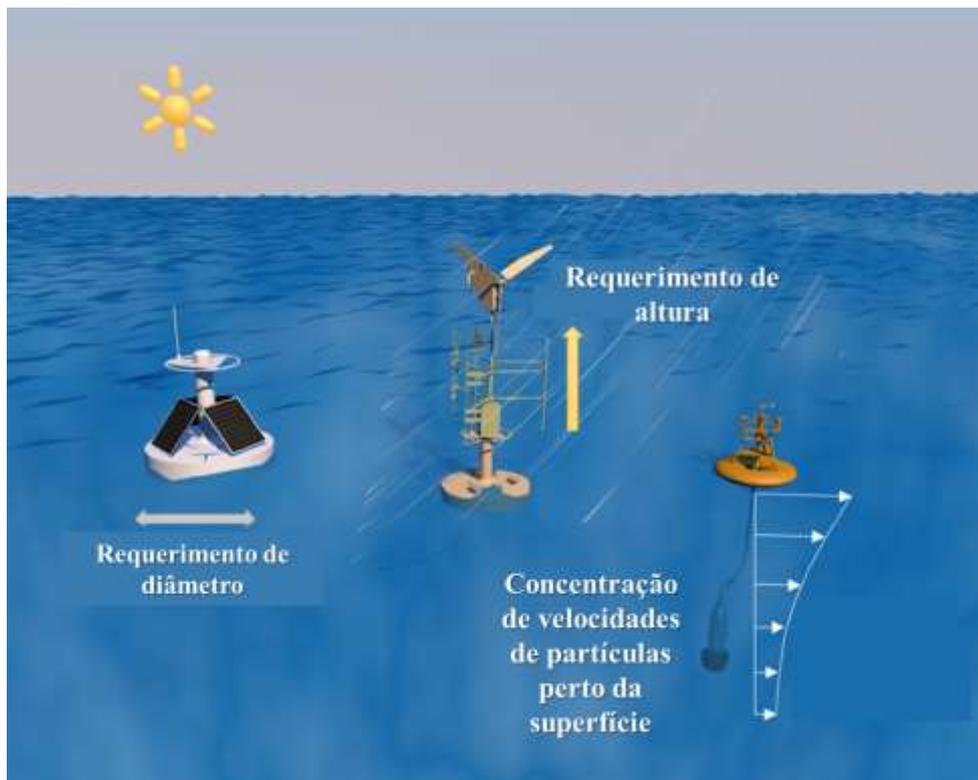


(a) Fonte: (a) Jin et al. (2021); (b) Lu et al. (2022).

Tecnologias similares como as que são mostradas na figura anterior poderiam ser estendidas para contribuir com as atividades de sinalização e monitoramento de variáveis físicas e químicas na região amazônica, contribuindo significativamente com as atividades de

navegação no rio Madeira e hidrovias com os mesmos problemas. No entanto, é importante levar em consideração os principais desafios em termos de alimentação de energia que precisam desses sistemas, como apresentado por Wang et al. (2022) e ilustrado na Figura 33. Wang et al. (2022) descreve que o uso de sistemas inteligentes alimentados com energias alternativas tem algumas limitações que precisam ser consideradas no planejamento de projetos do tipo. Por exemplo, o uso de painéis solares requer de áreas mais extensas do corpo flutuante; porém, aumentar a área (e.g., diâmetro) pode causar mudança no comportamento hidrodinâmica em ondas. Também existem restrições de profundidade para instalar os dispositivos e variação significativa das velocidades da água perto da superfície livre. Os autores apresentaram outros fatores a serem considerados com boias alimentadas com energias das ondas.

Figura 33. Diagrama mostrando os principais desafios de engenharia correspondentes a vários sistemas de energia em bóias. Imagem usada sob licença Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Fonte: Wang et al. (2022).

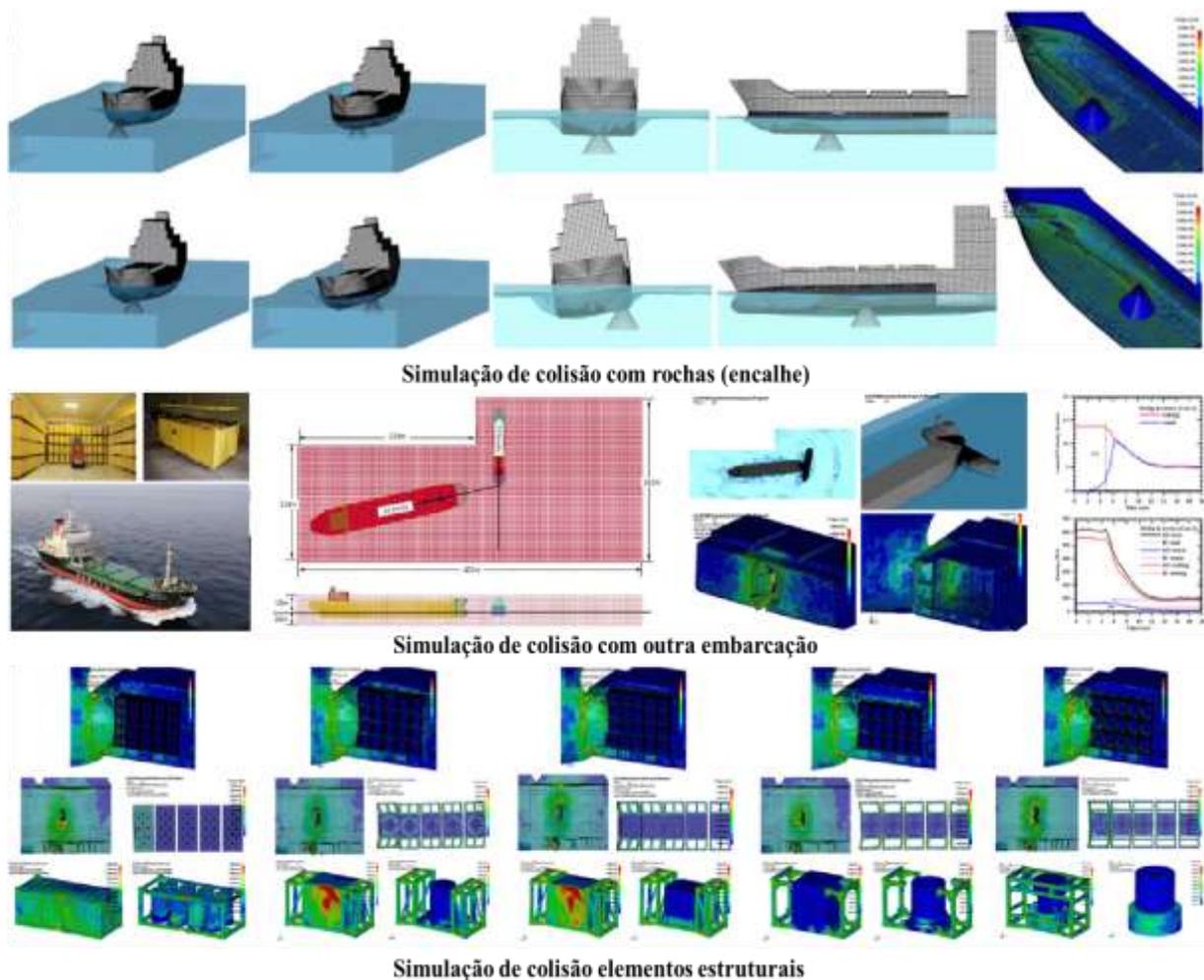
Alternativas aos sistemas flutuantes de monitoramento e sinalização são os dispositivos fixos, os quais também poderiam ser pensados para uso na região amazônica. Como descrito por Neto et al. (2023), além do uso da energia solar, o uso da energia das correntezas ou do vento poderia ser utilizada na região. Tal energia poderia ser utilizada para ativar dispositivos de sinalização, como luzes ou avisos, sendo uma opção para o futuro.

7.3. Avaliação de riscos estruturais

Avanços recentes na simulação computacional permitem avaliar diversas condições de carregamento nas estruturas, de maneira que possam ser previstos os danos estruturais nas embarcações devido a colisões com o fundo dos corpos d'água. Tipicamente, na área estrutural da Engenharia Naval é possível realizar esse tipo de estudos por meio de uso de ferramentas de simulação que utilizam o Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite Element Method*).

Alguns exemplos das análises estruturais da Engenharia Naval que envolvem o problema de colisão de embarcações e encalhe e que podem ser feitas com FEM são ilustradas na Figura 34. Dentre eles, podem-se mencionar a simulação do impacto de embarcações com rochas ou bancos de areia, a simulação do impacto com corpos fixos ou flutuantes agindo na superfície da água, assim como os efeitos do impacto nos elementos estruturais secundários.

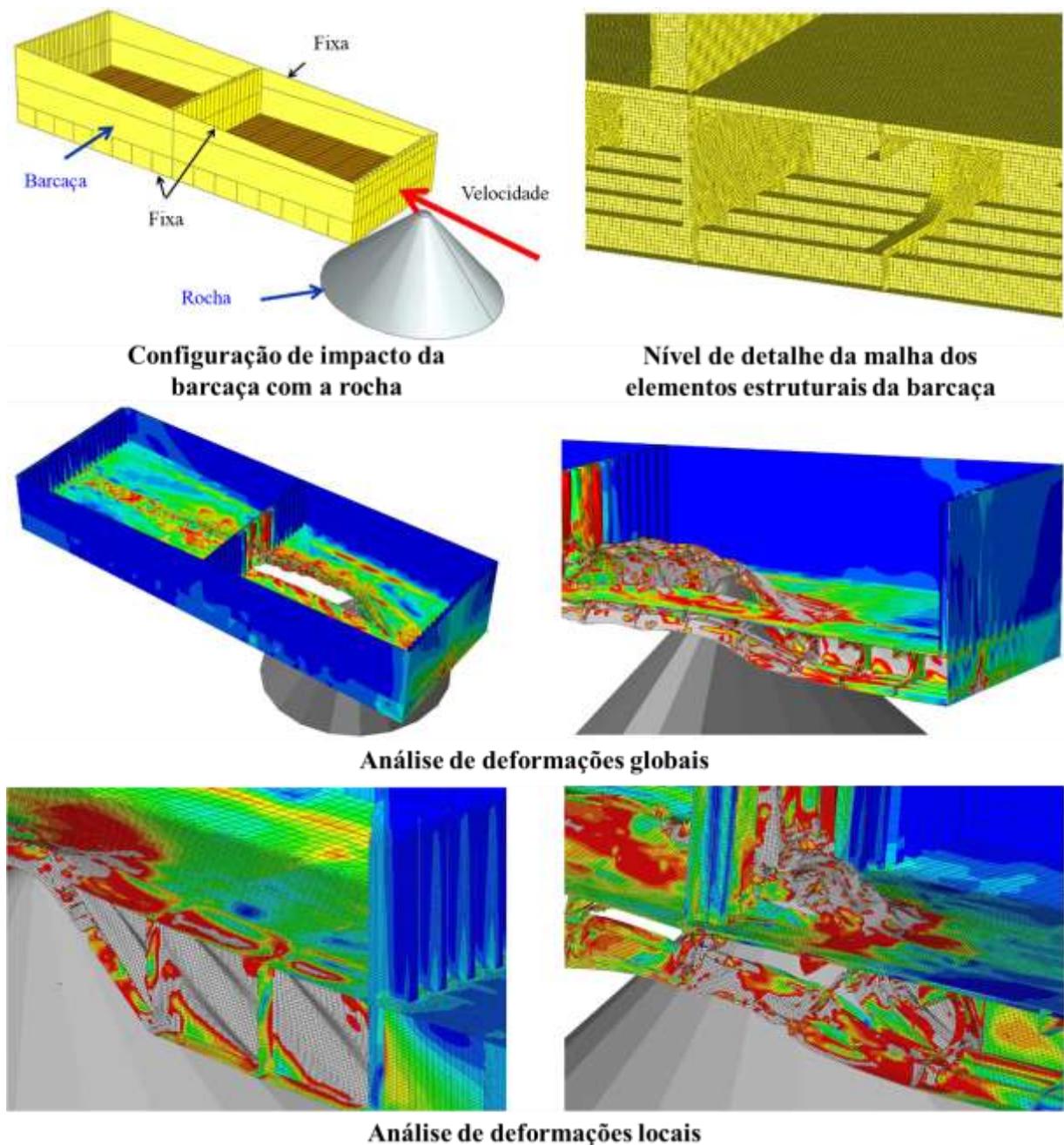
Figura 34. Tipos de simulações estruturais que podem ser realizadas com o Método dos Elementos Finitos para avaliar o problema de colisão, incluindo os efeitos do encalhe na embarcação. Figuras usadas sob a licença Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Fonte: Lee et al. (2017).

Com relação à modelagem do problema de encalhe de embarcações, o qual é bem comum no rio Madeira, Hareide et al. (2013) descreveram aspectos importantes para avaliar esse problema. A Figura 35 ilustra os resultados da pesquisa de Hareide et al. (2013), onde pode se observar a configuração inicial da análise, considerando a estrutura fixa e um elemento cônico interagindo com uma velocidade de avanço com a estrutura. Na pesquisa de Hareide et al. (2013) é possível visualizar as deformações globais e locais nos elementos estruturais do fundo da estrutura, como mostrado na Figura 35.

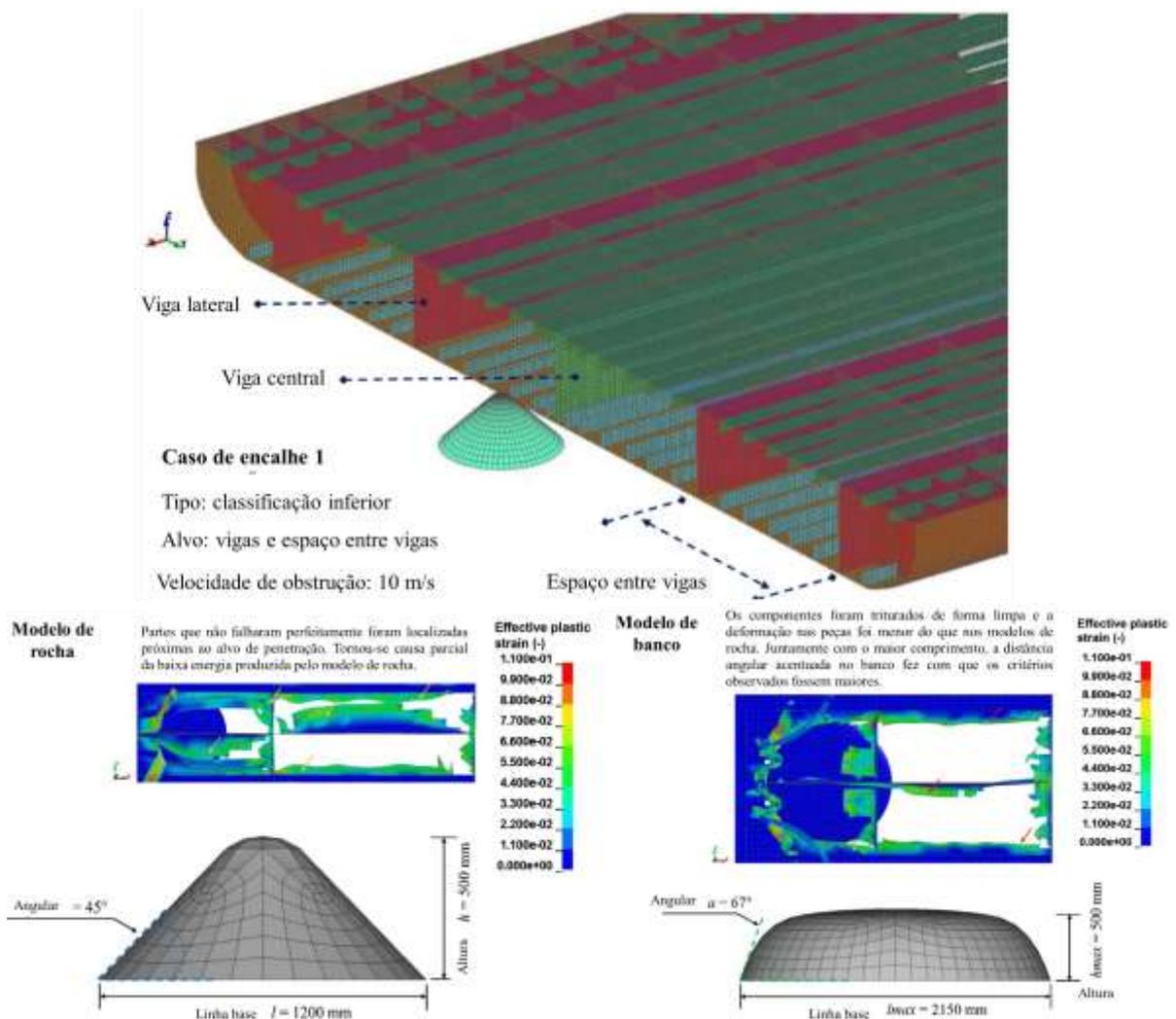
Figura 35. Exemplo de análise do problema de encalhe usando simulação pelo Método de Elementos Finitos. Imagens usadas a partir de um documento de livre acesso no domínio público.



Fonte: Hareide et al. (2013).

Recentemente, estão sendo feitas análises similares, variando as velocidades e elementos estruturais de impacto. Por exemplo, Prabowo et al. (2020) apresentou os resultados de simulações estruturais considerando diferentes elementos de impacto para avaliar as colisões com relação a rochas e bancos de areia, como mostrado na Figura 36. Na figura podemos observar que o estudo foi focado em avaliar os danos estruturais da parte do fundo de uma embarcação, considerando principalmente as vigas e o espaço entre vigas. A velocidade de obstrução foi 10 m/s, sendo considerados dois elementos de impacto diferentes, com ângulo de encontro α de 45° e 67° , para simular os impactos com rocha e banco de areia (*shoal*), respectivamente. A figura também mostra alguns dos resultados da deformação causada no fundo após ambas as simulações, onde pode ser verificado que os danos simulados são diferentes.

Figura 36. Exemplo de análise estrutural para avaliar os efeitos estruturais causada pela colisão de uma embarcação com uma rocha e um banco de areia. Imagens utilizadas sob licença Creative Commons CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Fonte: Prabowo et al. (2020).

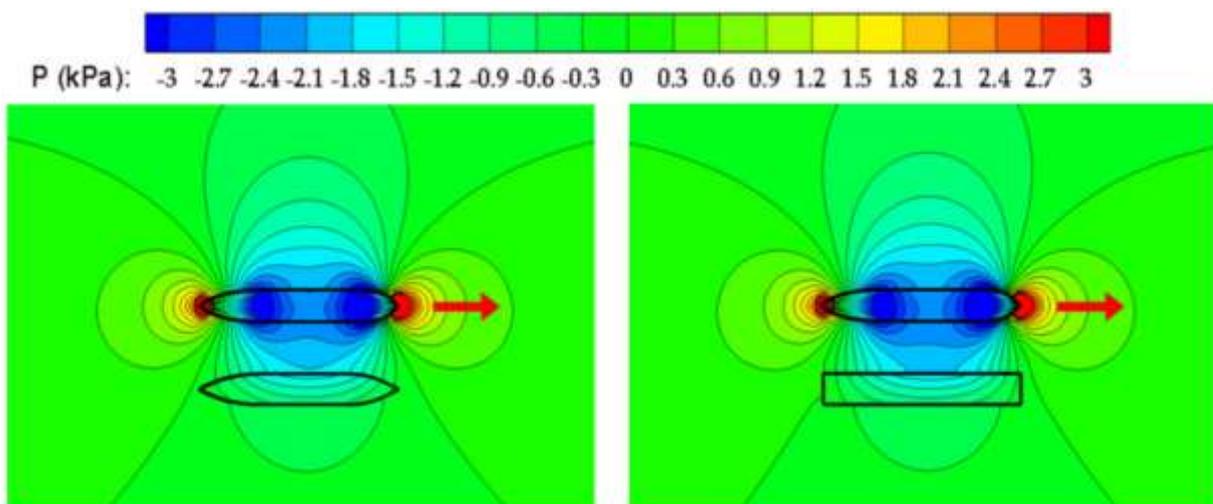
7.4. Avaliação da hidrodinâmica de embarcações

Além da parte de análise de riscos estruturais descrita na seção anterior, é importante acrescentar o entendimento do comportamento hidrodinâmico das embarcações que operam no rio Madeira. Na Engenharia Naval, estudos hidrodinâmicos permitem conhecer diversos aspectos, incluindo a resistência ao avanço, a capacidade de realizar manobras, o comportamento em ondas geradas na superfície da água (e.g., as causadas por algum temporal), comportamento da embarcação em condições de avaria, dentre outras análises.

Para realizar análises hidrodinâmicas, além de contar com estudos experimentais para compreender a física dos problemas, precisa-se simular o comportamento do fluido utilizando diversos tipos de modelagens, sendo a mais recomendada a fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), que usa as Equações de Navier-Stokes para modelar o comportamento do fluido considerando os efeitos da viscosidade. Outras abordagens usam métodos potenciais, os quais desprezam a viscosidade da água nas análises. Diversas abordagens têm sido apresentadas na literatura para avaliar aspectos hidrodinâmicos de embarcações em hidrovias.

A Figura 37 mostra os resultados de um exemplo do caso de uma embarcação passando perto de uma barcaça, como feito por Park et al. (2021). A figura mostra os campos de pressão entre as embarcações. O estudo foi realizado para avaliar esse efeito em uma barcaça ancorada em águas rasas. Esse tipo de estudo poderia ser estendido para avaliar efeitos de embarcações passando perto de estruturas flutuantes na região amazônica.

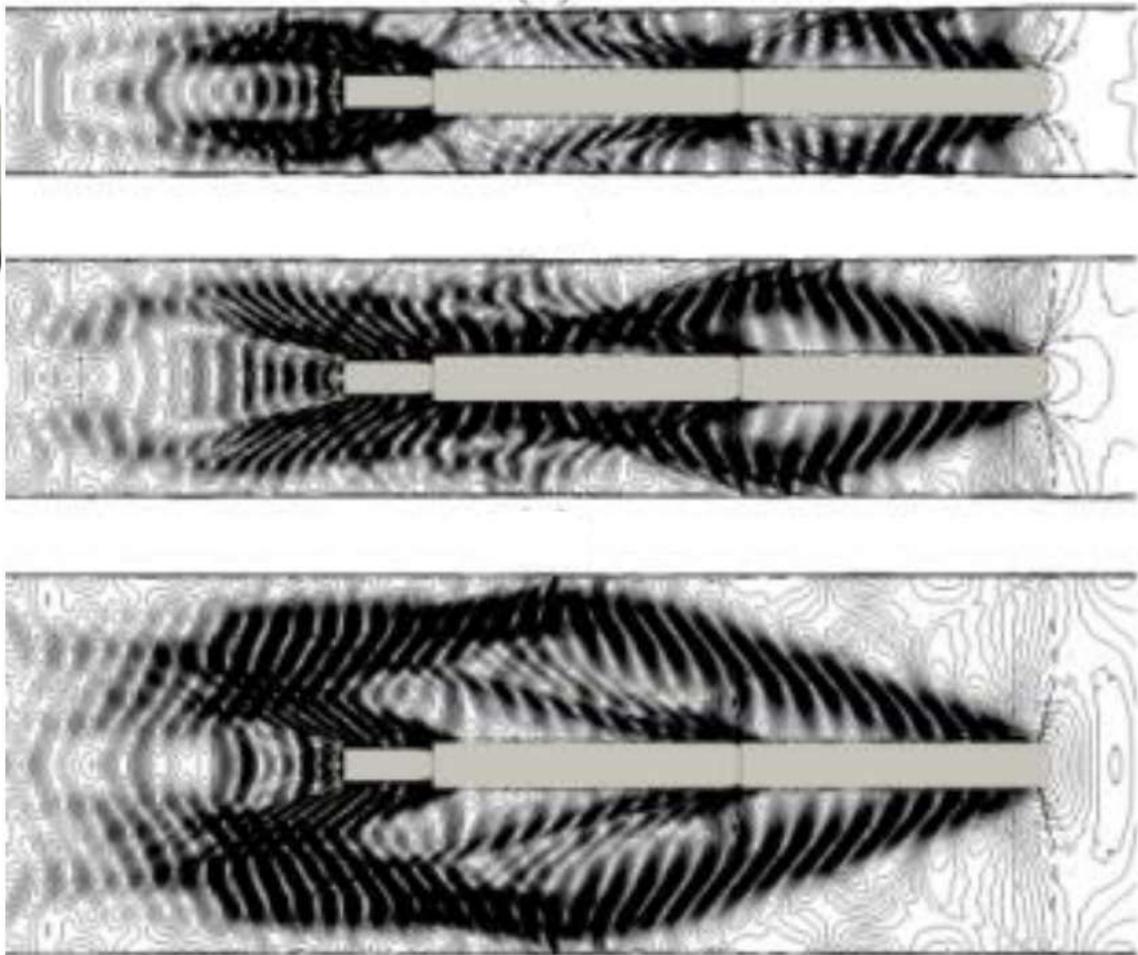
Figura 37. Exemplo do campo de pressão (P) gerado quando duas embarcações se aproximam (resultados de uma simulação de fluidodinâmica computacional).



Fonte: Park et al. (2021).

Outro exemplo de aplicação que pode ser feito consiste em avaliar a influência de diversas condições do canal dos rios (e.g., variação de boca e calado) nas variáveis hidrodinâmicas. Como exemplo, a Figura 38 mostra alguns padrões de onda que são gerados por um comboio rebocador-barcaças variando a boca do canal.

Figura 38. Exemplo de estudo hidrodinâmico do trem de ondas gerado quando um comboio navega em águas restritas. No estudo foi avaliada a influência da variação da boca do canal na geração de ondas. Imagem usada sob licença Creative Commons.



Fonte: Li et al. (2021).

Com relação à estabilidade, é importante estudar a estabilidade intacta e em avaria, pois as colisões podem avariar o casco, permitindo a entrada de água em espaços internos. Pesquisas experimentais recentes, como a apresentada por Valanto (2023), Figura 39, têm sido feitas para avaliar este problema. No trabalho de Valanto (2023) foram pesquisadas as condições de sobrevivência de uma embarcação Ro-Pax devido à inundação de alguns dos seus compartimentos. Estudos de alagamento também têm sido pesquisados de maneira numérica, utilizando métodos de fluidodinâmica computacional, como descrito no trabalho de Aziz et al.(2022a).

Figura 39. Imagens dos experimentos feitos em uma embarcação Ro-Pax para avaliar os efeitos de inundação de espaços internos nos movimentos. Imagens usadas sob a licença Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Fonte: Valanto (2023).

7.5. Acrescentar atividades de capacitação

A região amazônica é uma região ainda em desenvolvimento, pelo que é necessário acrescentar as atividades de capacitação relacionadas com a Engenharia Naval e o transporte hidroviário. Tais atividades podem ser feitas desde o ponto de vista de operação de embarcações e de atendimento emergencial caso ocorra algum acidente.

Segundo a literatura internacional (CORADDU et al., 2020; HANZU-PAZARA et al., 2008; SEPEHRI et al., 2021), grande parte dos acidentes com embarcações ocorrem devido a erros humanos, sugerindo que sejam implementadas frequentemente atividades de capacitação dos tripulantes.

Por outro lado, também é necessário incentivar a divulgação de conhecimento técnico e científico relacionado com os fatores que podem afetar a segurança à navegação. Da mesma maneira, visa-se necessário acrescentar o conhecimento e a capacitação com tecnologias emergentes que possam contribuir com o estudo das condições das hidrovias e o comportamento hidrodinâmico e estrutural das embarcações.

7.6. Sugestões para implementação

É notável a necessidade de planejar ações e estratégias que permitam a implementação das cinco alternativas mencionadas nas subseções anteriores ao curto e longo prazo na região amazônica.

Análises batimétricas. Este tipo de atividades pode ser planejado em conjunto com a indústria e outras grandes áreas da engenharia, incluindo a civil, cujo campo de estudo esteja relacionado com a variação da geomorfologia e hidrodinâmica dos rios. Além da implementação dos métodos tradicionais de levantamento batimétrico, usando embarcações, podem ser pensados projetos interdisciplinares que considerem técnicas de levantamento usando satélites e possivelmente tecnologias de exploração subaquática.

Monitoramento e sinalização. O custo de operação e manutenção de boias e estações de monitoramento convencionais pode ser bastante elevado. Devido à extensão dos rios da Amazônia, o desenvolvimento de conjuntos de dispositivos de baixo custo de produção e de manutenção, tais como mini boias flutuantes construídas com sensores de baixo custo, podem ser opções viáveis. Com esse tipo de dispositivos seria possível acrescentar o conhecimento de diversas variáveis físicas ao longo dos rios. Além disso, caso seja possível aproveitar energias renováveis, tais dispositivos podem servir como meios de sinalização.

Análises técnico-científicas relacionadas com estruturas e hidrodinâmica. É sabido que o curso de Engenharia Naval é recente no estado do Amazonas, pelo que as atividades de pesquisa em alto nível ainda precisam de investimento em infraestrutura para realizar estudos numéricos e experimentais na região. Os estudos de otimização estrutural e hidrodinâmica podem requerer o uso de diversos equipamentos de análise e processamento de dados que permitam realizar análises complexas. Além disso, toda análise analítica e numérica precisará de dados experimentais para validação, pelo que se requer investimento em laboratórios de análise hidrodinâmico e estrutural.

Atividades de capacitação. Com relação às atividades de capacitação, cabe mencionar que a região amazônica conta com uma grande variedade de estaleiros e empresas de navegação que implementam procedimentos baseados nas normativas aplicáveis. No entanto, nem todas as embarcações que operam na região amazônica estão regularizadas, sendo possível que a tripulação dessas embarcações não tenha recebido a capacitação adequada. Propõe-se a participação da academia e indústria para estender as atividades de capacitação técnica em diversas comunidades da região amazônica. Sugere-se o uso da mídia e tecnologias digitais que permitam a divulgação das informações relacionadas com capacitação em atividades da indústria naval e de navegação.

8. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como finalidade principal apresentar a problemática dos acidentes que ocorrem no cotidiano do rio Madeira. O trabalho incluiu uma análise qualitativa dos acidentes mais comuns, assim como uma análise quantitativa dos acidentes documentados nos relatórios da Marinha do Brasil (IAFNs) durante os últimos cinco anos. Também, baseado em pesquisa bibliográfica, foram propostos alguns dos principais desafios e alternativas de solução que podem ser tratados pela Engenharia Naval regional.

Na análise quantitativa, foram avaliados dados representativos desses eventos, por meio dos acidentes documentados através dos IAFNs. Com esses dados, foi possível fazer análises de quais tipos de embarcações se envolvem com maior frequência em acidentes no rio Madeira e quais tipos de acidentes mais frequentes nele.

Na pesquisa, verificou-se que os tipos de acidentes mais comuns no Madeira, foram o abalroamento, naufrágio, queda de pessoas na água e colisão, sendo o comboio de empurrador com balsa, o tipo de embarcação mais envolvida nesses acidentes. Devido à significância da ocorrência de acidentes ainda na atualidade, fica evidente a necessidade de proporcionar uma maior atenção para divulgar e implementar normas e regulações marítimas.

Ainda existem desafios que a Engenharia Naval precisa considerar no planejamento de estratégias de melhora da navegação e prevenção de acidentes fluviais no rio Madeira e em regiões similares. Dentre eles, podem-se mencionar o transporte de sedimentos e a turbidez da água, as variações do nível da água, a deficiência da acessibilidade de pessoas e cargas nas embarcações, e a falta de atividades de monitoramento e sinalização das vias navegáveis.

Finalmente, foram propostas algumas alternativas de prevenção de acidentes e melhoramento das atividades navais na região, nas quais a Engenharia Naval pode contribuir. Tais alternativas estão relacionadas com o melhoramento das análises batimétricas e de outros parâmetros físicos das vias navegáveis; aumento no monitoramento e sinalização durante o dia e a noite usando, por exemplo, dispositivos autônomos e alimentados por energias renováveis; avaliação de riscos estruturais das embarcações usando métodos de análise estrutural; estudo de comportamento hidrodinâmico das embarcações; e aumento de atividades de capacitação das pessoas relacionadas com a indústria naval regional.

Espera-se que o presente trabalho possa contribuir na literatura relacionada com a problemática de acidentes de navegação no rio Madeira e outras regiões similares.

REFERÊNCIAS

ACRE. **Notícias do Acre. Ponte do Abunã, sobre o Rio Madeira, será inaugurada nesta sexta.** Disponível em: <<https://agencia.ac.gov.br/ponte-do-abuna-sobre-o-rio-madeira-sera-inaugurada-nesta-sexta/>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

ADAMY, A. **Dinâmica fluvial do rio Madeira.** Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/17138/1/Dinamica%20fluvial%20do%20Rio%20Madeira.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

ALMEIDA, F. O. DE; MONGELÓ, G. Introdução: Arqueologia dos ‘pioneiros’ e da diversidade do alto rio Madeira. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências humanas**, v. 15, p. e20190080, 2020.

AMAECCHI, C. V.; WANG, F.; YE, J. Numerical studies on CALM buoy motion responses and the effect of buoy geometry cum skirt dimensions with its hydrodynamic waves-current interactions. **Ocean Engineering**, v. 244, p. 110378, 2022.

ANA. **Agência Nacional das Águas. Caderno de recursos hídricos.** Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em: 2 maio. 2023.

AZIZ, G. M. P. A. et al. Rumo à prevenção de acidentes com embarcações na região amazônica. Parte I: acidentes comuns e métodos de avaliação recentes: Towards prevention of ship accidents in the amazon region. Part I: common accidents and recent evaluation methods. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 75973–75995, 2022a.

AZIZ, G. M. P. A. et al. Rumo à prevenção de acidentes com embarcações na região amazônica. Parte II: as tecnologias 4.0 como alternativas: Towards prevention of ship accidents in the amazon region. Part II: 4.0 technologies as alternatives. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 75950–75972, 2022b.

BARBOSA, C. C. F. et al. **Imagens TM como suporte ao levantamento batimétrico de lagos amazônicos.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoiamento Remoto. **Anais...** Em: ANAIS XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSOIAMENTO REMOTO. Goainia, Brasil: INPE, 2005.

BARBOSA, F. DE A. DOS R. et al. **Levantamento batimétrico e medição de vazão do rio Madeira no distrito de Calama.** XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Em: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Bento Gonçalves, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.

CONSTANTINOIU, L.-F.; BERNARDINO, M.; RUSU, E. Autonomous Shallow Water Hydrographic Survey Using a Proto-Type USV. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 4, p. 799, 2023.

CORADDU, A. et al. Determining the most influential human factors in maritime accidents: A data-driven approach. **Ocean Engineering**, v. 211, p. 107588, 2020.

DE MATTOS, J. D. F. B. ABALROAMENTO AÉREO. **Revista da Faculdade de Direito UFPR**, v. 3, 1955.

DIAZ, A. L. et al. The Bathy-Drone: An autonomous uncrewed drone-tethered sonar system. **Drones**, v. 6, n. 10, p. 294, 2022.

DNIT. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Hidrovia do Madeira.** Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/old/hidrovia-do-madeira>>. Acesso em: 20 maio. 2023.

DORIA, C. R. DA C. et al. A pesca comercial na bacia do rio Madeira no estado de Rondônia, Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 42, p. 29–40, 2012.

DPC. **Regulamento Internacional para Evitar Abalroamento no Mar - RIPEAM.** Disponível em: <<https://www3.dpc.mar.mil.br/portagevi/publicacoes/colreg/Ripeam.pdf>>. Acesso em: 29 maio. 2023.

EMRONDONIA. **Draga afunda no Rio Madeira e deixa morto e desaparecidos.** Disponível em: <<https://www.emrondonia.com/porto-velho/draga-afunda-no-rio-madeira-e-deixa-morto-e-desaparecidos/>>. Acesso em: 4 jul. 2023.

EXTRA. **Carro apoiado em pedaço de madeira entra em embarcação no Amazonas, e vídeo viraliza; assista.** Disponível em: <<https://extra.globo.com/noticias/brasil/carro-apoiado-em-pedaco-de-madeira-entra-em-embarcacao-no-amazonas-video-viraliza-assista-25565216.html>>. Acesso em: 2 ago. 2023.

FEARNSIDE, P. M. As barragens e as inundações no rio Madeira. **Ciência Hoje**, v. 53, n. 314, p. 56–57, 2014.

FILHO, L. **Uma análise dos mercados de rebocadores portuários. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.** Dissertação de Mestrado—Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

FONTES, J. V. 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, 2023a.

FONTES, J. V. et al. Challenges and alternatives for unmanned underwater vehicular research in the Amazon basin: towards a more sustainable management of water resources and the environment. **Water and Environment Journal**, 2023b.

FONTES, J. V. H. et al. Marine Accidents in the Brazilian Amazon: Potential Risks to the Aquatic Environment. **Sustainability**, v. 15, n. 14, 2023c.

G1GLOBO. **Vendaval vira barco e três pessoas desaparecem no rio Madeira, em Porto Velho.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2019/09/07/barco-vira-e-tres-pessoas-desaparecem-no-rio-madeira-em-porto-velho.ghtml>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

G1GLOBO. **Barcos colidem ao tentarem fazer ultrapassagem em rio no Amazonas; veja vídeo.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2020/01/03/barcos-colidem-ao-tentarem-fazer-ultrapassagem-em-rio-no-amazonas-veja-video.ghtml>>. Acesso em: 9 ago. 2023.

G1GLOBO. **Balsa com alimentos vira no rio Madeira em Porto Velho.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/ro/rondonia/noticia/2021/08/09/balsa-com-alimentos-vira-no-rio-madeira-e-carga-e-saqueada-em-porto-velho.ghtml>>. Acesso em: 5 jul. 2023.

G1GLOBO. **Buscas por família que desapareceu após naufrágio no rio Madeira chegam ao quarto dia.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2022/01/15/buscas-por-familia-que-desapareceu-apos-naufragio-no-rio-madeira-chegam-ao-quarto-dia.ghtml>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

GAZETADIGITAL. **Naufrágio de barco no Madeira deixa 8 mortos.** Disponível em: <<https://www.gazetadigital.com.br/editorias/brasil/naufragio-de-barco-no-madeira-deixa-8-mortos/10303>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

HANZU-PAZARA, R. et al. Reducing of maritime accidents caused by human factors using simulators in training process. **Journal of Maritime Research**, v. 5, n. 1, p. 3–18, 2008.

HAREIDE, O. J.; BRUBAK, L.; PETTERSEN, T. **Modelling ship grounding with finite elements.** Proceedings of the 26th Nordic Seminar on Computational Mechanics. **Anais... Em: PROCEEDINGS OF THE 26TH NORDIC SEMINAR ON COMPUTATIONAL MECHANICS.** Oslo: 2013.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. Toward More Sustainable River Transportation in Remote Regions of the Amazon, Brazil. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2077, 2021.

HORBE, A. M. C. et al. Geoquímica das águas do médio e baixo rio Madeira e seus principais tributários-Amazonas-Brasil. **Acta Amazonica**, v. 43, p. 489–504, 2013.

IBGE. **IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Biblioteca.** Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=442435#:~:text=xt>>. Acesso em: 2 ago. 2023.

JIN, J.-Y. et al. Intelligent buoy system (inbus): Automatic lifting observation system for macrotidal coastal waters. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, p. 668673, 2021.

KMUSSER. **Bacia Amazônica com a localização do Rio Madeira. This is a map of the Amazon River drainage basin with the Madeira River highlighted.** Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Madeira#/media/Ficheiro:Madeirarivermap.png>. Acesso em: 16 jul. 2023.

KWON, S. et al. Unsupervised Classification of Riverbed Types for Bathymetry Mapping in Shallow Rivers Using UAV-Based Hyperspectral Imagery. **Remote Sensing**, v. 15, n. 11, p. 2803, 2023.

LEE, S.-G. et al. Full-scale ship collision, grounding and sinking simulation using highly advanced M&S system of FSI analysis technique. **Procedia engineering**, v. 173, p. 1507–1514, 2017.

LI, Z. et al. **Ship Hydrodynamics of Several Typical Scenes During Inland Waterway Transport.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...IOP Publishing**, 2021.

LOPES, I. DE M. O.; MAGALHÃES, M. T. Q. Hidrovia do Rio Madeira como indutor de desenvolvimento microrregional das comunidades tradicionais do Baixo Madeira em Porto Velho. **Paranoá**, n. 22, p. 143–158, 2018.

LU, H.-Y. et al. A Low-Cost AI Buoy System for Monitoring Water Quality at Offshore Aquaculture Cages. **Sensors**, v. 22, n. 11, p. 4078, 2022.

LUZ, H. **Análise quantitativa dos acidentes de navegação em águas brasileiras entre 2006 e 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Naval.** Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

MÁCOLA, R. J. S. L. et al. Mapa batimétrico de assoreamento como apoio à navegação na Amazônia: caso no Rio Tapajós/PA. Em: **TERRA DO MAR DOCE: CONTRIBUIÇÕES DA ACADEMIA PARA A NAVEGAÇÃO NA AMAZÔNIA**. [s.l.] Editora Científica Digital, 2023. v. 2p. 137–150.

MAIA, H. W. et al. COVID Pandemics and Inland Transportation in the Brazilian Amazon: A Note on the Risks of Infection in Typical Passenger Vessels. **COVID**, v. 3, n. 8, p. 1052–1062, 2023.

MAKAR, A. Coastal Bathymetric Sounding in Very Shallow Water Using USV: Study of Public Beach in Gdynia, Poland. **Sensors**, v. 23, n. 9, p. 4215, 2023.

MARINHA-DO-BRASIL. **Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas. Portaria DCP/DGN/MB/N.18, de 9 de junho de 2021.** Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/NORMAM_-09_-REV-1_MOD-1_0.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2023a.

MARINHA-DO-BRASIL. **Normas da autoridade marítima para embarcações empregadas na navegação interior - NORMAM-02/DPC.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/NORMAM-02-DPC_Mod23.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2022b.

MARINHA-DO-BRASIL. **Normas da autoridade marítima para inquéritos administrativos sobre acidentes e fatos da navegação (IAFN) e para investigação de segurança dos acidentes e incidentes marítimos (ISAIM). NORMAM-09/DCP. Aprovada pela Portaria 107/DCP, de 16 dez. 2003.** Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/content/normam-09dpc-0>>. Acesso em: 7 ago. 2023.

MORGADO, A. V.; PORTUGAL, L. DA S.; MELLO, A. J. R. Acessibilidade na Região Amazônica através do transporte hidroviário. **Journal of Transport Literature**, v. 7, p. 97–123, 2013.

NETO, E.; FONTES, J.; MAIA, H. Estruturas flutuantes como alternativas de aproveitamento de energia renovável na região amazônica. Em: **Terra do mar doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia**. 1. ed. [s.l: s.n.]. v. 2p. 63–82.

NOTICIASTUDO AQUI. **Notícias Tudo Aqui - O jornal da capital. Rebocador afunda no Rio Madeira, em Porto Velho.** Disponível em: <<https://noticiastudoaqui.com/artigo/2019J113iHv465d29ec06>>. Acesso em: 20 maio. 2023.

OLIVEIRA DOS SANTOS, T. et al. Utilização de dados de sensores remotos como instrumento de gestão de recursos hídricos na bacia do Rio Madeira. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 15, n. 1, 2021.

PADOVEZI, C. **Avaliação de riscos do transporte fluvial de passageiros na Região Amazônica**. Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore-2012, SOBENA, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**2012.

PADOVEZI, C. D. **Segurança operacional de comboios fluviais**. 11º Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior - October 22-24. **Anais...** Em: SOBENA. Brasília: SOBENA, 2019.

PARENTE, Y. Y.; SZLAFSZTEIN, C. F. Analysis of the level of municipal exposure to technological hazards in the Amazon region of Brazil. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, p. 102782, 2022.

PARK, J.-Y.; NAM, B. W.; KIM, Y. Numerical analysis of hydrodynamic loads on passing and moored ships in shallow Water. **Processes**, v. 9, n. 3, p. 558, 2021.

PINHEIRO, S. et al. Effects of a shipwreck on the zooplankton community in a port region of the Amazon. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 5738–5750, 2019.

PINTO, R. S. P.; AMIN, M. M.; SILVA, M. B. Meio ambiente como questão de segurança: a ameaça de securitização da Amazônia. Em: **Desenvolvimento, integração e conservação da Pan-Amazônia**. Belém, Pará: UFPA NAEA, 2016.

PORTALUNICO. **Carreta desliza na entrada da balsa e cai no rio Madeira**. Disponível em: <<https://portalunico.com/carreta-desliza-na-entrada-da-balsa-e-cai-no-rio-madeira-veja-video/>>. Acesso em: 5 jul. 2023.

PORTOSENÁVIOS. **Navegação no rio Madeira em Rondônia e Amazonas é prejudicada por falta de sinalização**. Disponível em: <<https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/navegacao-no-rio-madeira-em-rondonia-e-amazonas-e-prejudicada-por-falta-de-sinalizacao>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

PRABOWO, A. R. et al. Crashworthiness assessment of thin-walled double bottom tanker: Influences of seabed to structural damage and damage-energy formulae for grounding damage calculations. **Journal of Ocean Engineering and Science**, v. 5, n. 4, p. 387–400, 2020.

RECORDTV. **Equipes tentam retirar balsa que está afundando no rio Madeira**. Disponível em: <<https://recordtv.r7.com/jornal-da-record/videos/equipes-tentam-retirar-balsa-que-esta-afundando-no-rio-madeira-25052022>>. Acesso em: 12 maio. 2023.

RONDONIAOVIVO. **COMUNIDADE ALIANÇA: Rebocador afunda após balsa bater em banco de areia no rio Madeira**. Disponível em: <<https://rondoniaovivo.com/noticia/geral/2023/03/11/comunidade-alianca-rebocador-afunda-apos-balsa-bater-em-banco-de-areia-no-rio-madeira.html>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SENVÁ. **SENVÁ Engenharia e Geotecnologia**. Disponível em: <<https://www.senva.com.br/>>. Acesso em: 8 fev. 2023.

SEPEHRI, A. et al. The impact of shipping 4.0 on controlling shipping accidents: A systematic literature review. **Ocean Engineering**, p. 110162, 2021.

SINTERO. **ACIDENTE - Funcionário da SEDUC desaparece ao cair no Rio Madeira**. Disponível em: <<https://sintero.org.br/noticias/geral/acidente-funcionario-da-seduc-desaparece-ao-cair-no-rio-madeira/34>>. Acesso em: 4 jun. 2023.

VALANTO, P. On Boundary Conditions for Damage Openings in RoPax-Ship Survivability Computations. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 3, p. 643, 2023.

XU, R. et al. Recent progress on wave energy marine buoys. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 5, p. 566, 2022.

ZUSE, S. et al. Tecnologias cerâmicas no alto rio Madeira: síntese, cronologia e perspectivas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 15, 2020.