Maisa Tobias
Pedro Lameira
(Organizadores)

Terra do Mar Doce

Contribuições da Academia para a Navegação na Amazônia

Vol.2



científica digital

Maisa Tobias
Pedro Lameira
(Organizadores)

Terra do Mar Doce

Contribuições da Academia para a Navegação na Amazônia

Vol.2



1ª EDIÇÃO

científica digital

2023 - GUARUJÁ - SP

científica digital

EDITORA CIENTÍFICA DIGITAL LTDA
Guarujá - São Paulo - Brasil
www.editoracientifica.com.br - contato@editoracientifica.com.br

Diagramação e arte
Equipe editorial
Imagens da capa
Adobe Stock - licensed by Editora Científica Digital - 2022
Revisão
Autores e Autoras

2023 by Editora Científica Digital
Copyright© 2023 Editora Científica Digital
Copyright do Texto © 2023 Autores e Autoras
Copyright da Edição © 2023 Editora Científica Digital

Acesso Livre - Open Access

Parecer e revisão por pares
Os textos que compõem esta obra foram submetidos para avaliação do Conselho Editorial da Editora Científica Digital, bem como revisados por pares, sendo indicados para a publicação.

O conteúdo dos capítulos e seus dados e sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores e autoras.

É permitido o download e compartilhamento desta obra desde que pela origem da publicação e no formato Acesso Livre (Open Access), com os créditos atribuídos aos autores e autoras, mas sem a possibilidade de alteração de nenhuma forma, catalogação em plataformas de acesso restrito e utilização para fins comerciais.

Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

T323 Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia / Organizadores Maisa Sales Gama Tobias, Pedro Igor Dias Lameira. – Guarujá-SP: Científica Digital, 2023.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5360-261-8
DOI 10.37885/978-65-5360-261-8

1. Engenharia de transportes. I. Tobias, Maisa Sales Gama (Organizadora). II. Lameira, Pedro Igor Dias (Organizador). III. Título.

CDD 629.04

Índice para catálogo sistemático: I. Engenharia de transportes

Elaborado por Janaina Ramos – CRB-8/9166

E-BOOK
ACESSO LIVRE ON LINE - IMPRESSÃO PROIBIDA

2023

CORPO EDITORIAL

Direção Editorial

Reinaldo Cardoso

João Batista Quintela

Assistentes Editoriais

Erick Braga Freire

Bianca Moreira

Sandra Cardoso

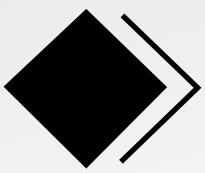
Bibliotecários

Maurício Amormino Júnior - CRB-6/2422

Janaina Ramos - CRB-8/9166

Jurídico

Dr. Alandelon Cardoso Lima - OAB/SP-307852



científica digital

CONSELHO EDITORIAL
Mestres, Mestras, Doutores e Doutoras

Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Cordeiro
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Rogério de Melo Grillo
Universidade Estadual de Campinas

Profª. Ma. Eloisa Rosotti Navarro
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Ernane Rosa Martins
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Rossano Sartori Dal Molin
FSG Centro Universitário

Prof. Dr. Carlos Alexandre Oelke
Universidade Federal do Pampa

Prof. Esp. Domingos Bombo Damião
Universidade Agostinho Neto - Angola

Prof. Me. Reinaldo Eduardo da Silva Sales
Instituto Federal do Pará

Profª. Ma. Auristela Correa Castro
Universidade Federal do Pará

Profª. Dra. Dalízia Amaral Cruz
Universidade Federal do Pará

Profª. Ma. Susana Jorge Ferreira
Universidade de Evora, Portugal

Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Me. Erival Gonçalves Prata
Universidade Federal do Pará

Prof. Me. Gevair Campos
Faculdade CNEC Unaí

Prof. Me. Flávio Aparecido De Almeida
Faculdade Unida de Vitória

Prof. Me. Mauro Vinicius Dutra Girão
Centro Universitário Inta

Prof. Esp. Clóvis Luciano Giacomet
Universidade Federal do Amapá

Profª. Dra. Giovanna Faria de Moraes
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. André Cutrim Carvalho
Universidade Federal do Pará

Prof. Esp. Dennis Soares Leite
Universidade de São Paulo

Profª. Dra. Silvani Verruck
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Me. Osvaldo Contador Junior
Faculdade de Tecnologia de Jahu

Profª. Dra. Claudia Maria Rinhel-Silva
Universidade Paulista

Profª. Dra. Silvana Lima Vieira
Universidade do Estado da Bahia

Profª. Dra. Cristina Berger Fadel
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª. Ma. Graciete Barros Silva
Universidade Estadual de Roraima

Prof. Dr. Carlos Roberto de Lima
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Wescley Viana Evangelista
Universidade do Estado de Mato Grosso

Prof. Dr. Cristiano Marins
Universidade Federal Fluminense

Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva
Escola Superior de Ciências da Santa Casa de Misericórdia de Vitória

Prof. Dr. Daniel Luciano Gevehr
Faculdades Integradas de Taquara

Prof. Me. Silvio Almeida Junior
Universidade de Franca

Profª. Ma. Juliana Campos Pinheiro
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Raimundo Nonato Ferreira Do Nascimento
Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Antônio Marcos Mota Miranda
Instituto Evandro Chagas

Profª. Dra. Maria Cristina Zago
Centro Universitário UNIFAAT

Profª. Dra. Samylla Maira Costa Siqueira
Universidade Federal da Bahia

Profª. Ma. Gloria Maria de Franca
Centro Universitário CESMAC

Profª. Dra. Carla da Silva Sousa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano

Prof. Me. Dennys Ramon de Melo Fernandes Almeida
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Me. Mário Celso Neves De Andrade
Universidade de São Paulo

Prof. Me. Julianno Pizzano Ayoub
Universidade Estadual do Centro-Oeste

Prof. Dr. Ricardo Pereira Sepini
Universidade Federal de São João Del-Rei

Profª. Dra. Maria do Carmo de Sousa
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Me. Flávio Campos de Morais
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Me. Jonatas Brito de Alencar Neto
Universidade Federal do Ceará

Prof. Me. Reginaldo da Silva Sales
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Prof. Me. Moisés de Souza Mendonça
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Prof. Me. Patrício Francisco da Silva
Universidade de Taubaté

Profª. Esp. Bianca Anacleto Araújo de Sousa
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Pedro Afonso Cortez
Universidade Metodista de São Paulo

Profª. Ma. Bianca Cerqueira Martins
Universidade Federal do Acre

Prof. Dr. Vitor Afonso Hoeflich
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Francisco de Sousa Lima
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano

Profª. Dra. Sayonara Cotrim Sabioni
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Baiano

Profª. Dra. Thais Ranielle Souza de Oliveira
Centro Universitário Euroamericano

Profª. Dra. Rosemary Laís Galati
Universidade Federal de Mato Grosso

Profª. Dra. Maria Fernanda Soares Queiroz
Universidade Federal de Mato Grosso

Prof. Dr. Dioniso de Souza Sampaio
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Leonardo Augusto Couto Finelli
Universidade Estadual de Montes Claros

Profª. Ma. Danielly de Sousa Nóbrega
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Acre

Prof. Me. Mauro Luiz Costa Campello
Universidade Paulista

Profª. Ma. Livia Fernandes dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Acre

Profª. Dra. Sonia Aparecida Cabral
Secretaria da Educação do Estado de São Paulo

Profª. Dra. Camila de Moura Vogt
Universidade Federal do Pará

Prof. Me. José Martins Juliano Eustaquio
Universidade de Uberaba

Prof. Me. Walmir Fernandes Pereira
Miami University of Science and Technology

Profª. Dra. Liege Coutinho Goulart Dornellas
Universidade Presidente Antônio Carlos

Prof. Me. Ticiano Azevedo Bastos
Secretaria de Estado da Educação de MG

Prof. Dr. Jónata Ferreira De Moura
Universidade Federal do Maranhão

Profª. Ma. Daniela Remião de Macedo
Faculdade de Belas Artes da Universidade de Lisboa

Prof. Dr. Francisco Carlos Alberto Fonteles Holanda
Universidade Federal do Pará

Profª. Dra. Bruna Almeida da Silva
Universidade do Estado do Pará

Profª. Ma. Adriana Leite de Andrade
Universidade Católica de Petrópolis

Profª. Dra. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco
Instituto Federal do Sertão Pernambucano,

Prof. Dr. Claudiomir da Silva Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas

Prof. Dr. Fabrício dos Santos Ritá
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas, Brasil

Prof. Me. Ronei Aparecido Barbosa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas

Prof. Dr. Julio Onésio Ferreira Melo
Universidade Federal de São João Del Rei

Prof. Dr. Juliano José Corbi
Universidade de São Paulo

Profª. Dra. Alessandra de Souza Martins
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho
Universidade Federal do Cariri

Prof. Dr. Thadeu Borges Souza Santos
Universidade do Estado da Bahia

Profª. Dra. Francine Náthalie Ferraresi Rodriguess Queluz
Universidade São Francisco

Profª. Dra. Maria Luzete Costa Cavalcante
Universidade Federal do Ceará

Profª. Dra. Luciane Martins de Oliveira Matos
Faculdade do Ensino Superior de Linhares

Profª. Dra. Rosenery Pimentel Nascimento
Universidade Federal do Espírito Santo

Profª. Esp. Lívia Silveira Duarte Aquino
Universidade Federal do Cariri

Profª. Dra. Irlane Maia de Oliveira
Universidade Federal do Amazonas

Profª. Dra. Xaene Maria Fernandes Mendonça
Universidade Federal do Pará

Profª. Ma. Thaís de Oliveira Carvalho Granado Santos
Universidade Federal do Pará

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Me. Fábio Ferreira de Carvalho Junior
Fundação Getúlio Vargas

Prof. Me. Anderson Nunes Lopes
Universidade Luterana do Brasil

Profª. Dra. Iara Margolis Ribeiro
Universidade do Minho

Prof. Dr. Carlos Alberto da Silva
Universidade Federal do Ceara

Profª. Dra. Keila de Souza Silva
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Francisco das Chagas Alves do Nascimento
Universidade Federal do Pará

Profª. Dra. Réia Sílvia Lemos da Costa e Silva Gomes
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Evaldo Martins da Silva
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. António Bernardo Mendes de Seiça da Providência Santarém
Universidade do Minho, Portugal

Profª. Dra. Miriam Aparecida Rosa
Instituto Federal do Sul de Minas

Prof. Dr. Biano Alves de Melo Neto
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano

Profª. Dra. Priscyla Lima de Andrade
Centro Universitário UniFBV

Prof. Dr. Gabriel Jesus Alves de Melo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia

Prof. Esp. Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira
Universidade Estadual do Centro Oeste

Prof. Dr. Andre Muniz Afonso
Universidade Federal do Paraná

Profª. Dr. Laís Conceição Tavares
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Prof. Me. Rayme Tiago Rodrigues Costa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme
Universidade Federal do Tocatins

Prof. Me. Valdemir Pereira de Sousa
Universidade Federal do Espírito Santo

Profª. Dra. Sheylla Susan Moreira da Silva de Almeida
Universidade Federal do Amapá

Prof. Dr. Arinaldo Pereira Silva
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

Profª. Dra. Ana Maria Aguiar Frias
Universidade de Évora, Portugal

Profª. Dra. Deise Keller Cavalcante
Secretaria de Estado de Educação do Rio de Janeiro

Profª. Esp. Larissa Carvalho de Sousa
Instituto Politécnico de Coimbra, Portugal

Esp. Daniel dos Reis Pedrosa
Instituto Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Wiaslan Figueiredo Martins
Instituto Federal Goiano

Prof. Dr. Lênio José Guerreiro de Faria
Universidade Federal do Pará

Profª. Dra. Tamara Rocha dos Santos
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Gustavo Soares de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo

Profª. Dra. Adriana Cristina Bordignon
Universidade Federal do Maranhão

Profª. Dra. Norma Suely Evangelista-Barreto
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Me. Larry Oscar Chañi Paucar
Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Peru

Prof. Dr. Pedro Andrés Chira Oliva
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Daniel Augusto da Silva
Fundação Educacional do Município de Assis

Profª. Dra. Aleteia Hummes Thaines
Faculdades Integradas de Taquara

Profª. Dra. Elisangela Lima Andrade
Universidade Federal do Pará

Prof. Me. Reinaldo Pacheco Santos
Universidade Federal do Vale do São Francisco

Profª. Ma. Cláudia Catarina Agostinho
Hospital Lusíadas Lisboa, Portugal

Profª. Dra. Carla Cristina Bauermann Brasil
Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Humberto Costa
Universidade Federal do Paraná

Profª. Ma. Ana Paula Felipe Ferreira da Silva
Universidade Potiguar

Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa
Universidade de São Paulo

Profª. Ma. Fabricia Zanelato Bertolde
Universidade Estadual de Santa Cruz

Prof. Me. Eliomar Viana Amorim
Universidade Estadual de Santa Cruz

Profª. Esp. Nássarah Jabur Lot Rodrigues
Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. José Aderval Aragão
Universidade Federal de Sergipe

Profª. Ma. Caroline Muñoz Cevada Jeronymo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Profª. Dra. Aline Silva De Aguiar
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Renato Moreira Nunes
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Me. Júlio Nonato Silva Nascimento
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª. Dra. Cybelle Pereira de Oliveira
Universidade Federal da Paraíba

Profª. Ma. Cristianne Kalinne Santos Medeiros
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Profª. Dra. Fernanda Rezende
Núcleo Interdisciplinar de Pesquisa e Estudo em Educação Ambiental

Profª. Dra. Clara Mockdece Neves
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª. Ma. Danielle Galdino de Souza
Universidade de Brasília

Prof. Me. Thyago José Arruda Pacheco
Universidade de Brasília

Profª. Dra. Flora Magdaline Benitez Romero
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

Profª. Dra. Carline Santos Borges
Governo do Estado do Espírito Santo, Secretaria de Estado de Direitos Humanos.

Profª. Dra. Rosana Barbosa Castro
Universidade Federal de Amazonas

Prof. Dr. Wilson José Oliveira de Souza
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Eduardo Nardini Gomes
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. José de Souza Rodrigues
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Willian Carboni Viana
Universidade do Porto

Prof. Dr. Diogo da Silva Cardoso
Prefeitura Municipal de Santos

Prof. Me. Guilherme Fernando Ribeiro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª. Dra. Jaisa Klauss
Associação Vitoriana de Ensino Superior

Prof. Dr. Jeferson Falcão do Amaral
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Profª. Ma. Ana Carla Mendes Coelho
Universidade Federal do Vale do São Francisco

Prof. Dr. Octávio Barbosa Neto
Universidade Federal do Ceará

Profª. Dra. Carolina de Moraes Da Trindade
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Prof. Me. Ronison Oliveira da Silva
Instituto Federal do Amazonas

Prof. Dr. Alex Guimarães Sanches
Universidade Estadual Paulista

Profa. Esp. Vanderlene Pinto Brandão
Faculdade de Ciências da Saúde de Unaí

Profa. Ma. Maria Das Neves Martins
Faculdade de Ciências da Saúde de Unaí

Prof. Dr. Joachin Melo Azevedo Neto
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. André Luís Assunção de Farias
Universidade Federal do Pará

Profª. Dra. Danielle Mariam Araujo Santos
Universidade do Estado do Amazonas

Profª. Dra. Raquel Marchesan
Universidade Federal do Tocantins

Profª. Dra. Thays Zigante Furlan Ribeiro
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Norbert Fenzl
Universidade Federal do Pará

Prof. Me. Arleson Eduardo Monte Palma Lopes
Universidade Federal do Pará

Profa. Ma. Iná Camila Ramos Favacho de Miranda
Universidade Federal do Pará

Profª. Ma. Ana Lise Costa de Oliveira Santos
Secretaria de Educação do Estado da Bahia

Prof. Me. Diego Vieira Ramos
Centro Universitário Ingá

Prof. Dr. Janaildo Soares de Sousa
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Mário Henrique Gomes
Centro de Estudos das Migrações e das Relações Interculturais, Portugal

Profª. Dra. Maria da Luz Ferreira Barros
Universidade de Évora, Portugal

CONSELHO EDITORIAL

Profª. Ma. Eliaidina Wagna Oliveira da Silva
Caixa de Assistência dos advogados da OAB-ES

Profª. Ma. Maria José Coelho dos Santos
Prefeitura Municipal de Serra

Profª. Tais Muller
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Me. Eduardo Cesar Amancio
Centro Universitário de Tecnologia de Curitiba

Profª. Dra. Janine Nicolosi Corrêa
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª. Dra. Tatiana Maria Cecy Gadda
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª. Gabriela da Costa Bonetti
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Me. Thales do Rosário De Oliveira
Universidade de Brasília

Profª. Dra. Maisa Sales Gama Tobias
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Pedro Igor Dias Lameira
Universidade Federal do Pará

Profª. Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes
Universidade Estadual do Norte do Paraná

Prof. Me. Teonis Batista da Silva
Universidade do Estado da Bahia

Profª. Ma. Aline Maria Gonzaga Ruas
Universidade Estadual de Montes Claros

Profª. Dra. Alessandra Knoll
Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Profª. Ma. Carla Cristina Sordi
Universidade Estadual do Ceará

Profª. Dra. Caroline Lourenço de Almeida
Fundação Educacional do Município de Assis

Profª. Dra. Rosângela Gonçalves da Silva
Fundação Educacional do Município de Assis

Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Universidade Federal da Grande Dourados

Prof. Dr. Leonardo de Carvalho Vidal
Instituto Federal do Rio de Janeiro

Profª. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti
Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná

Profª. Dra. Lucieny Almohalha
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Prof. Esp. Layane Caroline Silva Lima Braun
Universidade Federal do Pará

Profª. Ma. Michelle Cristina Boaventura França
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Fernando da Silva Cardoso
Universidade de Pernambuco

Prof. Me. Hugo José Coelho Corrêa de Azevedo
Fundação Oswaldo Cruz

Profª. Ma. Letícia Keroly Bezerra Alexandrino
Universidade de Fortaleza

Prof. Dr. Luiz Gonzaga Lapa Junior
Universidade de Brasília

Profª. Ma. Martha Luiza Costa Vieira
Universidade Federal do Pará

Profª. Dra. Vânia Maria Arantes
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Prof. Me. Paulo Roberto Serpa
Universidade do Vale do Itajaí

Prof. Dr. Hercules de Oliveira Carmo
Faculdade de Educação de Guaratinguetá

Profª. Dra. Caroline Nóbrega de Almeida
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª. Ma. Camila Tâmires Alves Oliveira
Universidade Federal Rural do Semiárido

Prof. Me. Francisco Lidiano Guimarães Oliveira
Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Mauro José de Deus Morais
Universidade Federal do Acre

Profª. Ma. Terezinha Maria Bogéa Gusmão
Instituto Histórico e Geográfico de Arari

Prof. Dr. Felipe Vitório Ribeiro
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

APRESENTAÇÃO

O processo histórico de ocupação humana da Amazônia não se deu linearmente e, o contexto político e econômico ao longo do tempo foram determinantes destas flutuações. A visão contemporânea da Amazônia apresenta padrões e arranjos espaciais de uma floresta tropical com uma conformação complexa que se estruturou, com deficiências de infraestrutura para garantir condições mínimas de qualidade de vida. As características intrínsecas, de zona em expansão de fronteiras, elevam as redes de transportes como instrumentos de apropriação do espaço, em novas relações impostas, com inserção de novas modalidades de transportes, como a que ocorreu à partir do século passado, com a introdução do transporte aéreo e do transporte rodoviário. Neste processo, as infraestruturas de circulação e transporte, os projetos de colonização de algumas áreas, a construção de hidrelétricas e a expansão da mineração foram tidos como elementos cruciais de transformação sem precedentes no último século. O movimento geral da integração amazônica se expressou no entrelaçamento e, por vezes, convergiram ou divergiram as políticas territoriais, projetos e fluxos de investimentos públicos e privados nas escalas locais, nacionais e internacionais.

Diante desses fatos, a existência de centros de pesquisas e formação superior na própria região se converteram em necessidade premente, face os desafios que a mesma enfrenta em busca de um desenvolvimento sustentável. Assim, esta obra, que se apresenta em seu segundo volume, traz para a sociedade regional e, de outras partes do mundo, um conhecimento pautado na vivência e em pesquisas regionais de excelência, sobre o que é a Amazônia em termos de mobilidade e transporte e, o que representa o transporte hidroviário para a própria sobrevivência na região.

As contribuições acadêmicas abrangem os mais diversos aspectos da questão da navegação na Amazônia, desde o emprego de modelos para analisar problemas complexos, como os dos artigos: Logistics of the Arc North Amazonian Corridors: an analysis using linear programming; Modelo de Análise de Estabilidade de Sistemas Flutuantes de Cargas não Usuais: um estudo de caso na região amazônica; Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: um estudo de caso da logística do transporte da soja na hidrovia do rio Madeira; Método de Otimização de Rotas Intermodais para o Transporte da Produção de Soja dos Estados do Pará e do Tocantins; Modelo de Otimização de Conflitos entre Usos Múltiplos da Água – uma análise para geração de energia e navegação na bacia do rio Tapajós; Modelagem Hidrodinâmica de Trecho do rio Madeira para Avaliação de Vetores de Velocidade até o Escoamento e a Utilização do Método Híbrido AHP-TOPSIS para a Escolha Modal do Escoamento da Produção de Soja do Polo Paragominas/Pa. Acrescentando-se o uso de ferramentas computacionais, como a Medição da Elevação da Superfície d'água em Experimentos 2D Usando Análise de Imagens - uma ferramenta de validação na Engenharia Naval e Oceânica; o Estudo Preliminar da Resistência ao Avanço e dos Movimentos de uma Barcaça Regional - algumas considerações para o uso de software em fases de anteprojeto e, ainda, o Mapa Batimétrico de Assoreamento como Apoio à Navegação na Amazônia - caso no rio Tapajós/Pa. Outra linha de pesquisa fundamental, em se tratando da respectiva região, a análise de sustentabilidade e de energias renováveis, em artigos como O Conceito

de Corredores Verdes de Transportes de Mercadorias- uma aplicação no transporte de soja para exportação; a Fabricação de Embarcação de Pequeno Porte com Aproveitamento de Recursos Naturais Renováveis; as Estruturas Flutuantes como Alternativas de Aproveitamento de Energia Renovável na Região Amazônica; e a Proposta de Geração de Energia Sustentável para os Motores Auxiliares em Comboio Fluvial. Também, de igual importância para o desenvolvimento econômico e social da região, os artigos que abordam a infraestrutura de transporte, a movimentação portuária e a e de importância social da navegação, tais como: A Viabilidade do Porto de Santana no Contexto do Projeto Arco Norte e seus Condicionantes; Operações ao Largo para Transbordo de Carga de Granéis Sólidos, Colisões de Embarcações sobre Pontes: uma revisão bibliográfica e de importância social da navegação para a região e, ainda, o artigo Os Barcos Expressos e o Transporte Fluvial de Passageiros - transformações e inovações no ir e vir amazônico.

São dezoito artigos que se aprofundam no conhecimento e descobertas que acrescentam em contribuições científicas sobre a região e, que proporcionam ao leitor uma imersão ao universo amazônico, seja pelo simples desejo de conhecimento ou para uso em trabalhos científicos. Portanto, convidamos todos à este leitura do esforço individual e coletivo dos nossos pesquisadores, e conheçam mais sobre a nossa Terra do Mar Doce!

Maisa Sales Gama Tobias
Pedro Igor Dias Lameira

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01

Proposta de geração de energia sustentável para os motores auxiliares em comboio fluvial

Davi Yuji Andrade Hino; Pedro Igor Dias Lameira; Áthila Santos de Lima; Emannuel Sant Thiago Pereira Loureiro

doi 10.37885/221010686 13

CAPÍTULO 02

A viabilidade do Porto de Santana no contexto do Projeto Arco Norte e seus condicionantes

Álisson Sousa da Silva; Maisa Sales Gama Tobias

doi 10.37885/221010378 25

CAPÍTULO 03

Colisões de embarcações sobre pontes: uma revisão bibliográfica

Weverton Kaio de Araújo Cabral; Pedro Igor Dias Lameira; Emannuel Sant Thiago Pereira Loureiro

doi 10.37885/221111107 45

CAPÍTULO 04

Estruturas flutuantes como alternativas de aproveitamento de energia renovável na região Amazônica

Eudes José Coelho Neto; Jassiel V. H. Fontes; Harlysson W. S. Maia

doi 10.37885/221010654 63

CAPÍTULO 05

Logistics of the arc north amazonian corridors: An analysis using linear programming

Tatiana de Oliveira Russo; Matheus Melo de Souza; Andrea Leda Ramos de Oliveira; Maisa Sales Gama Tobias; Valcir João Farias da Cunha; Marcus Pinto da Costa da Rocha; Carolina Costa Ramos

doi 10.37885/221111025 83

CAPÍTULO 06

Estudo preliminar da resistência ao avanço e dos movimentos de uma barcaça regional: algumas considerações para o uso de software em fases de anteprojeto

Jorge Artur Leite da Silva Júnior; Jassiel V. H. Fontes; Harlysson W. S. Maia; Irving D. Hernández; Ricardo Almeida Sanches

doi 10.37885/221110952 97

CAPÍTULO 07

Fabricação de embarcação de pequeno porte com aproveitamento de recursos naturais renováveis

Vitor Hugo Chaves de Lemos; Douglas Santos Silva; Roberto Tetsuo Fujiyama

doi 10.37885/221010572 116

CAPÍTULO 08

Mapa batimétrico de assoreamento como apoio à navegação na Amazônia: caso no rio Tapajós/PA

Raimunda Josinete da Silva Loureiro Mácola; Gilberto Loureiro Mácola; Hito Braga de Moraes; Maisa Sales Gama Tobias

doi 10.37885/221111028 137

CAPÍTULO 09

Medição da elevação da superfície d'água em experimentos 2D usando análise de imagens: uma ferramenta de validação na Engenharia Naval e Oceânica

Matheus Rocha de Sousa; Jassiel V. H. Fontes; Irving D. Hernández; Edgar Mendoza; Harlysson W. S. Maia

doi 10.37885/221111017 151

CAPÍTULO 10

Método de otimização de rotas intermodais para o transporte da produção de soja dos Estados do Pará e do Tocantins

Vitor Hugo Pereira de Oliveira; Maisa Sales Gama Tobias; Marcus Pinto da Costa da Rocha

doi 10.37885/221010614 171

CAPÍTULO 11

Modelagem e simulação de eventos discretos: um estudo de caso da logística do transporte da soja na hidrovia do rio Madeira

Carolina Costa Ramos; Kadu Naoki Ishikawa; Ana Clara Souza Sabino; Gustavo do Nascimento Tocantins; Marcus Pinto da Costa da Rocha; Valcir Jõao da Cunha Farias; André Vinicius da Costa Araújo

doi 10.37885/221111027 191

CAPÍTULO 12

Modelagem hidrodinâmica de trecho do Rio Madeira para avaliação de vetores de velocidade e escoamento

Lúcio Carlos Pinheiro Campos Filho; Nelio Moura de Figueiredo; Igor Henrique Coelho Alves

doi 10.37885/221110929 199

CAPÍTULO 13

Modelo de análise de estabilidade de sistemas flutuantes com cargas não usuais: Um Estudo de Caso na Região Amazônica

Vânia Figueredo Coelho Guedes; Nelio Moura de Figueiredo; Yuri Victor Remígio Guedes

doi 10.37885/221211123 219

CAPÍTULO 14

Modelo de otimização de conflitos entre usos múltiplos da água – uma análise para geração de energia e navegação na bacia do rio Tapajós

Nelio Moura de Figueiredo; Claudio José Cavalcante Blanco; Lúcio Carlos Pinheiro Campos Filho

doi 10.37885/221110885 239

CAPÍTULO 15

O conceito de corredores verdes de transportes de mercadorias e uma aplicação no transporte de soja para exportação

João Ferreira Netto; Rui Carlos Botter; Daniel de Oliveira Mota

doi 10.37885/221111064 262

CAPÍTULO 16

Operações ao largo para transbordo de carga granéis sólido

Vanessa C. Rafael; Pedro I. D. Lameira

doi 10.37885/221111056 278

CAPÍTULO 17

Os barcos expressos e o transporte fluvial de passageiros: transformações e inovações no ir e vir Amazônico

Robert Carvalho de Azevedo David

doi 10.37885/221110939 302

CAPÍTULO 18

Utilização do método híbrido ahp-topsis para a escolha modal do escoamento da produção de soja do polo Paragominas/PA

Rodrigo Nassar Cruz; Marcus Vinícius Guerra Seráfico de Assis Carvalho

doi 10.37885/220809785 321

SOBRE OS ORGANIZADORES 357

ÍNDICE REMISSIVO 358

01

Proposta de geração de energia sustentável para os motores auxiliares em comboio fluvial

Davi Yuji Andrade Hino
Universidade Federal do Pará - UFPA

Pedro Igor Dias Lameira
Universidade Federal do Pará - UFPA

Áthila Santos de Lima
Universidade Federal do Pará - UFPA

Emannuel Sant Thiago Pereira Loureiro
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221010686

RESUMO

Objetivo: O presente artigo objetiva avaliar a possibilidade de suprir a demanda energética dos geradores de energia elétrica de um empurrador de um comboio-tipo que navega no Arco Norte por meio da alocação de placas fotovoltaicas nas tampas das barcaças. **Métodos:** Obter a estimativa de tempo de viagem do comboio – por meio na análise do comboio-tipo que navega na rota Miriituba – Barcarena, realizar o balanço elétrico da embarcação para avaliar o regime mais crítico de consumo elétrico e, dessa forma, verificar a área necessária para suprir a demanda energética. **Resultados:** Notou-se que há uma área disponível superior a área necessária para suprir o empurrador, podendo utilizar esse espaço restante para gerar energia a ser armazenada em um sistema de baterias, foi possível aferir também a economia mensal do gasto de combustível do empurrador, caso utilizasse as placas fotovoltaicas como fonte geradora de energia. **Conclusão:** A embarcação possui potencial para ser abastecida por um sistema de placas solares sobre as tampas das barcaças, sua geração de energia é superior e seu destino final energético pode ser para um futuro abastecimento em terra, descarregando a energia gerada durante o período de viagens; todavia, necessita-se, ainda, de estudos para definir o alojamento das baterias, seu dimensionamento e a sua viabilidade econômica.

Palavras-chave: Energia Sustentável, Comboio Fluvial, Motores Auxiliares, Placas Fotovoltaicas.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a urgência mundial por transporte capaz de suprir as crescentes demandas fez com que o porte das embarcações de transporte de carga mudasse, aumentando suas dimensões para atendê-la, tornando-os mais competitivos e, por conseguinte, aumentando sua utilização (CASTRO, 2018). Como consequência, o aumento da poluição emitida pelas embarcações se tornou, a época, irremediável, devido ao consequente aumento do porte dos motores. IMO (2009) expõe que, em 2007, estas foram responsáveis por emitirem 3,3% da emissão global de gases poluentes.

A presença de entidades regulamentadoras, a exemplo da IMO (*International Maritime Organization*), inserindo padrões e regulamentos para assegurar a prevenção da poluição, e da MARPOL (*International Convention for the Prevention of Pollution for Ships*), assegurando a redução de emissões de CO2 e de outros gases poluentes das embarcações, já demonstram a preocupação mundial com tal problemática (PAULSON & CHACKO, 2019). Nesse cenário, o crescente uso de fontes alternativas de energia, não agressivas ao meio ambiente, foram alternativas legitimadas para contrapor essa emissão de CO2, sendo estudadas e aprimoradas em embarcações marítimas (LAN, 2015).

Paulson & Chacko (2019) ainda avalia algumas dificuldades enfrentadas por navios marítimos com energia fotovoltaica, entre eles está a contínua variação da radiação solar especialmente quando navios possuem diferentes rotas de navegação. Tal problemática pode ser amenizada, caso a rota não varie tanto por paralelos, mantendo uma média de incidência de luz solar durante seu percurso, retratado por Brandão (2004), ao apresentar como os raios incidem – durante o equinócio – perpendicularmente sobre os meridianos no equador, e como se inclinam devido a latitude.

No atual cenário regional, focado na produção e na exportação de grãos, a navegação se torna um expoente para o escoamento da safra produzida pelo Arco Norte, pressupondo uma competitividade que exige investimentos em melhorias para atender a essa necessidade. À navegação na região Norte do Brasil, dá-se espaço para a utilização de fontes alternativas de energia para reduzir custos e a poluição gerada pelas embarcações, ao estar geolocalizada próxima a linha do equador, cuja insolação diária (Hora de Sol Pleno) é de 5,05 kWh/m² por dia, o que corresponde a uma média de 2000 horas de luz solar por ano (CHASE, 2018).

Embarcações solares para transporte marítimo são alvos de estudo há mais de uma década, ao se revisar bibliografias anteriores. Lee *et al.* (2013) discute a operação de uma embarcação híbrida de energia fotovoltaica e de diesel, dividindo-a em dois modos, navegando e fundeada, estudando também sua estabilidade com essa mudança; já Tercan *et al.* (2020) realiza um estudo de caso para uma embarcação solar, com uma análise financeira e

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

técnica dos seus sistemas e um *overview* dos custos de investimento e de operação e Song *et al.* (2018) propõe um novo método de modelagem numérica para o cálculo da eficiência do sistema de energia em um sistema fotovoltaico de uma embarcação, considerando a mudança dinâmica do consumo efetivo de combustível para verificar a veracidade do modelo.

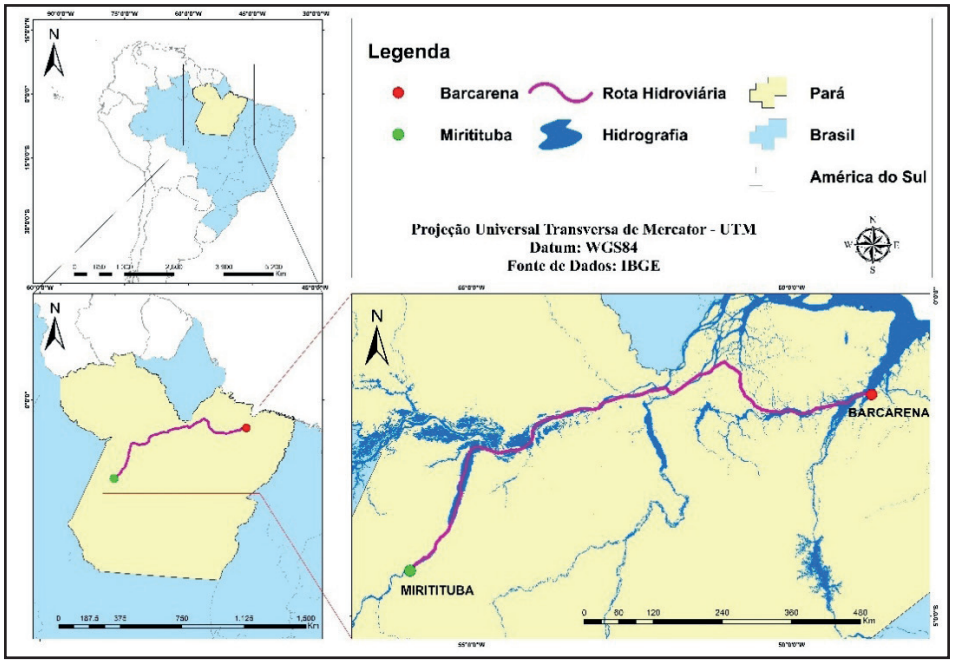
Nesse viés, o presente artigo tem como objetivo avaliar a viabilidade de se utilizar placas solares como fonte alternativa e auxiliar de energia à navegação, em um comboio fluvial de transporte de grãos, para geração de energia em empurradores. Para isso, haverá a alocação das placas nas tampas retráteis de um comboio-tipo que navega no Arco Norte, o dimensionamento do sistema elétrico e a análise da viabilidade econômica.

MÉTODOS

ROTA E COMBOIO-TIPO

A priori, imaginou-se uma rota relevante para o transporte de grãos na região norte do país, escolheu-se, então, a rota Miritituba – Barcarena, a terceira rota criada para exportação de soja pelos portos da Amazônia, em 2014 (Barros, 2019). Fez- se, dessa forma, o mapeamento do percurso hidroviário – apresentado pela Figura 1 - e a retirada da distância para o cálculo do tempo necessário para realizá-lo.

Figura 1. Rota Miritituba - Barcarena.



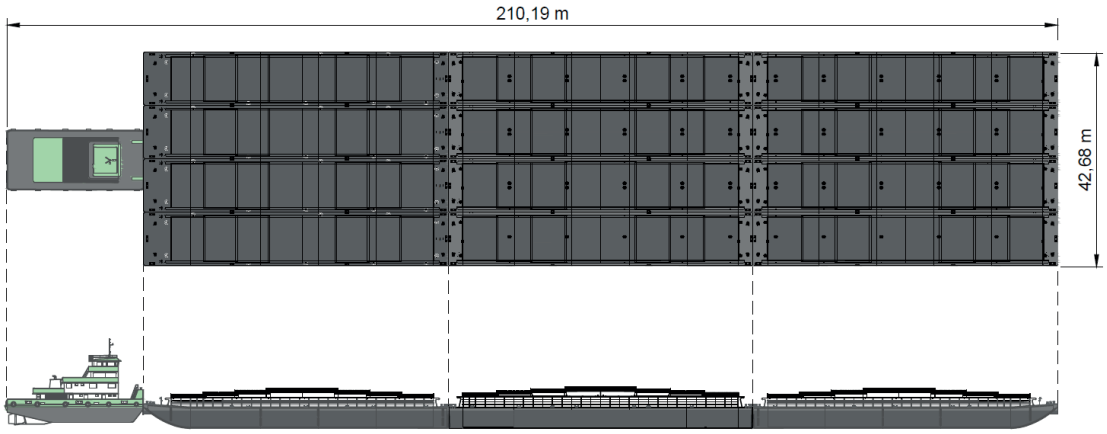
Fonte: Autor (2022).

A posteriori, avaliou-se o comboio-tipo que navega na região, partindo da escolha de um comboio 4x3, com 8 Barcaças *Raked* e 4 Barcaças *Box*. Sabe-se que existe uma

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

variação de velocidade para cada tipo de comboio, porém, para fins didáticos, adotou-se uma velocidade de 5 nós para este. Obteve-se, dessa forma, suas dimensões, autonomia e propulsão - apresentado na Figura 2 e na Tabela 1.

Figura 2. Comboio-Tipo da rota Mirituba - Barcarena.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 1. Dados das embarcações componentes no comboio.

Dimensões	Empurrador	Barcaça *Box*	Barcaça *Raked*
Comprimento total	27,35 m	60,96 m	60,96 m
Boca	12 m	10,67 m	10,67 m
Pontal	3,63 m	4,27 m	4,90 m
Calado	2,12 m	3,66 m	3,66 m
Propulsão	2 x 1300 hp	-	-
Velocidade média	5 nós		

Fonte: Autor (2022).

Com isso, fez-se possível estimar o tempo percorrido pela rota Mirituba-Barcarena a partir da distância obtida e da velocidade média do comboio, apresentada na Tabela 2. Além disso, considerou-se o fato de o comboio passar 5 dias fundeado no porto e 7 dias operando em embarque e desembarque de cargas.

Tabela 2. Características da rota.

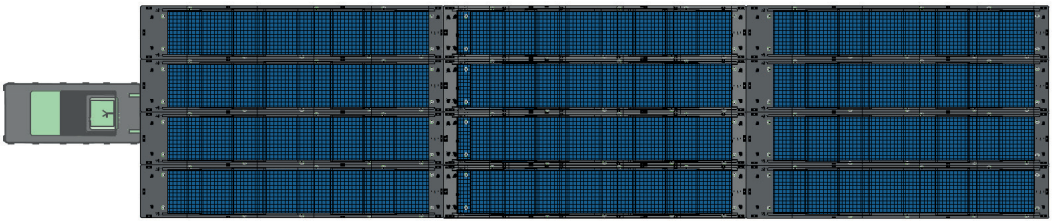
Distância	Velocidade média	Tempo para o percurso
1074 km	5 nós	5 dias

Fonte: Autor (2022).

ÁREA ÚTIL PARA A ALOCAÇÃO DAS PLACAS

Ao se estudar a área útil dos comboios para a alocação de placas fotovoltaicas, notou-se a disponibilidade de uma área de 458,5 m² em cada barcaça, totalizando um total de 5.502 m² para o comboio. A Figura 3 apresenta a alocação das placas sobre as tampas retráteis das barcaças.

Figura 3. Alocação dos módulos fotovoltaicos no comboio.



Fonte: Autor (2022).

ARRANJO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

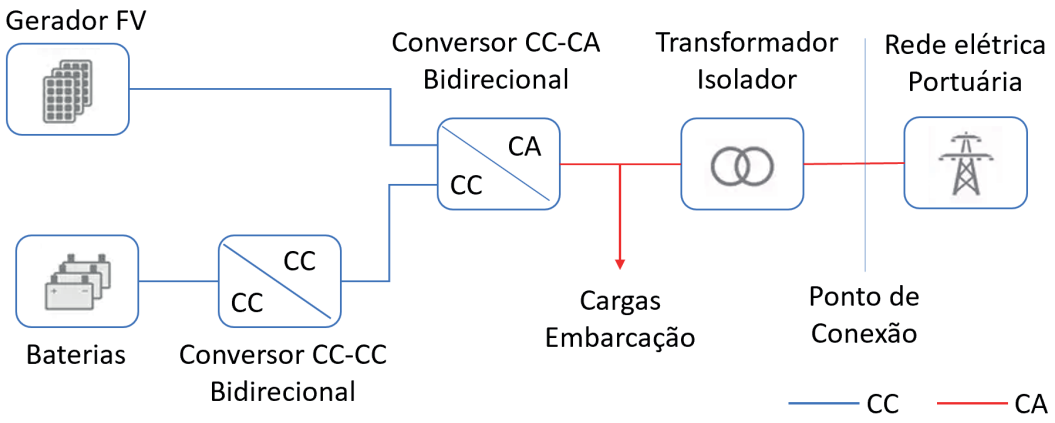
Lee *et al.* (2013), ao realizar um experimento para a operação de um navio de energia híbrida, que as placas solares do lado esquerdo e do lado direito deveriam ser conectadas a controladores de carga independentes, uma vez que o MPP (*Maximum Power Point*) – o maior valor de potência de saída em uma curva de potência – entre estes seria diferente.

Dessa forma, propõe-se que o arranjo do sistema fotovoltaico siga este padrão, com placas solares a esquerda e a direita, seguindo para MPPT´s (*Maximum Power Point Tracking*) distintos do inversor de frequência.

A conexão das baterias do sistema de armazenamento de energia elétrica será realizada através de um acoplamento em corrente contínua no qual os bancos de bateria em paralelo – necessários para aumentar a capacidade de energia armazenada – são conectados através de conversores CC-CC bidirecionais. O Acoplamento CC permite a conexão econômica de banco de baterias, além de ser necessário uma quantidade menor de inversores de bateria e garante uma maior eficiência do sistema, devido a quantidade menor de estágios de conversão (Fotovoltaico – Bateria – Rede Elétrica).

A demanda por energia elétrica da embarcação é atendida pelo conversor CC-CA bidirecionais que converte a energia elétrica em corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos e/ou armazenada nos bancos de baterias em corrente alternada a níveis de tensão e frequências que as cargas requisitam. Além disso, este conversor bidirecional permite o carregamento do banco de baterias quando o comboio estiver fundeado no porto e conectado à rede de distribuição de energia elétrica em terra. Representa-se, esquematicamente, na Figura 4, um diagrama desse arranjo.

Figura 4. Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico.



Fonte: Autor (2022).

BALANÇO ELÉTRICO DA EMBARCAÇÃO

Para iniciar a análise do dimensionamento do sistema fotovoltaico da embarcação, é necessário fazê-lo de acordo com o perfil de consumo, cuja base é o Balanço Elétrico do empurrador do comboio, de modo a conhecer os equipamentos que necessitam de alimentação elétrica e são essenciais para o bom funcionamento da embarcação. A distribuição do balanço elétrico é feita de modo a discriminar em grupos as diferentes manobras executadas pela embarcação em regime de serviço, esteja ele no porto – fundeado ou em carga e descarga, em manobra e fundeado no rio para os diferentes itens. Escolheu-se, para esse caso, 5 grupos:

Máquinas (bombas de incêndio, de esgoto e de lastro, de óleo diesel, de óleo lubrificante etc.);

- Ventiladores, exaustores e aquecedores;
- Equipamentos de iluminação de navegação;
- Equipamentos de copa, cozinha e lavanderia;
- Ar-Condicionado.

Dessa forma, apresenta-se o valor total do balanço elétrico demandado pelo empurrador, considerando o seu pior cenário e um acréscimo de 15% para caso seja necessária a instalação de novos equipamentos elétricos, ou a substituição por outros que demandem uma quantidade maior de energia. Representa-se, assim, o Balanço elétrico pela Tabela 3.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Tabela 3. Balanço elétrico do empurrador.

Grupos	Fundeado no Porto	Operação embarque/desembarque	Em Manobra	Fundeado no Rio
Máquinas	6,61 kW	5,58 kW	11,31 kW	12,31 kW
Ventiladores, Exaustores e Aquecedores	3,77 kW	24,67 kW	24,67 kW	13,03 kW
Equipamentos de Iluminação e Navegação	17,91 kW	17,48 kW	17,48 kW	17,91 kW
Cozinha e Lavanderia	0,91 kW	0,61 kW	4,21 kW	0,91 kW
Ar-Condicionado	7,33 kW	7,33 kW	7,33 kW	7,33 kW
Total	42,01 kW	64,02 kW	74,75 kW	59,21 kW

Fonte: Autor (2022).

IMO (2012), por meio do regulamento 41 da convenção SOLAS (*Safety of Life at Sea*), institui que os sistemas de geração devem ser capazes de garantir que somente um gerador seja capaz de suprir a demanda de energia da operação, de modo a garantir que um sistema adicional consiga operar no fornecimento de energia em caso de uma condição de *dead ship,* referindo-se à situação na qual a embarcação é incapaz de dar prosseguimento a partir de seu próprio funcionamento de energia, sem ajuda externa. Para atender a essa regra, no sistema de geração de energia da embarcação, considerar-se-á dois geradores, sendo um principal e outro atuará como reserva caso ocorra alguma emergência. Dessa forma, opta-se por dois geradores de 90 kW, para atender a demanda no caso mais crítico, com o empurrador em manobra de operação com os comboios.

DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Após o balanço elétrico, obtêm-se a potência necessária dos geradores para se obter o levantamento do consumo. Faz-se necessário o cálculo da energia (watts-hora), utilizando as potências obtidas e seu tempo de utilização. Para isso, elaborou-se uma tabela, com cada caso de regime de serviço, para duas viagens por mês, de modo a estimar seu consumo mensal. A tabela 4 apresenta o consumo de energia da embarcação.

Tabela 4. Consumo de energia por regime de serviço.

Regime de Serviço	Potência	Dias de uso no mês	Consumo mensal (kWh)	Necessidade diária de energia
Fundeado no Porto	42,01 kW	5	5.041,20 kWh	1.008,24 kWh
Operação embarque/desembarque	64,02 kW	11	16.901,28 kWh	1.536,48 kWh
Em Manobra	74,75 kW	10	17.940,00 kWh	1.794,00 kWh
Fundeado no Rio	59,21 kW	5	7.105,20 kWh	1.421,04 kWh

Fonte: Autor (2022).

Com os dados obtidos, parte-se para o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Chase (2018) apresenta resultados para o HSP (Horas de Sol Pleno) - o qual é a insolação diária recebida por uma determinada superfície – de Belém (Pará), o qual é de 5,05 horas.

Foi escolhido, também, um módulo fotovoltaico de potência no ponto máximo de potência de 550 W, cujas características estão explicitadas na tabela 5, e um fator de desempenho de 0,8. As equações 1 e 2 apresentam, respectivamente, o cálculo da energia do módulo e o número de módulos necessários.

Tabela 5. Características do módulo fotovoltaico

	Potência no ponto máximo de potência	Eficiência do módulo	Largura	Comprimento	Área
Módulo Fotovoltaico	550 W	21,33 %	1,13 m	2,27 m	2,57 m²

Fonte: ifonTech.

Equação 1. Energia do módulo fotovoltaico

$$Emf = P \times HSP \times f$$

Equação 2. Número de módulos necessários

$$N = E \div Emf$$

Onde, Emf = Energia do módulo fotovoltaico; P = potência de pico do módulo; HSP = horas de sol pleno; f = fator de desempenho; N = número de módulos necessários e E = necessidade diária de energia, nesse caso, considerou-se a mais crítica da Tabela 4 (1.794 kWh/dia).

RESULTADOS

Com os dados obtidos a partir da metodologia, fez-se possível calcular a quantidade de módulos necessários e a área necessária para suprir a demanda energética da Tabela 4. A Tabela 6 organiza esses dados e seus respectivos resultados.

Tabela 6. Dimensionamento do número de módulos necessários

	Potência de pico do módulo	HSP	Fator de desempenho	Energia do módulo fotovoltaico	Número de módulos necessários	Potência de Pico do Gerador	Área da placa	Área necessária
Resultados	550 Wp	5,05	0,8	2,2 kWh/dia	816	448,8 kWp	2,57 m²	2.097 m²

Fonte: Autor (2022).

Ao fim do dimensionamento do número de módulos necessários, notou-se que a área necessária para suprir a demanda na condição mais crítica é inferior à área disponível no comboio, optou-se, então, por avaliar a energia gerada no caso de toda a área disponível nas tampas das barcaças estar mobilizada para a geração de energia fotovoltaica – assim

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

como mostrado na Figura 3. A Tabela 7 apresenta esses dados, realizando o mesmo processo de cálculo com a Equação 1 e com a Equação 2.

Tabela 7. Dimensionamento da energia gerada pelo comboio.

	Área disponível	Área da placa	Número de módulos alocados	Energia do módulo fotovoltaico	Energia gerada por dia
Resultados	5.502 m²	2,57 m²	2.140	2,2 kWh/dia	4.708 kWh/ dia

Fonte: Autor (2022).

DISCUSSÃO

No que concerne à geração de energia diária de um possível comboio composto de placas solares alocadas sobre suas tampas retráteis, nota-se sua capacidade de gerar energia, devido à grande área disponível para esse fim. Com uma geração diária capaz de suprir mais que o dobro de sua necessidade crítica operacional, é propício decidir o que realizar com o restante da energia - a qual necessitará de um banco de baterias para seu armazenamento – e o quão econômico se faz utilizar a geração de energia em placas fotovoltaicas em contraponto a um gerador de 90 kW capaz de suprir a mesma demanda do empurrador.

Entre os possíveis destinos finais para a energia armazenada em baterias, as quais podem ser de diversos tipos – a exemplo de Lítio e de Chumbo-Ácido – pode-se ressaltar a possibilidade de se abastecer em terra o que foi produzido durante as viagens e durante o período fundeado, utilizando parte da energia gerada para o consumo e o restante para esse fim, em contraponto a usá-la somente para o sistema elétrico da embarcação. Pode-se optar, também, por energia híbrida, utilizando um gerador, em caso de fenômenos extremos que impossibilitam a geração de energia fotovoltaica, para a geração de emergência, como apresentado por Abdullah *et al.* (2010) ao comprovar que a utilização de energia híbrida é mais sustentável em termos de fornecimento de energia em áreas rurais, devido a períodos mais nublados, de modo a não depender somente de um sistema de fornecimento fotovoltaico.

Ademais, é cabível analisar a economicidade do uso desse sistema em paralelo ao uso de um gerador a diesel, para isso, tomou-se como base um gerador trifásico de 90 kW, cujas características do seu sistema de combustível seguem na Tabela 8. A partir do consumo de diesel do gerador, foi possível realizar um cálculo de comparação de gasto de consumo, verificando o quanto se economiza de combustível mensalmente ao utilizar as placas fotovoltaicas na Tabela 9. Para isso, foi considerado o caso de consumo de 75% para fins de cálculos; as horas de viagem mensais foram obtidas a partir da Tabela 4, para duas viagens de 5 dias ao mês e o preço médio do diesel do dia 28 de outubro de 2022.

Tabela 8. Consumo de diesel por um motor de 90 kW.

	25% de consumo	50% de consumo	75% de consumo	100% de consumo
Consumo (L/h)	6,3	11,1	16,2	21,5

Fonte: Solé Diesel.

Tabela 9. Economia de combustível mensal.

Consumo (L/h)	Horas de operação ao mês	Preço médio do Diesel (R$/L)	Economia mensal (R$)
16,2	240	6,72	26.127

Fonte: Autor (2022).

Ao analisar a Tabela 9, percebe-se que a instalação das placas solares para o abastecimento do sistema elétrico do empurrador gera uma economia mensal de combustível de R$ 26.127,00. Vale salientar que é possível realizar um estudo de viabilidade econômica, para um *payback* considerando todo o sistema fotovoltaico, o qual, entretanto, não é o objetivo primário desse artigo.

CONCLUSÃO

Ao finalizar o presente estudo, foi perceptível a análise de alguns pontos importantes em relação a alocação das placas fotovoltaicas em um comboio-tipo que navega na rota Mirituba – Barcarena. Nesse viés, destaca-se que a área e a energia gerada são superiores às necessárias para abastecer o sistema elétrico do empurrador no seu regime de operação mais crítico e a economia mensal ao se utilizar a energia solar. É importante também ressaltar que essa embarcação possui um potencial de uso para armazenar a energia adquirida durante a viagem em baterias.

Torna-se imprescindível o avanço de estudos sobre casos como esse, que fortaleçam a navegação interior a utilizar mais de fontes limpas de energia, visto a tendência mundial de descarbonização de embarcações. Nota-se, ao avaliar as bibliografias disponíveis, uma massiva quantidade de estudos dessa linha voltados para o transporte marítimo, e pouco se fala sobre a possibilidade da utilização do transporte fluvial nessa mesma linha de energia limpa. É cabível a criação de mais estudos para implementar meios que venham a reduzir a emissão de gases poluentes pelas embarcações fluviais, utilizando a energia fotovoltaica.

Além disso, tem-se como ponto importante o estudo do comportamento das embarcações quando se utilizam e se alocam – e onde seriam alocadas – as baterias e os outros componentes do sistema fotovoltaico, os quais adicionam peso à embarcação. Dessa maneira, há a possibilidade de se ocorrer mudanças na estabilidade do empurrador, caso estes estejam alocados nas suas dependências, ou nas barcaças.

Com os avanços dos estudos, pode-se determinar o que será realizado com a energia gerada superior a necessária para o empurrador, permitindo que esta possa ser reaproveitada para o porto, ou para locais periféricos. Abre-se margem, por fim, para estudos de viabilidade econômica e estudos ambientais que venham a viabilizar projetos futuros no que concerne a embarcações fotovoltaicas no transporte fluvial.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, M. O. et al. Review and comparison study of hybrid diesel/solar/hydro/fuel cell energy schemes for a rural ICT Telecenter. **Energy**, v. 35, n. 2, p. 639–646, 2010.

BENASSULY BARROS, M. J. De agrovila a nó logístico do agronegócio na Amazônia: o caso de Mirituba, Itaituba, Pará. **Geosul**, v. 34, n. 71, p. 382–406, 2019.

BRANDÃO, R. **Acesso ao Sol e à Luz Natural: Avaliação do impacto de novas edificações no desempenho térmico, luminoso e energético do seu entorno**. Dissertação—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2004.

CASTRO, J. **Tendências de Evolução dos Transportes Marítimos Internacionais e Implicações nas Infraestruturas**. Dissertação—Porto: Universidade do Porto, 2018.

CHASE, O. A. et al. A Low-Cost, Stand-Alone Sensory Platform for Monitoring Extreme Solar Overirradiance Events. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 18, n. 8, p. 2685, 2018.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Second IMO GHG Study**, 2009.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **SOLAS**, 2012.

LAN, H. et al. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system. **Applied energy**, v. 158, p. 26–34, 2015.

LEE, K.-J. et al. – Experimental investigation. **Energy (Oxford)**, v. 49, n. 1, p. 475–483, 2013.

PAULSON, M.; CHACKO, M. Marine Photovoltaics: A review Of Research and Developments, Challenges and Future Trends. set. 2019.

Painel Solar Fotovoltaico Jinko, Tiger Pro, Mono, 550W - 176680-1 (PALLET COM 4 UNIDADES). **ifonTech**. Disponível em: < https://bityli.com/JNZWhjME>. Acesso em: 12 de jun. 2022.

Solé Diesel *marine generator* 115 GT/GTC. **Solé Diesel**. Disponível em: <https://www.solediesel.com/en/sole-diesel-marine-generator-115-gt-gtc-fa0744>. Acesso em: 17 de jun. 2022.

SONG, X. et al. A New Numerical Modelling Method for System Energy Efficiency Calculation. **Elektronika ir elektrotechnika**, v. 24, n. 6, p. 55–59, 2018.

TERCAN, Ş. H. et al. Financial and Technical Analyses of Solar Boats as A Means of **Sustainable Transportation**. Sustainable production and consumption, v. 25, p. 404–412, 2021.

02

A viabilidade do Porto de Santana no contexto do Projeto Arco Norte e seus condicionantes

Álisson Sousa da Silva
Universidade Federal do Pará - UFPA

Maisa Sales Gama Tobias
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221010378

RESUMO

A análise da viabilidade das instalações portuárias na Amazônia configura-se como uma questão a ser observada para o uso dos portos da região Norte, no âmbito do projeto Arco Norte, como parte das alternativas de escoamento para a produção do Centro-Oeste brasileiro, dentre elas, a rota de grãos através da região Oeste do Pará. Tendo em vista a capacidade estimada de exportação do projeto Arco Norte, levanta-se a questão da capacidade dos portos para comportar o fluxo de carga. Dentre os portos apontados, o Porto de Santana se destaca por sua proximidade junto ao mar e aos destinos da soja; dotação de área de ampliação, para sua expansão e; ociosidade atual no potencial de ocupação. Diante do exposto, este artigo apresenta uma pesquisa de natureza documental e analítica de dados secundários, referente aos estudos sobre a viabilidade do Porto de Santana no contexto do projeto Arco Norte e, aponta aspectos críticos para a viabilidade portuária. A metodologia consistiu numa revisão de literatura de estudos, seguida de sistematização de resultados e discussão. Nos resultados obtidos, tem-se a identificação de condicionantes para a viabilidade do Porto de Santana, dentre eles: as oscilações da demanda de soja no mercado internacional, em relação aos respectivos destinos; a necessidade de realização de obras de dragagem no canal de navegação de acesso ao porto; a necessidade de ampliação do cais do porto para atracação de embarcações de longo curso; a melhoria nos acessos atuais por terra e a abertura de acessos às novas áreas de expansão; a promoção da integração institucional da gestão portuária e a diligência nos entraves jurídicos, no que concerne às áreas populacionais de ocupação de natureza informal em áreas de expansão do porto.

Palavras-chave: Arco Norte, Porto de Santana, Soja, Viabilidade.

CONTEXTUALIZAÇÃO

A produção de soja no Brasil nos anos de 2020 e 2021 atingiu 135.409 milhões de toneladas, em área plantada de 38.502 milhões de hectares, com produtividade de 3.517 kg/ha, garantindo-lhe o título de maior produtor mundial de soja (CONAB, 2021). Llorca *et al.* (2018), evidenciou que 80% da soja brasileira é escoada através das regiões Sul e Sudeste, tendo como principais portos exportadores Santos e Paranaguá. Entretanto, nota-se um crescimento de portos mais ao Norte do Brasil, com destaque para Vila do Conde, Itacoatiara, Miritituba (Itaituba), Santarém e Santana, evidenciados nos últimos anos como componentes do chamado Arco Norte. Até recentemente, pouco se questionava o potencial de exclusividade da movimentação portuária e do escoamento da produção pelos portos das regiões Sul e Sudeste do Brasil, apesar da estimativa inicial, o progressivo poder de atração da infraestrutura logística dos portos do Arco Norte veio prevalecendo, com isso os terminais portuários do Norte já são responsáveis pela metade dos despachos de grãos de soja para exterior (SARDINHA *et al.*, 2021).

Em termos de tecnologia de transportes empregada, (PEREIRA, 2016) apontou que o Brasil exportava 60% da soja produzida por rodovia, 30% por ferrovia e 10% por hidrovia, o que elevava o custo de escoamento, refletindo no preço do produto final; tendo como exemplo o custo por tonelada gasto pelo produtor para exportar os grãos na Argentina e nos EUA, sendo de US$ 20, enquanto que a média no Brasil era de US$ 92. A introdução do modal hidroviário de cargas, combinado com o transporte ferroviário reduziria os custos em 44% e, no transporte rodoviário, 84%.

(CAIXETA FILHO *et al.*, 2019) observaram que em regiões onde a infraestrutura de transportes permitiu a exportação de grãos pelo Norte, referindo-se a ferrovia Carajás e a hidrovia do Rio Madeira, dois fatores básicos foram responsáveis para redução de custos, com essa mudança de direção do escoamento da soja: a utilização da multimodalidade e a redução da distância até um porto no estrangeiro. Adicionalmente, a combinação entre os diversos modais como alternativa de transporte, à despeito da predominância do modal rodoviário, permitiu que os custos unitários de transporte fossem minimizados; enquanto a redução da distância até aos portos tradicionais tem diminuído pelo fato da produção de soja estar se desenvolvendo cada vez mais em direção à região setentrional do Brasil.

É válido ressaltar que no corredor norte (Arco Norte) possui maior utilização do modal hidroviário quando comparado com sul (4%), sudeste (5%) e nordeste que não apresenta porcentagem representativa na utilização deste modal (MTPA, 2017). No que tange o projeto Arco Norte, a iniciativa busca um corredor de transporte e movimentação de mercadorias estabelecido através de um programa político com alianças lógicas e capitalistas através do

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

escoamento de produtos pelas vias hidroviárias setentrionais inerentes a navegação fluvial interligada com o centro sul do Brasil.

Neste contexto, inserido no corredor logístico do Norte existem os portos de Miritituba (Itaituba), Santarém e o Porto de Santana, que apresentam benefícios em economia de escala e multimodalidade, constituindo-se como uma alternativa logística de transporte, escoamento, armazenamento, transbordo e, recebimento e fornecimento de insumos para a produção de grãos; aliada à uma condição estratégica de localização, que trará redução do tempo de escoamento, maior competitividade e, consequente lucro, no mercado global de *commodities*. Em se tratando dos portos de Miritituba (Itaituba), Santarém e Santana, destaca-se o Porto de Santana, por sua proximidade junto ao mar e aos destinos da soja; dotação de área de ampliação, para sua expansão e; ociosidade atual no potencial de ocupação. Além disso, a perspectiva de contribuir para o desenvolvimento urbano, uma vez que Santana se localiza junto à capital do Estado do Amapá, Macapá. A relação porto-cidade é extremamente relevante do ponto de vista social e econômico (TOBIAS *et al.,* 2019).

Do ponto de vista histórico, o Porto de Santana teve sua construção iniciada em 1980, para atender a movimentação de mercadorias por via fluvial, transportadas para o Estado do Amapá e para a Ilha de Marajó. Todavia, pela sua posição geográfica privilegiada, tornou-se uma das principais rotas marítimas de navegação, permitindo conexão com portos de outros continentes, além da proximidade com o Caribe, Estados Unidos e União Europeia, servindo como porta de entrada e saída da região amazônica. Segundo informações de Silva (2016), estima-se que o faturamento com a exportação de soja do porto Santana alcance R$ 50 milhões em 2016 e, nos próximos dez anos, a previsão é de chegar a R$ 4 bilhões. A capacidade é de movimentar 1,8 milhões de toneladas de soja por ano, envolvendo parte dos grãos de soja produzidos no Mato Grosso e outros Estados. Atualmente, uma das empresas de gestão do porto está construindo outro terminal na Ilha de Santana, em frente ao atual porto, com estrutura para movimentar 3,5 milhões de toneladas e, também, esmagar soja e produzir ração.

Diante do exposto, o presente artigo apresenta os resultados de uma pesquisa que teve como objetivo identificar os condicionantes da viabilidade logística do Porto de Santana no contexto do projeto Arco Norte; como forma de contribuir com diretrizes para o seu aproveitamento, na perspectiva de composição da rede nacional intermodal de transporte, reduzindo o custo Brasil, dinamizando a economia regional e abrindo oportunidade de desenvolvimento social na região Norte.

O PROJETO ARCO NORTE

Para melhor situar sobre o projeto Arco Norte, apresenta-se as suas características centrais, onde o Porto de Santana está situado. Ver Figura 1. Os portos localizados nas regiões Norte e Nordeste brasileiras compõe o corredor de exportação de granéis agrícolas da produção de soja no Brasil, denominado como Arco Norte. Este corredor é formado, sobretudo, pelos portos de: Porto Velho (Rondônia – RO), Manaus (Amazonas - AM), Miritituba (Pará - PA), Santarém (Pará - PA), Barcarena (Pará - PA), Santana (Amapá - AP), São Luís (Maranhão - MA).

Figura 1. Portos do Arco Norte e a rota de escoamento do Mato Grosso até o Porto de Santos.



Fonte: Autores, 2022.

De acordo com João *et al.* (2016), a utilização crescente desses portos se justifica basicamente por serem soluções mais competitivas em termos de custos e minimização de impactos ambientais, com a integração das modalidades hidroviárias e ferroviárias. Na Figura 1 apresenta-se os portos do Arco Norte, chamado de Arco Amazônico. O Estado do Mato grosso, possivelmente, será o Estado com maiores benefícios através deste projeto, pelo fato de ter o frete mais caro do país (TOMAZELE, 2014). Com a inversão da rota do escoamento da produção, ao invés do deslocamento para os portos do Sul e Sudeste, a produção seguirá as vias da região Norte do país e, como consequência, haverá redução no custo do frete e no tempo de entrega ao consumidor final (NAVES; SOARES, 2008).

O crescimento da demanda de soja é efeito decorrente, também, de demandas secundárias, como a da evolução mundial do mercado de carnes, que tem como base uma fonte de proteína vegetal de alto valor biológico, proporcionada pela soja; o que impactou de

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

forma crescente a demanda por cereais ou farinhas proteicas para uso em fonte de proteína e carboidratos, para a fabricação de ração animal. Os produtos substitutos não apresentam vantagens a ponto de competir com os derivados da soja, principalmente, em relação ao farelo, que hoje é primordial no mercado por ser considerado a melhor fonte de proteína do mundo, aliado aos custos de aquisição no mercado, em relação a produtos alimentícios comuns (ABIOVE, 2022). A região Centro-Oeste do Brasil se destaca pela produção de grãos desde a década de 1980 e, no início da década de 1990, tornou-se o maior produtor de soja do país, em especial o Estado de Mato Grosso, como principal centro de produção agrícola. Em suma, a razão inicial do surgimento do projeto Arco Norte, foi com o intuito de reduzir custos logístico e facilitar o escoamento por estar mais próximo da área de produção (OLIVEIRA *et al,* 2021).

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa teve caráter essencialmente de estudo documental, sistematização da literatura sobre viabilidade logística do Porto de Santana e os aspectos críticos apontados. Para o desenvolvimento do artigo foi utilizado o método de pesquisa exploratória dividida nos seguintes momentos: revisão de literatura sobre o assunto, análise dos resultados, discussão e identificação dos condicionantes. A revisão de literatura teve como base metodológica a que foi empreendida por Silva *et al.* (2022), incluindo a literatura levantada. Também, foi empreendida leitura e síntese dos estudos sobre o Porto de Santana, encontrando-se apresentados na Tabela 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise da literatura obtida, foi possível estabelecer alguns condicionantes de viabilidade do Porto de Santana, nomeadamente: Condicionante 1 - As oscilações da demanda de soja no mercado internacional, em relação aos respectivos destinos; Condicionante 2 - A necessidade de realização de obras de dragagem no canal de navegação de acesso ao porto; Condicionante 3 - A necessidade de ampliação do cais do porto para atracação de embarcações de longo curso; Condicionante 4 - A melhoria nos acessos atuais por terra e a abertura de acessos às novas áreas de expansão; Condicionante 5 - A promoção da integração institucional da gestão portuária; Condicionante 6 - Diligência nos entraves jurídicos quanto à ocupação irregular e; Condicionante 7 – A necessidade de dotação de infraestrutura e pessoal de apoio: equipamentos, armazéns gerais e recursos humanos qualificados para movimentação de carga.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

CONDICIONANTE 1: AS OSCILAÇÕES DA DEMANDA DE SOJA NO MERCADO INTERNACIONAL, EM RELAÇÃO AOS RESPECTIVOS DESTINOS

O agronegócio tem despertado excelentes oportunidades de melhorias em várias frentes, com potencial de expansão significativos com ganhos econômicos e sociais, sendo fortalecido pela alta demanda de consumo vinda dos mercados internacionais. No comércio de soja, existe um papel desafiador, que se constitui em manter-se a demanda estável, sobre uma oferta agrícola que alternar-se de maneira aleatória em determinados períodos, levando o mercado a uma transição constante.

Neste cenário, o Brasil ganha destaque no contexto internacional, sobre países onde a escassez de terras, aptas para expansão do agronegócio tem o seu clima extremamente desfavorável, por se localizarem em áreas como a zona temperada do Norte, como EUA e Europa. O clima é um dos principais fatores que afetam a oferta dos mercados de grãos, pois os produtores dependem da natureza e do clima ideias para que consigam realizar uma boa colheita.

Além do clima, os preços dos insumos utilizados pelos produtores no cultivo de grãos, também impactam sobre a oferta pois os preços mais baixos de insumos aumentam os lucros e incentivam o produtor a plantar mais, potencialmente aumentando a oferta. Entre todos os aspectos citados, o Brasil se torna um grande exportador, e com vantagens estratégicas produtivas, alinhando suas exportações para suprir a necessidade dos mercados que apresentam baixa produtividade em períodos de escassez.

Em termo de comércio internacional Lazzarotto (2009), expõe que nas últimas duas décadas houve crescimento altamente expressivo das exportações de soja em grão, com destaque para Brasil e Argentina, que aumentaram as exportações a taxas anuais para os mercados internacionais, respectivamente, de 13,0% e 9,9%.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Tabela 1. Revisão de Literatura.

Referências	Contribuições
Vale *et al.* (2016)	Título: Arco Norte: o desafio logístico Descreveu o projeto Arco Norte e analisou a produção e os ganhos de competitividade do país com a implantação do projeto e as vantagens para o crescimento exponencial da economia.
Cardoso (2017)	Título: Modelo e Simulação da Capacidade Operacional de um Corredor Logístico do Arco Norte Melhorias para estações de transbordo de cargas e maior otimização do tempo de operação de descarga, com possibilidades de integração entre corredores logísticos.
Pereira (2017)	Título: Implantação de Terminal Portuário no Corredor Logístico de Exportação do Arco Norte: fatores de decisão entre porto público e terminal de uso privado. Análise de fatores e benefícios do escoamento pelos portos da região Norte e a validação do emprego da intermodalidade hidroviária e rodoviária, como alternativas mais viáveis.
Silva (2017)	Título: O impacto potencial do desenvolvimento dos portos do Arco Norte na valorização das fazendas de Sinop-MT: uma análise do corredor da BR – 163 Caracterizou os benefícios estabelecidos após a conclusão da BR-163 na valorização das fazendas na BR 163, corredor do Arco Norte.
Pêgo Filho *et al.* (2018)	Título: Fronteiras do Brasil: uma avaliação do Arco Norte Coletou ideias e reflexões sobre as fronteiras brasileiras, ocorridos nas regiões de saída das fronteiras do projeto Arco Norte com a Guiana e a Venezuela.
Araújo *et al.* (2018)	Título: A importância do modal hidroviário para a consolidação da operação do Arco Norte Caracterizou as alternativas para os transportes de grãos com a utilização de comboios fluviais, através dos corredores logísticos do Arco Norte no Estado do Pará.
Rodrigues (2018)	Título: O Arco Norte e as políticas públicas portuárias para o Oeste do estado do Pará (Itaituba e Rurópolis): apresentação, debate e articulações Analisaram as rotas do Arco Norte na Região Oeste do Pará e suas repercussões sociopolíticas.
Souza (2020)	Título: Otimização de Rotas de Escoamento de Soja do Mato Grosso Através do Arco Norte A Alternativas intermodais de transportes, com redução de custo, favorecendo o hidroviário e ferroviário.
Rodrigues *et al.* (2020)	Título: Produção territorial portuária na Amazônia: ajustes, ordenamentos e práticas espacial face a produção do complexo portuário de Santana, Amapá, Brasil. Relata a produção territorial portuária na Amazônia (política territorial), por meio dos ajustes, ordenamentos e práticas espaciais, na configuração espacial do Complexo Portuário de Santana.
Gomes Galindo *et al.* (2021)	Título: O Porto de Santana no Estado do Amapá como canal para o desenvolvimento do comércio internacional da Amazônia Evidencia-se que as condições em que se apresenta o Porto Organizado de Santana no Estado do Amapá como um canal de oportunidades, para o desenvolvimento do comércio internacional na região amazônica.
Sardinha *et al.* (2021)	Título: Complexo Portuário de Santana (Amapá-Brasil): da interação regional à conexão internacional. Enfatiza o espaço relacional do Complexo Portuário de Santana como ponto de conexão entre os sistemas de circuitos e sua importância para a região das guianas e suas políticas territoriais de ajustes

Fonte: Autores, 2022.

De acordo com Cagnin (2022), os principais destinos demandantes de soja em grãos são: Rússia, União Europeia, China, Argentina e Estados Unidos, tornando o Brasil protagonista no escoamento de sua produção, garantindo maior facilidade e em menor tempo por ter seus portos mais próximo de seus consumidores. Os benefícios surgem a longo prazo, com os volumes de cargas movimentadas nos portos aumentando constantemente. Entretanto, o crescimento do comércio exterior e as alterações na dinâmica do mercado impõe novos desafios aos portos.

À medida que o Brasil se insere na economia global, fortalece sua participação e representatividade, a capacidade instalada nos berços, pátios e acessos foi sendo modificada e exigiu nova infraestrutura e capacidade de fiscalização e controle da operação portuária, objetivando que os serviços sejam realizados com regularidade e eficiência. Na condição apresentada e demanda de soja produzida na região centro oeste do Brasil, tem-se o Porto

de Santana como possível elo de interligação entre origem e destino e uma nova fronteira de expansão para produção de grãos e como uma alternativa através da matriz hidroviária brasileira, unida a criação dos Corredores Logísticos e o Projeto Arco Norte para maior competitividade, encurtando a distância e reduzindo tempo e os custos deste commodities, para o mercado internacional.

Ainda, como efeito de análise, o Amapá recebe estímulos ao fomento da produção de soja local, para atendimento desta demanda internacional, contribuindo em grande escala, para desenvolvimento local. Atualmente, observa-se que o município de Macapá possui a maior área plantada, seguido por Tartarugalzinho e Itaubal. A produção de soja no Amapá está em constante crescimento, a produção esperada para a safra 2018 era de 61.545 (sessenta e um mil, quinhentos e quarenta e cinco) toneladas. Porém em função da queda na produtividade, a produção na Safra 2018 foi de aproximadamente 57.850 (cinquenta e sete mil, oitocentos e cinquenta) toneladas (RURAP, 2019a).

O plantio de soja no Estado do Amapá teve início em 2011 e, em 2012 com a implantação do terminal graneleiro entra no circuito produtivo da soja. A área plantada no Estado vem aumentando com o passar dos anos. As áreas de plantio de soja no Estado do Amapá estão concentradas num raio de 250 Km de distância do Porto de Santana, por onde é escoada toda a produção. Os municípios produtores são: Macapá (ao longo da BR-156, AP-070, AP-340 e Distrito do Pacuí), Itaubal do Piririm, Porto Grande, Ferreira Gomes e Tartarugalzinho (RURAP, 2019b). Diante do exposto, o estado do Amapá está em fase inicial de desenvolvimento de agricultura em grande escala, e verifica-se o aumento gradativo nas áreas plantadas com o decorrer dos anos, o que nos faz concluir que com o aumento de investimento em tecnologia de produção, a produtividade crescerá exponencialmente.

CONDICIONANTE 2: A NECESSIDADE DE REALIZAÇÃO DE OBRAS DE DRAGAGEM NO CANAL DE NAVEGAÇÃO DE ACESSO AO PORTO

A porta de entrada para o acesso ao Porto de Santana é natural e tem início na Barra Norte do Rio Amazonas, considerando embarcações que navegam na direção jusante-montante, até o atracadouro do Porto. Ver Figura 2.A atividade geomorfológica é intensa no Rio Amazonas e seus afluentes, acarretando fenômenos de erosão e sedimentação em virtude do intenso transporte de sedimentos. Além disso, a água do rio possui coloração uniforme e barrenta, o que impede a identificação de pontos de baixa profundidade, dificultando a navegação por essa modalidade e o acesso de navios de classes acima do Panamax, por limitar o calado de navegação em 11,5 metros e as correntes transversais de maré reiteram a necessidade de cautela dos navegantes. Apesar de não haver homogeneidade, pode-se afirmar que a profundidade no canal de acesso ao Porto de Santana é de 30 metros (CDSA, 2017).

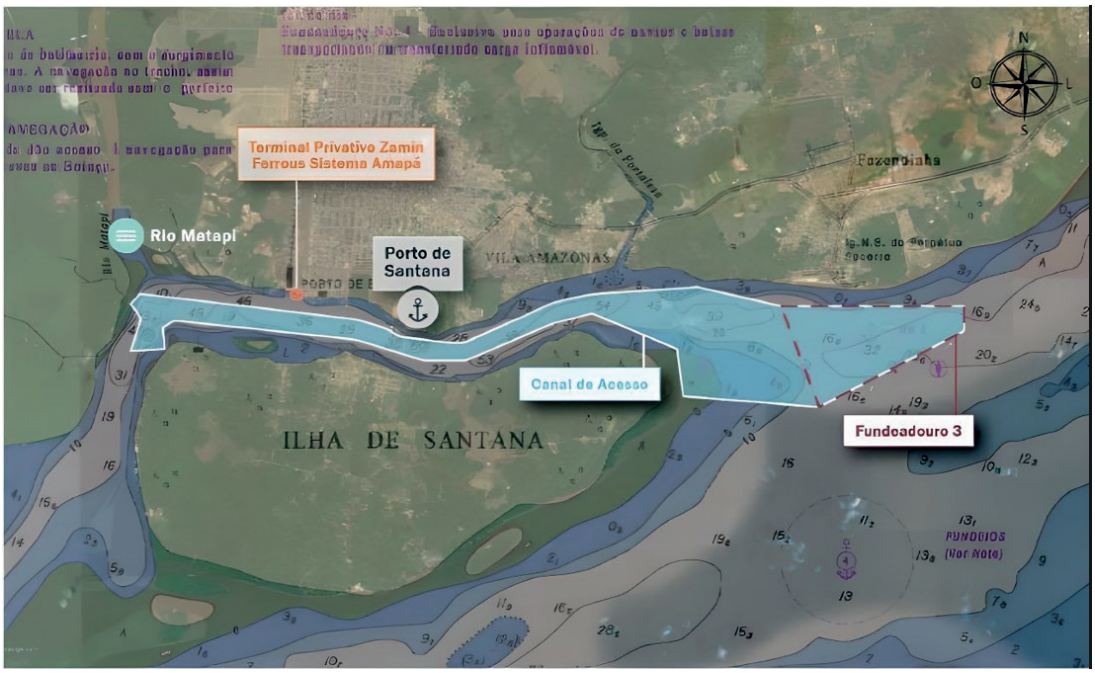
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Neste contexto, tramita na assembleia legislativa o projeto denominado Barra Norte tem como objetivo primário aumentar o calado para navegação pelo Barra Norte de 11,5 m para 12,5 metros. A evolução se dará de forma progressiva. Desde o ano de 2018 o calado para navegação segura passou para 11,5 metros. O ganho de 20cm de calado representa um aumento de 1.800 toneladas em cada navio Panamax, aproximadamente 36 caminhões de carga bitrem. No ano de 2020 a Marinha do Brasil através a Portaria 122/2020 do 4º Distrito Naval autorizou testes para calado de 11,9 m, de forma que, se aprovado com condições de navegabilidade segura, o ganho será de 40cm. Os testes, por determinação da Autoridade Marítima, deverão ser no total de 10, com acompanhamento de práticos com pelo menos três anos de experiência e serão acompanhados de um representante da Autoridade Marítima (MTPA, 2017).

A Capitania dos Portos do Amapá - CPAP orienta que navios com calado próximo de 10 metros necessitam calcular a hora da preamar na barra e investir com, no mínimo, três horas de enchente, ou seja, três horas após a baixa-mar. Para navios que transportam produtos perigosos, a folga abaixo da quilha deve ser de pelo menos 1,0 metro. As demais embarcações devem seguir a orientação de (FAQ) de 0,5 metros. Dessa maneira, para os navios com o calado máximo (11,5 metros), o nível de maré necessário para produtos perigosos e não perigosos é de 2,5 metros e de 2,0 metros, respectivamente. Com isso, navios com menos de 9,0 metros de calado podem investir a Barra Norte a qualquer momento e, caso estejam transportando produtos perigosos, o calado máximo sem dependência da maré é de 9,5 metros. De acordo com o roteiro da Marinha para a Costa Norte, as características da região – tais como costa baixa, bancos de areia e lama nas margens, alto índice de nebulosidade e pluviosidade, longos intervalos entre as passagens dos satélites artificiais pelas proximidades do equador, coloração da água do rio etc. – prejudicam a navegação e, portanto, dificultam o reconhecimento e a demanda desse trecho (MTPA, 2017).

Os armadores locais estão buscando uma expansão em seus negócios, e os pedidos feitos a estaleiros nos últimos tempos têm sido de navios cada vez maiores. Nesse sentido, em termos estratégicos, é interessante que o porto tenha condições adequadas para receber navios maiores. Considerando este aspecto, o Porto de Santana opera qualquer tipo de embarcação, na poligonal do porto e na sua bacia de evolução, sendo que o seu gargalo atual é a foz do Canal do Norte, que possui uma profundidade limite de 12,4 metros. Diante do exposto, é evidente a necessidade de realização de obras de dragagem no canal de navegação de acesso ao porto, o que exige também estudo que avalie os impactos de uma dragagem do Canal Norte.

Figura 2. Canal de Acesso ao Porto de Santana.



Fonte: Companhia Docas de Santana – CDSA, 2017.

CONDICIONANTE 3 - A NECESSIDADE DE AMPLIAÇÃO DO CAIS DO PORTO PARA ATRACAÇÃO DE EMBARCAÇÕES DE LONGO CURSO

O Porto de Santana, dispõe de um cais público acostável, divididos em dois trechos, denominados Píer 1 e Píer 2, ambos os píeres possuem um berço de atracação com sobre carga admissível de t/m² e pavimentação do tipo rígida. A capacidade de cais do Porto de Santana mostra-se insuficiente para a movimentação de granéis vegetais, principalmente, soja e milho, tanto no sentido de embarque de longo curso, quanto no desembarque de navegação interior. Além disso, a capacidade de armazenagem mostra-se insuficiente para atender à demanda prevista de grãos.

Com aumento da demanda de cargas a serem movimentas originada da navegação de longo curso no Porto de Santana (cavaco de madeira, farelo de soja, trigo, minério de ferro, soja e milho), haverá a necessidade de revitalização de máquinas e ferramentas de movimentação e como proposta indica que devem ser avaliadas alternativas como: mudanças nas destinações operacionais dos berços existentes no Porto; melhorias operacionais e até a mesmo a construção de novos berços.

Segundo a Companhia Docas de Santana - CDSA (2017), a construção de um terminal de uso privado apresenta-se como solução para o déficit de capacidade para movimentação de grãos no médio prazo. No entanto, algumas ações são necessárias para atender à demanda projetada de movimentações de carga para um horizonte de longo prazo. Devem ser avaliadas alternativas de melhorias operacionais, assim como, mudanças nas

destinações operacionais dos berços existentes e a avaliação da construção de novos berços em projeções futuras.

CONDICIONANTE 4 - A MELHORIA NOS ACESSOS ATUAIS POR TERRA E A ABERTURA DE ACESSOS ÀS NOVAS ÁREAS DE EXPANSÃO

A CDSA possui uma área alfandegada que totaliza 50 mil m². Com a saída do prédio administrativo e sua substituição pelos silos de uma empresa privada, a Caramuru, não houve alteração no espaço delimitado, aumentando a área operacional em 3.186,74 m², havendo expectativa de expansão em médio e longo prazos. Ver Figura 3. Portanto, a atual poligonal do Porto Organizado de Santana compreende áreas que a CDSA desconhece a titularidade, impondo um empecilho a qualquer ação pretendida para as mesmas e impedindo qualquer exercício de planejamento. As áreas que atualmente estão em processo de reintegração de posse, apresentadas na Figura 4, onde há a perspectiva de exploração do interesse portuário em médio e longo prazo, necessitam de acessos rodoviários para atingir níveis de serviço adequados.

Figura 3. Acesso às novas áreas de expansão.



Fonte: Companhia Docas de Santana - CDSA, 2017.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 4. Acesso às novas áreas de expansão



Fonte: Companhia Docas de Santana - CDSA, 2017.

O acesso rodoviário restrito, encontra-se em más condições de conservação, tanto as vias de acesso à interior do porto quanto as que proporcionam acesso ao seu entorno e, em última instância, os acessos à área primeira ocupação, possuem sérias restrições. No caso das rodovias que dão acesso à interior do Porto, com destaque para a BR-156 e a BR-210 (Figura 5), a deficiência fica por conta do pavimento da pista, bem como dos acostamentos estreitos e da falta de manutenção na faixa de domínio como um todo, em que é comum a invasão da vegetação sobre essas rodovias. A CDSA não tem acesso ferroviário direto às instalações portuárias, existindo apenas uma ferrovia que faz ligação ao terminal privativo da Anglo Ferrous Brazil, recém adquirido pela empresa Zamin, situado há cerca de dois quilômetros do porto.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 5. BR – 156 e BR 210.



Fonte: Companhia Docas de Santana - CDSA, (2017).

CONDICIONANTE 5 - A PROMOÇÃO DA INTEGRAÇÃO INSTITUCIONAL DA GESTÃO PORTUÁRIA

A CDSA caracteriza-se com uma empresa pública de direito privado responsável por exercer a função de Autoridade Portuária no âmbito do Porto de Santana. Com sede e foro localizado no município de Santana, no estado do Amapá, é uma sociedade anônima de economia mista vinculada à Prefeitura de Santana e regida pela legislação relativa às sociedades por ações, no que lhe for aplicável, e pelo seu Estatuto Social. Como autoridade Portuária é responsável pela administração do Porto e pelo fornecimento de condições satisfatórias de infraestrutura portuária, incumbindo à iniciativa privada as operações portuárias.

No Porto de Santana, a operação é realizada exclusivamente por operadores portuários privados pré-qualificados pela CDSA, podendo ser arrendatários ou não e, ainda, de acordo com a Lei nº 12.815/2013, a CDSA pode atuar nas atividades de locação de equipamentos de propriedade do Porto por interessados na operação de carregamento e desova de contêineres, bem como em operações internas e externas a área de operação e movimentação de cargas do porto.

Ainda, dentro deste conglomerado portuário, atuam alguns representantes da esfera federal, dentre eles: a Receita Federal responsável pelo controle fiscal aduaneiro no Estado, prestando auxilio nas investigações de combate a crimes como: sonegação e fraude fiscais, falsificação de notas fiscais, contrabando, descaminho, pirataria, tráfico de drogas; a Policia Federal realizando a fiscalização da entrada, a permanência, a movimentação e a saída de pessoas, veículos, unidades de carga e mercadorias, sem prejuízo das atribuições das outras autoridades no porto; a Agência Nacional de Transporte Aquaviário - ANTAQ responsável por regular, supervisionar e fiscalizar as atividades de prestação de serviços de transporte aquaviário e de exploração da infraestrutura portuária; o Ministério da Agricultura, Pecuária

e Abastecimento – MAPA sendo responsável pelo fomento do agronegócio e pela regulação e normatização de serviços vinculados ao setor e Agência Nacional de Vigilância Federal – ANVISA que tem a finalidade institucional promover a proteção da saúde da população, por intermédio do controle sanitário da produção e consumo de produtos e serviços submetidos à vigilância sanitária.

No âmbito estadual, o porto não possui representantes diretos, mais investe capital em empresas privadas de capital misto como a Cianport e Amapá Celulose, responsáveis respectivamente pelas exportações de soja e cavaco no estado. Na esfera municipal, o porto tem subordinação direta a Prefeitura de Santana, sendo vinculada a responsabilidade a CDSA. Nesse sentido, o modelo de gestão portuária caracteriza-se como *landlord*, que se constitui num programa de gestão portuária descentralizada. O grande impasse para esta condicionante, constitui-se no modelo de gestão adotado pelo porto, que por ser descentralizado, autônomo e participativo, gera inúmeros precedentes burocráticos, engessando as decisões em comum acordo com o Governo do Amapá e a Prefeitura, não oferecendo segurança, impedido a efetivação de aportes, levantando precedentes e anseios políticos na gestão do porto, que mesmo sendo de uso público de direito, é refém de limitações de interesses pontuais, decorrentes da influência política na composição dos cargos diretivos e de gerenciamento, além da burocracia gerada pela falta de autonomia e excesso de regulação (SANTOS, 2019).

CONDICIONANTE 6 - DILIGÊNCIA NOS ENTRAVES JURÍDICOS QUANTO À OCUPAÇÃO IRREGULAR

Os entraves jurídicos envolvendo o Porto de Santana se iniciam com a regularização fundiária urbana do bairro Novo Horizonte que se sustenta através da na Lei nº 13.465/2017 que dispõe sobre a regularização fundiária rural e urbana, sobre a liquidação de créditos concedidos aos assentados da reforma agrária e sobre a regularização fundiária no âmbito da Amazônia Legal. Ainda, apresenta-se o Art. 9º que determina serem instituídas no território nacional normas gerais e procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana, a qual abrange medidas jurídicas, urbanísticas, ambientais e sociais destinadas à incorporação dos núcleos urbanos informais ao ordenamento territorial urbano e à titulação de seus ocupantes.

Em particular, tem-se o caso do bairro Novo Horizonte, em que o enquadramento se refere as habitações de interesse social que instaura a regularização fundiária aplicável aos núcleos urbanos informais ocupados predominantemente por população de baixa renda, assim declarados em ato do Poder Executivo municipal. Tal regularização fundiária não está separada de uma ação política, já que a atualidade, as políticas públicas territoriais na

escala nacional tendem à fragmentação, isto é, correspondem (e reiteram), de um lado, à crescente especialização dos aparelhos do Estado e à setorização dos planos, programas e projetos" (COSTA, 2016). Tal ação de regularização, em certa dimensão, aponta uma forma de regularizar e conceder títulos de posse para posteriormente haja a possibilidade de articular com maior agilidade as indenizações e remoções de populações das áreas.

CONDICIONANTE 7 – A NECESSIDADE DE DOTAÇÃO DE INFRAESTRUTURA E PESSOAL DE APOIO

O Porto de Santana, desde sua implantação, tem sido peça fundamental para a consolidação de políticas territoriais do Estado do Amapá, quer nas articulações com rotas nacionais e internacionais, quer na própria região Amazônica. Tal importância tem atraído investimentos de operadores públicos e privados, com vistas à ampliações e modernizações técnicas de suas instalações e equipamentos, e de serviços, considerando o que atualmente recebe e exporta, em termos de carga e passageiros.

No entanto, mesmo para os padrões atuais de operação portuária, o porto tem apresentado problemas de infraestrutura, principalmente, de armazenagem e de serviços de apoio (praticagem e rebocagem). Assim, no bojo do projeto Arco Norte e no aumento de suas exportações, as deficiências se tornam condicionantes a serem vencidos, com a reestruturação de seu parque de acessibilidade, armazenagem e ancoragem portuária; para atendimento das exigências de exportação de *commodities*, estendendo de forma gradual as suas operações.

Neste contexto, quanto aos serviços de apoio, tanto em terra, no movimento de carga, quanto na oferta da praticagem, se constituem em um conjunto de atividades de que auxiliam os operadores, fazendo jus às necessidades peculiares do local, proporcionando movimentação interna e navegação segura e eficiente. Para os serviços de rebocagem, exigido para todas as embarcações, exceto para as de pequeno porte e dotadas de propulsor lateral, existe uma única empresa responsável pela prestação do serviço de rebocadores no Porto de Santana (BRASIL, 2016). Portanto, no cenário de inserção do Porto de Santana Infraestrutura portuária do corredor logístico do projeto Arco Norte, é condicionante o reforço nesses serviços.

CONCLUSÕES

A análise documental evidenciou obstáculos ao desenvolvimento de projetos de infraestrutura logística para a viabilidade do Porto de Santana. Com o cenário desenvolvido para o projeto Arco Norte e sua prospecção de escoamento na utilização das vias setentrionais

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

brasileiras, através da navegação fluvial, para atendimento da demanda reprimida de origem do centro-oeste brasileiro, o aparelhamento dos portos, os investimentos em requalificação portuária ou possível reformulação de projeto de planta portuária no Porto de Santana, se constitui um caminho para aumento do custo-benefício e a viabilidade da saída da soja do Centro-Oeste pelo norte do Brasil, rumo ao mercado exterior, que atualmente tem sobrecarregado os portos do Sul e Sudeste.

Os estudos de viabilidade da literatura estudada permitiram identificar sete condicionantes principais no Porto de Santana, que mediante a perspectiva de seu aproveitamento como porto exportador, necessitariam ser dissipados para auferir os benefícios esperados. Alguns condicionantes de cunho institucional e jurídico a serem tratados pelo Estado do Amapá; outros condicionados ligados à investimentos de infraestrutura em terra e no canal navegável, esperados através de investimentos do Governo Federal e, podendo serem associados a parcerias público-privada. A depender da demanda de soja mundial, as perspectivas de crescimento para os destinos em que o Porto de Santana se encontra mais próximo são animadoras e aponta crescimento crescente. Ou seja, a projeção de demanda quanto de produção no Centro-Oeste tem apresentado indicadores atrativos, com custos competitivos internacionalmente, o que torna o projeto Arco Norte algo cada vez mais viável e o Porto de Santana como um ponto de transbordo de carga para exportação, a dizimar-se os obstáculos apontados.

Por fim, a pesquisa deve continuar avançando em estudos pormenorizados dos condicionantes apontados, agregando a análise sistêmica do porto dentro de um corredor logístico, que agrega os demais portos à montante, Miriituba (Itaituba) e Santarém, para uma análise de capacidade da rede portuária da rota de grãos de soja da região Oeste do Pará.

REFERÊNCIAS

ABIOVE - Associação Brasileira de Indústrias de Óleos Vegetais. **Soja e derivados**: evolução das cotações médias. São Paulo/SP, 2022. Disponível em: <https://www.abiove.org.br>. Acesso em 02 out. 2022.

ARAÚJO, A. M.; OLIVEIRA FILHO, A. F.; SILVA FILHO, J. B.; SILVA, J. R.; GONÇALVES, M. N. B. **A importância do Modal Hidroviário para a Consolidação da Operação do Arco Norte.** 2018. 73p**.** (Monografia) 73p, Belém/PA, 2018. Disponível em: <http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/34>. Acesso em 05 out. 2022.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos da Amazônia Oriental. NPCP-CPAOR.** Belém, PA. 2006. Disponível em <https://www.mar.mil.br/cpaor/arquivos/NPCP/NPCP_CPAOR.pdf>. Acesso em: 04 out. 2022.

CAGNIN, P. O. **Mercado de soja.** São Paulo/SP, 2022. Disponível em: <https://repositorio.pucsp.br/bitstream/handle/27734/1/Pedro%20Roberto%20Cagnin_Pedro%20Roberto%20Cagnin.pdf>. Acesso em 14 out. 2022.

CAIXETA FILHO, J. V.; COSTA, F. G.; ARIMA, E. Influência do transporte no uso da terra: o potencial de viabilização da produção de soja na Amazônia Legal devido ao desenvolvimento da infraestrutura de transportes. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 39, n. 2, p. 27-50, 2019. Disponível em: <https://www.revistasober.org/article/5d8b9ece-0e8825613df2a2f5/pdf/resr-39-2-27.pdf>. Acesso em 07 out. 2022.

CARDOSO, J. M. **Modelagem e Simulação da Capacidade Operacional de um Corredor Logístico do Arco Norte.** 2017. 117 p. Dissertação – Universidade Federal do Pará, Belém/PA, 2017. Disponível em: <https://www.ppgenav.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2017/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20(VERS%C3%83O%20FINAL)%20-%20Jaison%20Moura.pdf>. Acesso em 10 out. 2022.

CDSA – Companhia Docas de Santana. **Plano de Desenvolvimento e Zoneamento – PDZ do Porto de Santana/AP**: Relatório Final. Florianópolis/PR: 2017. Disponível em: <http://www.docasdesantana.com.br/images/arquivos/legislacao/PDZ/PDZ2018.pdf.>. Acesso em 01 out. 2022.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Plano CNT de Transporte e Logística 2018**. Brasília/DF, 2019. Disponível em: <https://www.cnt.org.br>. Acesso em set. 2022.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira grãos, safra 2020/21 – Décimo primeiro levantamento**, 7, p. 1-62. Brasília/DF, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em 15 set. 2022.

COSTA, W.M. Ordenamento territorial e Amazônia**:** vinte anos de experiências de zoneamento ecológico e econômico. Universidade e Meio Ambiente - **Revista do Núcleo de Meio Ambiente da UFPA**, v. 1, n. 1, p. 1-28, 2016.

GOMES GALINDO, A.; RABELO, M. S. S.; SILVA, F. P.; SANADA, K. L. O porto de Santana no estado Amapá como canal para o desenvolvimento do comércio internacional na Amazônia. **Revista Científica Multidisciplinar do CEAP**, v.3, n. 1, p. 6, 2021. Disponível em: <http://periodicos.ceap.br/index.php/rcmc/article/view/99>. Acesso em 02 set. 2022.

JOÃO, A. M.; VETTORAZZI, A. C.; ROCHA, F. V. D.; BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA-FILHO, J. V. **Emissão de CO2 na logística de exportação de soja do Mato Grosso:** o caso das exportações pelo Arco Norte. 2016. Disponível em: <https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/2017/09/emissao-de-co2-na-logistica-de-exportacao-de-soja-do-mato-grosso-o-caso-das-exportacoes-pelo-arco-norte.pdf>. Acesso em 13 ago. 2022.

LAZZAROTTO, J. J.; HIRAKURI, M. H. **Evolução e perspectiva de desempenho econômico associadas com a produção de soja nos contextos mundial e brasileiro.** 2009. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/663329/1/DoC319.pdf.>. Acesso em 19 set. 2022.

LLORCA, R. P.; LIMA, R. S.; LOPES, H. S. **Análise da Logística de Exportação da Soja do Centro-Oeste Brasileiro a partir da Expansão do Canal do Panamá**. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2132, 4 Gramado/RS: 2018. Disponível em:<https://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Logistica/Logistica%20de%20Carga%20de%20Longa%20Distancia/2_379_AC.pdf>. Acesso em 20 ago. 2022.

MTPA – Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Corredores Logísticos Estratégicos:** Complexo de Soja e Milho /Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Brasília/DF, 2017.

NAVES, I. M.; SOARES, J. B. **O corredor noroeste (rio madeira) como canal logístico para abastecimento do Nordeste:** uma proposta a partir dos estoques governamentais. 2008. Disponível em: DOI: <10.22004/ag.econ.108085>. Acesso em 15 set. 2022.

OLIVEIRA, V. H. P.; TOBIAS, M. S. G., ROCHA, M. P. D. C.; CUNHA FARIAS, V. J.; ALCÂNTARA NETO, M. C. de; SOUZA, M. M.; ARAÚJO, L. F. Optimization method applied to decision-making on intermodal alternative for soybean outflow in the State of Pará-Brazil. **International Journal for Innovation Education and Research**, v. 9, n. 7, p. 124-140, 2021.

PÊGO FILHO, B. O.; MOURA, R. O.; NUNES, M. O.; KRÜGER, C. O.; MOREIRA, P. G. O.; OLIVEIRA, S. M. O. **Fronteiras do Brasil:** Uma avaliação do Arco Norte, *3, 2018*. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/8466>. Acesso em 28 set. 2022.

PEREIRA, F. G. G. **Implantação de terminal portuário no corredor logístico de exportação do Arco Norte:** Fatores de decisão entre porto público e terminal de uso privado. 133 p, 2017. Dissertação. DOI: 10.11606/D.3.2018.tde-04012018-112458

PEREIRA, P. R. F. **Novos e velhos atores na soja no centro-oeste e no norte do Brasil**. 2016. 196 p. Tese. Disponível em: <https://tede.ufrrj.br/jspui/handle/jspui/2177>. Acesso em 25 set. 2022.

RODRIGUES, J. C. O Arco Norte e as Políticas Públicas Portuárias para o Oeste do Estado do Pará (Itaituba e Rurópolis): Apresentação, Debate e Articulações. **Revista Nera**, n. 42, p. 202-228, 2018.

RODRIGUES, J. C.; SARDINHA, J. C. da Silva; COUTO, M. E. A. do; ALMEIDA, J. C. de; LIMA, R. Â. P. Produção territorial portuária na Amazônia: ajustes, ordenamentos e práticas espaciais face a produção do complexo portuário de Santana, Amapá, Brasil. **Revista Tamoios**, v. 16, n. 3, 2020.

RURAP - Instituto do Desenvolvimento Rural do Amapá. **Diagnóstico da produção de soja no estado do Amapá em 2018**, (2019a).

RURAP - Instituto do Desenvolvimento Rural do Amapá. **Levantamento de dados sobre a produção da soja no estado do Amapá - Safra 2019**, (2019b).

SANTOS, F. C. **A recorrente retórica de crise institucional do setor portuário brasileiro**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/4002> Acesso em 25 set. 2022.

SARDINHA, J. C. S; Lomba, R. M.; Porto, J. L. R. Complexo portuário de Santana (Amapá-Brasil): da interação regional à conexão internacional. **Geopolítica e Integração Regional na América Latina**, p. 111, 2021.

SILVA, A. S; TOBIAS, M. S. G; ROCHA, M. P. C. Arco Norte Corridor Viability: literature review and research perspectives in Brazil. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 10, p. 66224-66247, 2022.

SILVA, G. V. **Usos contemporâneos da fronteira franco-brasileira: entre os ditames globais e a articulação local.** Dissertação. Porto Alegre/RS, 2016.

SILVA, M. A. **O impacto potencial do desenvolvimento dos portos do Arco Norte na valorização das fazendas de SINOP-MT:** uma análise do corredor da BR-163. Tese de Doutorado, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10438/17984>. Acesso em 15 ago. 2022.

SOUZA, M. M. **Otimização de Rotas de Escoamento da Soja do Mato Grosso através do Arco Norte**. 2021. Disponível em: < https://ppgenav.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2021/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20(VERS%C3%83O%20FINAL)-%20Matheus%20Melo%20de%20Souza.pdf>. Acesso em 16 ago. 2022.

TOBIAS, M G S; MORAES, H. B.; FIGUEIREDO, N. The role of ports in Amazonia cities for sustainable urban development: The case of Belem - Brazil. **WIT transactions on the built environment (online)**, v. 188, p. 11-21, 2019.

TOMAZELE, R. **Expansão da área de soja no extremo norte de Mato Grosso**. 2014. 59 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pelotas. Pelotas-RS: 2014. Disponível em: <http://guaiaca.ufpel.edu.br:8080/handle/prefix/7224>. Acesso em 15 out. 2022.

VALE, L.; MONAI, R.; FREITAS, T. D.; PINHEIRO, A. Arco Norte: o desafio logístico. **Centro de Estudos e Debates Estratégicos.** Brasília**:** Câmara dos Deputados, Edições Câmara 2016. Série Estudos Estratégicos, 6. Brasília, DF, 392p. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/a-camara/estruturaadm/altosestudos/pdf/arco_norte.pdf>. Acesso em 15 out. 2022.

03

Colisões de embarcações sobre pontes: uma revisão bibliográfica

Weverton Kaio de Araújo Cabral
Universidade Federal do Pará - UFPA

Pedro Igor Dias Lameira
Universidade Federal do Pará - UFPA

Emannuel Sant Thiago Pereira Loureiro
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221111107

RESUMO

Este capítulo tem a finalidade de analisar os parâmetros necessários para dimensionamento de energia e forma de impacto para colisões de embarcações contra infraestrutura de vão de ponte, a partir de metodologias encontradas em normas internacionais e estudos científicos, aplicado a um estudo de caso de colisão de comboio-tipo para o rio Guamá. A metodologia utilizada se baseia em, primeiramente, ter o conhecimento das embarcações que comumente navegam na hidrovia, manifestadas em dimensões, massa e velocidade, seguida da aplicação de equações de força e energia de impacto de diferentes estudos e normas, como *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e Eurocode 1. Como resultados, a força de impacto advinda da AASHTO é mais conservativa que da Eurocode 1, e a diferença média entre as energias nos diferentes ângulos de impacto é de 4,06 MJ para uma velocidade de impacto de 4,5 m/s. Para impactos frontais, AASHTO e Eurocode 1 possuem resultados próximos para velocidade de impacto de 4,5 m/s. Por fim, quanto às diferentes estimativas de carga de impacto apresentadas, o estudo de Pedersen e "*Half-Pedersen*" são bastante conservativos para o tipo comboio do rio Guamá, em contraste ao estudo de Yuan, que possui uma boa correlação com as estimativas da AASHTO. Conclui-se que, para propostas de sistemas de proteção de pontes contra colisões de comboios, as melhores abordagens são as representadas pelas normas americana e europeia, visto que estas possuem margens de segurança próximas, fato que proporciona confiança na elaboração do projeto de sistemas de proteção para pilares de pontes, tais como defensas flutuantes.

Palavras-chave: Colisão, Defensas Flutuantes, Força de Impacto, Dissipação de Energia, Hidrovias Interiores.

INTRODUÇÃO

A navegação interior no Brasil e no mundo convive com alguns obstáculos, como restrição de profundidade, de largura de rio, ou mesmo de navegação cruzada de embarcações sob obras de arte. Tais fatores contribuem para uma navegação tendenciosa a riscos. Em situações de baixa profundidade e alta turbulência no regime de escoamento da água nas proximidades dos pilares, com vãos livres relativamente reduzidos, há um aumento na probabilidade de colisões de embarcações contra pontes.

Este tipo de revés causa enorme impacto na logística de transportes de uma região. Como exemplo, em abril de 2019, um comboio fluvial colidiu com um dos pilares do vão principal da ponte sobre o rio Moju, na região próxima à cidade de Belém/PA, e fez com que 268 metros da estrutura despencassem, fato que causou um enorme gargalo no escoamento de bens e serviços entre as regiões do sul e sudeste do Pará, conforme se pode ver na Figura 1.

Figura 1. Ponte sobre o rio Moju com vão central destruído.



Fonte: G1 Pará (2019).

Para diminuir, em parte, os impactos causados pela derrubada da ponte, foi implementado, nas margens do rio Moju, um plano de travessia de veículos sobre o convés de balsas, para manter uma continuidade na movimentação de cargas e pessoas entre os municípios antes interligados pela ponte.

Esta mesma ponte já havia experimentado um acidente semelhante. Em 2014 uma balsa que transportava óleo colidiu com a ponte provocando a derrubada de um pilar e a queda de 50 metros da superestrutura. As ações emergenciais foram semelhantes às do incidente de 2019, ou seja, transporte de bens e pessoas através de balsas de travessia (BRITO; MANSOUR; SOBRINHO, 2014).

Outros eventos causados por colisão de embarcação foram registrados na região norte. Como exemplo, em janeiro de 2022, um comboio atingiu um dos pilares do vão central da Ponte do Outeiro, na região metropolitana de Belém, provocando a queda do pilar e rachaduras na pista. Em fevereiro de 2022, ela foi liberada para motos, bicicletas e pedestres, e em julho do mesmo ano foi liberada para o tráfego de carros e vans (G1 PARÁ, 2022).

De um modo geral, as hidrovias brasileiras não estão livres de acidentes deste tipo. O Quadro 1 mostra alguns exemplos destes reveses que ocorreram recentemente:

Quadro 1. Resumo de acidentes recentes de colisão de embarcações em pontes no Brasil.

Ano	Ponte	Descrição
2020	Ponte do Guaíba, RS	Colisão de navio que transportava farelo de soja em trajeto de Porto Alegre ao Porto de Rio Grande.
2022	Ponte Rio-Niterói, RJ	Colisão de embarcação à deriva. Segundo a Autoridade Marítima, condições climáticas extremas provocaram a ruptura da amarra da embarcação que se encontrava fundeada. A embarcação foi deslocada pela força do vento.

Fonte: GZH (2020); PODER360 (2022).

No âmbito internacional, inúmeros acidentes de colisão de embarcações sobre pontes foram listados na literatura (AASHTO, 2009; CONSOLAZIO, 2022; HARIK, 2010; KNOTT, 2018; SHA, 2013). No período de 42 anos, de 1960 a 2002, houve 31 grandes colapsos de pontes em todo o mundo devido a colisão de navios ou barcaças, com uma perda total de vidas de 342 pessoas. Dentre estes acidentes, o colapso de um navio de 35.000 DWT com a ponte Sunshine Skyway na Flórida (Estados Unidos), em 1980, resultou na queda de 396 metros do vão central e na perda de 35 vidas. Este incidente resultou em esforços para mitigar futuras catástrofes de colisões de embarcações sobre pontes. Como resultado, foi criada a norma *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges* AASHTO (1991), que reúne metodologias para quantificação de força e energia de impacto de embarcações no projeto de novas pontes.

Outros colapsos com grande notoriedade nos Estados Unidos foi a colisão de uma barcaça, em setembro de 2001 na ponte *Queen Isabella* que liga a ilha de San Padre ao Texas, resultando na perda de 8 vidas; e a colisão de barcaça na ponte I-40 sobre o rio Arkansas, Oklahoma em 2002, com 13 mortes registradas. Estes e outros acidentes foram registrados e ilustrados da Figura 2 a Figura 7.

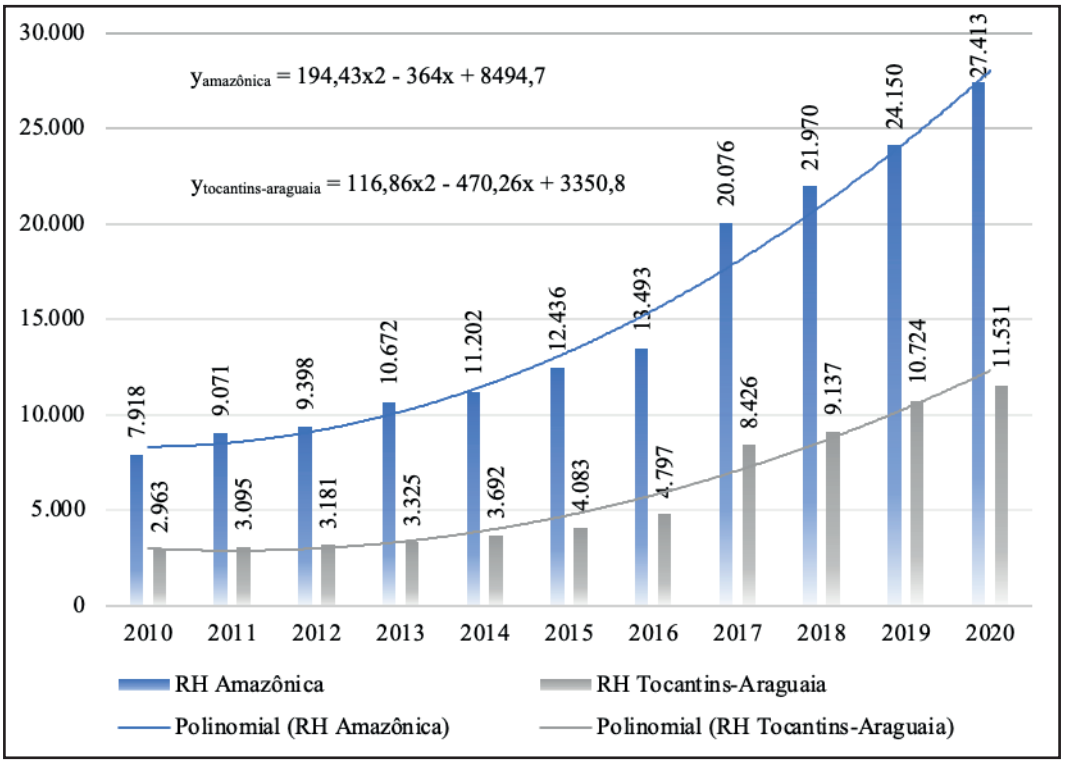
Os registros acidentais acima revelam dois fatos muito importantes. O primeiro é a necessidade de promover sistemas de proteção para pontes contra colisões de embarcações contra obras de arte.

O segundo fato é que a crescente necessidade pela navegação, está diretamente ligada ao aumento na quantidade de acidentes de embarcações em pontes. No caso da região norte do brasil, de acordo com dados coletados do estatístico aquaviário da ANTAQ (2021),

a evolução do transporte de cargas nas Regiões Hidrográficas Amazônica e Tocantins-Araguaia, de 2010 a 2020[1], é ilustrada no Gráfico 1.

Os rios da região norte do Brasil possuem baixas variações topográficas de altitude, permitindo que a navegação ocorra sem intervenções, tais como a construção de eclusas para transposição de nível (em regiões fora de barragens), dragagens nos cursos entre portos, derrocamentos (com exceção do Pedral do Lourenço no rio Tocantins), retificação de canal ou de meandros, diques laterais etc., ao longo da imensa maioria dos trechos navegáveis.

Gráfico 1. Evolução do transporte de carga em vias interiores do norte do Brasil (em mil t).



Fonte: Autores (2022).

Com base na necessidade de ações e estudos para propostas de proteção de pontes contra colisões de embarcações, o foco deste capítulo é analisar a influência que as diferentes variáveis e metodologias relacionadas à força e energia de impacto exercem sobre o dimensionamento defensas de proteção de pontes, aplicados a um estudo de caso para um comboio-tipo que navega na hidrovia Guamá-Capim, e sob a ponte do rio Guamá, localizada na PA-483, a qual interliga os municípios do interior do Estado do Pará.

Tais variáveis para força e energia de impactos, são comumente encontradas em normas internacionais como AASHTO, e o *Eurocode* 1991 parte 1-7, que são normas europeias

1 Segundo o anuário aquaviário da ANTAQ, a quantidade de cargas transportadas pela navegação interior na Região Hidrográfica (RH) Amazônica foi de 27,41 milhões de toneladas. Juntamente com o total para a RH do Tocantins-Araguaia, foram transportadas 38,94 milhões de toneladas nas principais hidrovias interiores da região norte do Brasil.

de padronização de projetos civis utilizadas nos países da União Europeia. Em comparação, será apresentado outras metodologias cujas formulações foram obtidas a partir de estudos de simulação estrutural via elementos finitos para barcaças de diferentes portes e, portanto, entregam uma visão alternativa ao uso apenas das referidas normas para o dimensionamento de defensas.

Figura 2. Colapso na ponte Sunshine Skyway, Tampa Bay, Flórida, U.S. (1980).



Fonte: Knott e Winters (2018).

Figura 3. Colapso na ponte Tjörn, Almo Sound, Suécia (1980).



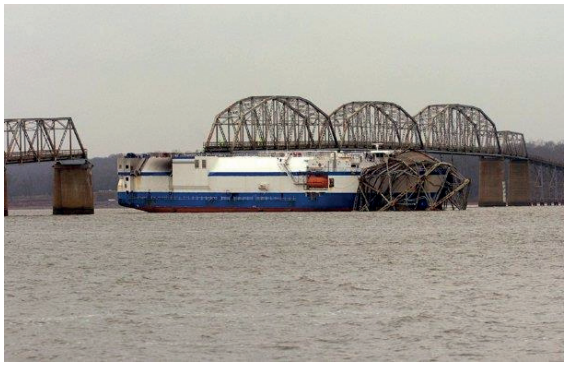
Fonte: Knott e Winters (2018).

Figura 4. Colapso na ponte Jiujiang, Rio Xijiang, Foshan, China (2007).



Fonte: Knott e Winters (2018).

Figura 5. Colapso na ponte Eggner's Ferry, Kentucky, E.U.A. (2012).



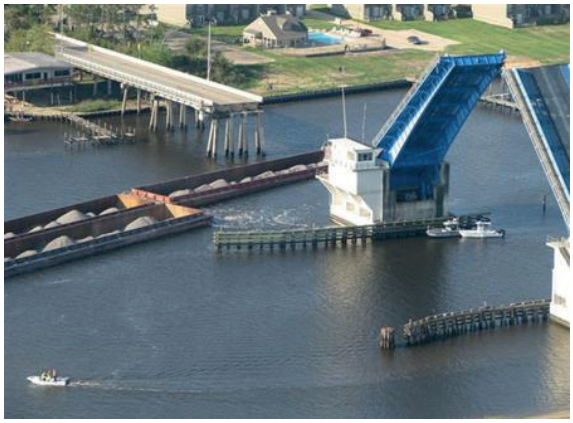
Fonte: Knott e Winters (2018).

Figura 6. Colapso na ponte I-40, Oklahoma, E.U.A. (2002).



Fonte: Knott e Winters (2018).

Figura 7. Colapso na ponte Popps Ferry, Mississippi, E.U.A. (2009).



Fonte: Knott e Winters (2018).

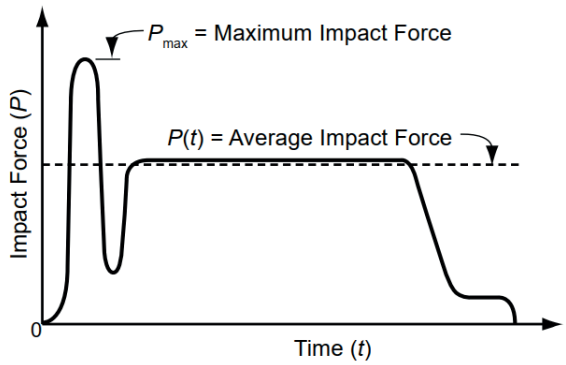
MÉTODOS

Principais estudos a respeito de colisões de embarcações contra pontes

O desenvolvimento teórico sobre colisões de embarcações contra pilares de pontes possui uma aplicabilidade diferente para colisão de navios e de barcaças. Saul e Svensson (1982) afirmam que, por muito tempo, o único estudo teórico que teve relevância nessa área foi o de Minorsky (1958) o qual propôs uma relação analítica linear entre o volume de aço deformado de dois navios colididos e a energia absorvida, com vinte e quatro ensaios. Sua motivação foi baseada na contaminação radioativa que navios movidos a propulsão nuclear poderiam causar em caso de colisão.

Woisin (1971, 1976) e Gerlach; Woisin (1970) desenvolveram testes de impacto em paredes rígidas, com 12 pares de modelos de navios nas escalas 1:12 e 1:7.5, a fim de gerar dados de colisão para proteger os reatores de navios movidos a energia nuclear contra colisões com outros navios (Woisin, 1976), e constatou uma amplitude de força em aproximadamente duas vezes em relação ao valor médio, entre 0,1 e 0,2 segundos a partir do início da colisão, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8. Representação esquemática da dinâmica da força de impacto do navio, ao longo do tempo, com base em testes de colisão conduzidos por Gerlach e Woisin (1970).



Fonte: AASHTO (2009).

Saul e Svensson (1982) com base nos estudos de Woisin (1976), afirma que as forças de impacto são proporcionais à raiz quadrada do *Deadweight* (DWT) do navio de acordo com a Equação 1:

$$P = 0{,}122\sqrt{DWT} \cdot V \quad (1)$$

Onde P é a força estática equivalente em MN; V é a velocidade do navio em m/s. Impactos inclinados não teriam o mesmo comportamento com a Equação anterior.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

As investigações de Pedersen *et al.*, (1993) indicaram que a força de impacto máxima, em função do tempo, deveria ser considerada na análise de colisão do navio e nos projetos de sistemas de proteção de pontes, ao invés da força de impacto média utilizada pela Equação 1. Nesse sentido, as forças de impacto para embarcações entre 500 DWT e 50.000 DWT serão indicadas pelas Equações 2 e 3:

$$F = \begin{cases} F_0 \cdot \bar{L}[\bar{E}_{imp} + (5.0 - \bar{L})\bar{L}^{1.6}]^{0.5} & \text{para} \quad \bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2.6} \\ 2.24 \cdot F_0[\bar{E}_{imp}\bar{L}]^{0.5} & \text{para} \quad \bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6} \end{cases} \tag{2}$$

$$\bar{L} = L_{pp}/275\text{, sendo } \bar{E}_{imp} = E_{imp}/1425 \ \text{MNm, e } E_{imp} = 0{,}5m(V_0 sen\theta)^2 \tag{3}$$

Onde, F é a carga máxima de colisão, em MN; F0 é a carga de colisão de referência de 210 MN; E_{imp} é a energia absorvida pelas deformações plásticas em MN.m; L_{pp} é o comprimento da embarcação considerado em metros; m é massa do navio incluindo uma massa adicionada (5%) em relação ao movimento longitudinal (106 kg); V_0 é a velocidade inicial da embarcação, m/s (QIAN; WANG e YAN 2006). Propõe-se a modificação da Equação 3 para levar em consideração impactos oblíquos. Por isso, $V_0 sen\theta$ sendo θ exemplificado na Figura 13.

A determinação da embarcação de projeto para estudos de colisão em cada um dos elementos de uma ponte foi realizada por Whitney *et al.* (1996) para o projeto de colisão de barcaças fluviais, pois estas embarcações são mais suscetíveis ao impacto em pontes. Devido a isso, o autor levantou dados de diferentes tipos de barcaças fluviais que navegam no rio Kentucky nos Estados Unidos para avaliar o risco de impacto em função da quantidade de viagens destas embarcações nas vias navegáveis, e concluiu que a sua abordagem probabilística pode ser utilizada em estudos para qualquer rio do mundo.

As diferentes maneiras de estimar a força e energia de impacto de embarcações sobre pontes podem depender de experimentos em escala real, escala reduzida, através de simulações em elementos finitos ou mesmo através de simplificações de modelos analíticos. Para Lehmann e Yu (1998) a maioria dos métodos que estimam o comportamento de uma embarcação sob impacto disponíveis geralmente entregam uma solução quasi-estática, que parece aceitável para embarcações à baixa velocidade durante a colisão.

O *General Code for Design of Railway Bridges and Culverts* (China, TB10002.1-99) Providencia uma estimativa de força de colisão de embarcação através da Equação 4:

$$F = \gamma \cdot V \sqrt{\frac{W}{c_1 + c_2}} \cdot \sin \alpha \tag{4}$$

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Onde γ é o coeficiente de redução de energia cinética; γ = 0,3 para colisões de proa e γ = 0,2 para outras configurações de colisão; W é o deslocamento da embarcação em toneladas; c_1 é o coeficiente de deformação elástica do navio; c_2 é o coeficiente de deformação elástica do componente da ponte danificado, por exemplo, um pilar. Caso não haja informação sobre esses coeficientes, a norma chinesa especifica que $c_1 + c_2 = 0{,}0005$ m/kN (QIAN; WANG e YAN 2006).

Além disso, em nome da *Water and Shipping Directorate Southwest* – Saar District, um estudo de Meir-Dörnberg (1983) culminou na previsão de força de impacto e equações de deformação para colisões de barcaças que colidem com estruturas de entrada de eclusas e pilares de pontes, sendo a principal referência da AASHTO para o dimensionamento de colisões de comboio-tipo em projetos de pontes. Nesse sentido, segundo AASHTO (2009), a energia de impacto é o primeiro fator que permite estimar a força de impacto para colisões de comboios fluviais sobre obras de arte, podendo ser calculada a partir da Equação 5:

$$KE = 500 \cdot C_H \cdot W \cdot V^2 \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

Onde KE é a energia cinética de colisão da embarcação em MJ; C_H é o coeficiente massa adicional hidrodinâmica; W é o deslocamento da embarcação em t; V é a velocidade de impacto, em m/s.

Nos cálculos é considerado o deslocamento carregado, composto pelo peso leve mais o peso máximo devido a carga. Os coeficientes C_H são função da distância entre o fundo da embarcação e o fundo do rio, conforme abaixo:

- $C_H = 1.05$ para folga sob quilha $\geq 0.5 \times$ Calado
- $C_H = 1.25$ para folga sob quilha $< 0.1 \times$ Calado

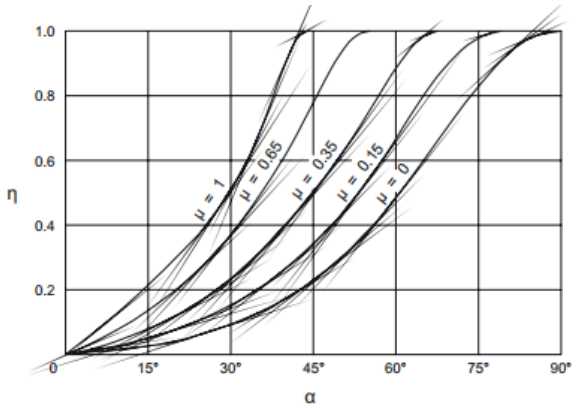
Para colisões oblíquas, a energia de impacto absorvida pela embarcação ou pela estrutura da ponte é definida em função de um ângulo de ataque α, entre a linha de centro da embarcação e a superfície da parede. Nesses casos, a energia de impacto é uma parcela da energia de impacto frontal, e é função do coeficiente de atrito entre o casco da embarcação e a parede, conforme Saul e Svensson (1982), na Equação 6:

$$E = \eta \cdot KE \quad (6)$$

Onde E é a energia de impacto em MJ, e η depende do ângulo de impacto e do coeficiente de atrito entre o casco do navio e a estrutura danificada. Considerando que o casco da barcaça é de aço e irá colidir com um pilar de concreto, o coeficiente de atrito é μ = 0,35 e η pode ser estimado pela Figura 9.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 9. Porção de energia absorvida no impacto em função do ângulo de impacto e do coeficiente de atrito.



Fonte: Saul e Svensson (1982).

Para força de impacto de colisão de comboios, a estimativa pode ser dada pelas Equações 7 e 8:

$$F = \begin{cases} 60 \cdot a_B, & \text{para } a_B < 0.1 \text{ m} \\ 6 + 1.6 \cdot a_B, & \text{para } a_B \geq 0.1 \text{ m} \end{cases} \quad (7)$$

$$a_B = \frac{3.1}{R_B}\left(\sqrt{1 + 0.13 \cdot KE} - 1\right) \quad (8)$$

Onde F é a força de impacto em MN; a_B é a profundidade do dano na proa da barcaça, em m.

Como as balsas-tipo utilizadas neste estudo possuem dimensões diferentes das balsas tipo utilizadas nos estudos indicados pela AASHTO (2009), será necessário corrigir a deformação da proa por um fator R_B, que é a razão entre a boca da barcaça realmente utilizada BB e a boca da barcaça de projeto B = 10,7 m, ou seja, $R_B = B_B/10{,}7$.

Paralelamente, o Eurocode 1 (EN 1991-1-7, 2006) propõe que a força de impacto também depende da energia cinética da colisão em obras de arte. Nesse sentido, a energia de impacto para colisões frontais e oblíquas serão, respectivamente, as Equações 9 e 10:

$$E_a = 0.5 \cdot m \cdot v^2 \quad (9)$$

$$E_{def} = E_a(1 - \cos\alpha) \quad (10)$$

A Equação 10 resulta no mesmo valor da Equação 9 porque a colisão frontal ocorre quando $\alpha = 90°$, ou seja, a direção formada entre a linha de centro da embarcação aberrante e o eixo de simetria do pilar da ponte. A partir disso, duas possibilidades são consideradas:

- Caso $E_{def} \leq 0{,}21\ MN.m$, caracterizado por uma deformação elástica da estrutura do comboio, a força dinâmica de impacto deve ser calculada a partir da Equação 11:

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

$$F_{dyn,el} = 10.95 \cdot \sqrt{E_{def}} \ \ [MN] \quad (11)$$

Por outro lado, caso $E_{def} > 0{,}21\ MN.m$, caracterizando uma deformação plástica da estrutura do comboio, a força dinâmica de impacto deve ser calculada pela Equação 12:

$$F_{dyn,pl} = 5.0 \cdot \sqrt{1 + 0.128 \cdot E_{def}} \ \ [MN] \quad (12)$$

Para o padrão europeu, a massa adicional da embarcação que colide frontalmente pode ser estimada em 10% do deslocamento total do comboio, ao passo que para colisões oblíquas a massa adicional deve ser de 40% do deslocamento total do comboio, uma vez que o comprimento da embarcação sob condição inclinada "empurra" mais água ao impacto e, portanto, a massa adicional é maior.

As equações desenvolvidas pela AASHTO e Eurocode 1 possuem algumas desvantagens, apesar de entregarem boas aproximações para cargas iniciais de projeto. O método estipulado pela AASHTO, por exemplo, baseado no método de carga estática equivalente de Meir-Dörnberg, possui dados insuficientes sobre os históricos de carga de impacto e sobre a dispersão das magnitudes de força de impacto. Além disso, as equações de carga da AASHTO ignoram certos fatores fundamentais que interferem na obtenção mais realística das forças de impacto e das respostas dinâmicas das pontes, tais como: a duração do impacto; a geometria do píer; as interações barcaça-barcaça e barcaça-píer, e as características estruturais das pontes (YUAN, 2005).

Exatamente por isso, Yuan (2008) e Yuan; Harik (2010) desenvolveram novos métodos e modelos para previsão de forças de impacto de barcaças em pilares de pontes a partir de simulação em elementos finitos, que levam em consideração as interações internas da estrutura da barcaça e, ao mesmo tempo, a resistência do concreto armado da ponte, ou seja, uma interação mais realística entre barcaça e pilar.

Seja α a razão largura da balsa/largura do pilar (válido para pilares retangulares), $I_i = m_B V_i$ a quantidade de movimento inicial; m_B a massa do comboio e V_i a velocidade de impacto, então força de impacto, em MN, para comboio com quatro balsas enfileiradas pode ser estimada através da Equação 13:

$$F_{máx} = (-6{,}951 + 43{,}933\alpha - 20{,}394\alpha + 0{,}713I_i + 5{,}02V_i)\text{sen}\theta \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

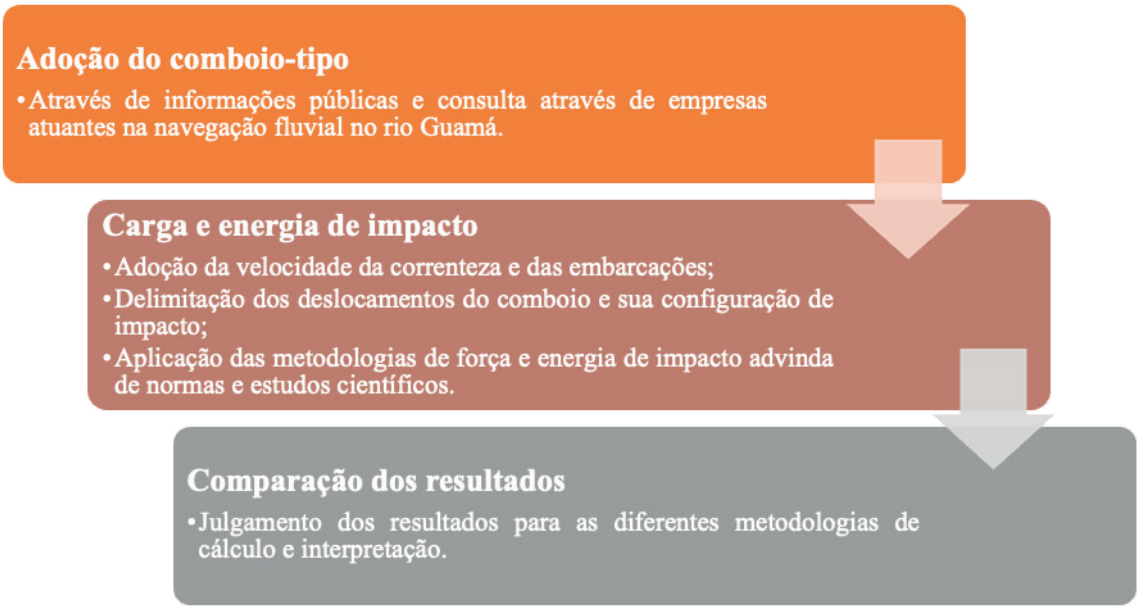
Por fim, Sha (2013) também criou modelos não lineares de elementos finitos que levam em consideração a resposta não linear e os danos das estruturas da barcaça e do píer, calibrados com base em trabalhos anteriores e em testes de impacto em escala (AASHTO, 2009; CONSOLAZIO, 2006; MEIR-DÖRNBERG, 1983).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Fluxograma para a problemática no Rio Guamá

Serão verificadas as forças e energias de impacto de um comboio-tipo navegando pelo rio Guamá, no estado do Pará/Brasil. Um fluxograma da metodologia utilizada nesta pesquisa encontra-se na Figura 10.

Figura 10. Fluxograma dos passos utilizados nesta pesquisa.



Fonte: Autores (2022).

O comboio-tipo será adotado com base em informações obtidas de órgãos oficiais Brasil (2015), o empurrador possui dimensões comuns de empresas que possuem rota no rio Guamá.

Em seguida, a velocidade de impacto foi adotada como 3 m/s, adicionalmente à velocidade média da corrente do rio próximo a da ponte, 1,5 m/s, tornando a velocidade máxima de impacto igual a 4,5 m/s, representando um caso com aplicabilidade factível.

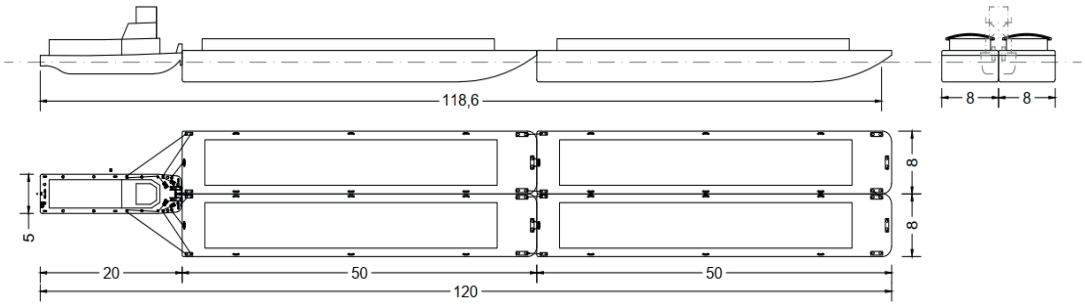
Por fim, as forças e energias de impacto na ponte do Rio Guamá, na velocidade de 4,7 m/s, será dado entre as principais normas internacionais para projetos de pontes, como AASHTO (2009) e Eurocode 1 (EN 1991-1-7, 2006), bem como dos estudos científicos apresentados.

Finalmente, os resultados deverão, também, indicar a evolução da força de impacto para diferentes velocidades de impacto, entre 1 e 6 m/s, bem como para diferentes ângulos de incidência da força de impacto.

Adoção do comboio-tipo para o Rio Guamá

O comboio-tipo será composto por quatro barcaças, de acordo com Padovezi (2003), cuja formação é indicada na Figura 11.

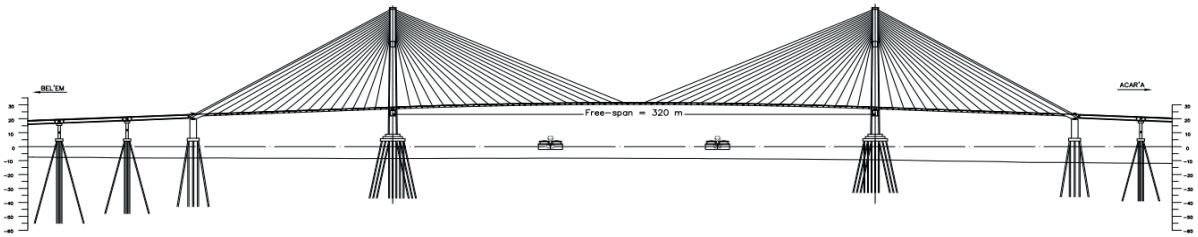
Figura 11. Comboio-tipo utilizado neste estudo de caso.



Fonte: Adaptado de Padovezi (2003).

A ponte sobre o rio Guamá possui 1950 m de extensão, e 320 m de vão livre entre os dois mastros do vão central SETRAN (2019), como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12. Ponte sobre o rio Guamá.



Fonte: Autores (2022).

Diante disso, o comboio-tipo utilizado para o estudo de caso no Rio Guamá para estimativa de energia e forças de impacto tem suas características resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Comboio-tipo utilizado no estudo de caso para o Rio Guamá.

Descrição	Comprimento Total (m)	Boca (m)	Calado Máximo (m)	Deslocamento Carregado (m)
Empurrador	18,80	6,30	1,50	113,88
Barcaça	50,00	8,00	2,50	900,00
Comboio	120,00	16,00	2,50	3600,00

Fonte: Autores (2022).

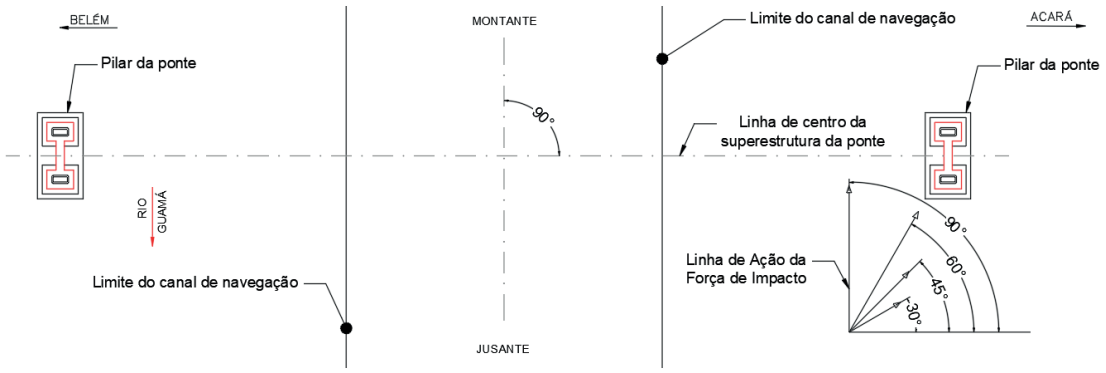
Portanto, o deslocamento de impacto será $\Delta_{comboio} = 3600 + 113{,}88 = 3713{,}88\,\mathrm{t}$

Configuração de impacto

O Eurocode 1991-1-7 (2006) afirma que a Equação 10 para estimar a energia de impacto se aplica a colisões de até 20°. No entanto, para efeito comparativo entre os diferentes estudos, serão consideradas 4 situações de impacto, com velocidades num intervalo de 1 a 6 m/s conforme a lista seguintes e a Figura 13, porém comparando valores para a velocidade de impacto de 4,5 m /s:

- Impacto lateral, com $\alpha = 30°$;
- Impacto lateral, com $\alpha = 45°$;
- Impacto lateral, com $\alpha = 60°$; e
- Impacto frontal com $\alpha = 90°$.

Figura 13. Diferentes configurações para impacto na ponte sobre o rio Guamá.



Fonte: Autores (2022).

RESULTADOS

A proteção de pontes contra colisões de embarcações em pilares garante a segurança da navegação e das pessoas que seriam impactadas por um possível revés. Diante disso, essa revisão bibliográfica busca verificar e comparar as diferentes estimativas de forças e energias de impacto resultantes de uma possível colisão de um comboio-tipo na ponte sobre o rio Guamá, a qual possui uma importância extrema para a economia do Pará.

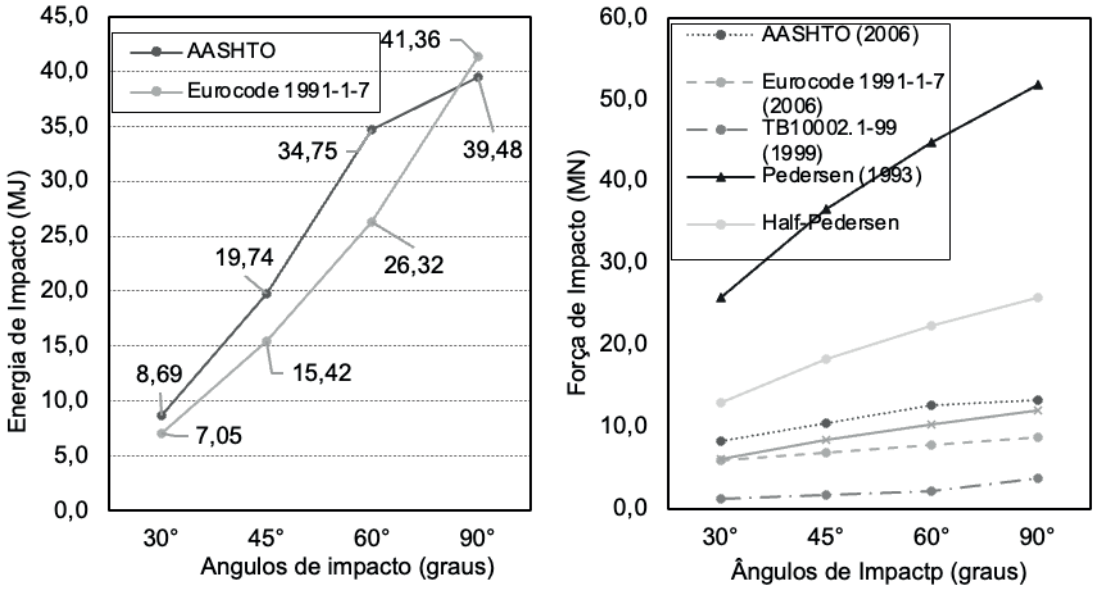
Os resultados de energia e força de impacto do comboio, considerando os padrões da AASHTO e Eurocode 1991-1-7 para a velocidade de 4,5 m/s são mostrados na Figura 14.

Verifica-se que o padrão AASHTO (2009) é mais conservador que o padrão europeu em colisões oblíquas, provavelmente devido ao fato destas energias serem uma porcentagem da energia do impacto frontal, conforme Equação 10. Ou seja, para os impactos de 30°, 45° e 60° considerando o padrão americano, as energias foram 8,69 MJ, 19,74 MJ e 34,75 MJ, enquanto as energias estimadas pelo padrão europeu para os mesmos ângulos de incidência de são 7,05 MJ, 15,42 MJ e 26,32 MJ.

Devido ao fato do comboio-tipo do rio Guamá ter configuração 2x2 e, consequentemente, ser altamente robusto, as energias contidas nos impactos frontais, através de padrões americanos e europeus, possuem valores elevados, sendo 39,48 MJ para AASHTO e 41,36 MJ para o Eurocode 1991-1-7, diferindo em 1,88 MJ.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 14. (Esquerda): Energias de impacto no rio Guamá estimadas pelos principais padrões internacionais. (Direita): Força de impacto no Rio Guamá de diferentes estudos e normas.

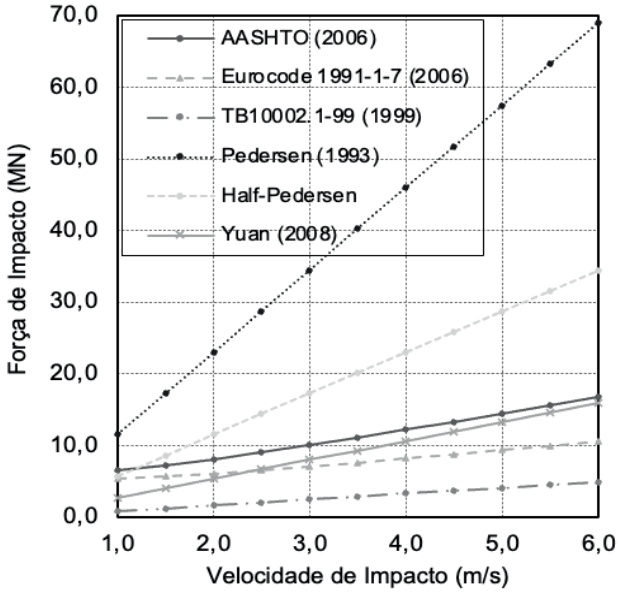


Fonte: Autores (2022).

Em relação à força de impacto, para diferentes estimativas, a Figura 14 (à direita) apresenta as forças para uma velocidade de 4,5 m/s, usando as equações 2, 4, 7, 13 e força média entre 11, ou 12 se $F_{dyn} > 5$ MN.

As forças de impacto frontal para velocidades de 1 a 6 m/s são indicadas na Figura 15, embora esta última velocidade dificilmente seria alcançada na prática, próximo à ponte. Percebe-se, pois, que o comportamento da força de impacto do comboio na ponte do rio Guamá em função da velocidade, é conservador para as abordagens de Pedersen *et al.*, (1993) e AASHTO (2009).

Figura 15. Forças de impacto para o Rio Guamá em diferentes velocidades, aproximações e padrões.



Fonte: Autores (2022).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

DISCUSSÕES

Um comparativo das energias de impacto indicam que a AASHTO (2009) é mais conservadora que o padrão Eurocode 1 (EN 1991-1-7, 2006), e a diferença média entre as energias nos diferentes ângulos de impacto é de 4,06 MJ para uma velocidade de impacto de 4,5 m/s. Com isso, a norma europeia oferece uma "folga", de sorte que projetos de defensas de proteção de pontes não sejam superdimensionado.

Para impacto frontal, as energias de impacto da AASHTO (2009) e Eurocode 1 têm valores próximos, ou seja, 39,48 MJ para o padrão americano e 41,36 MJ para o padrão europeu, uma diferença percentual de 4,76% em relação ao americano.

Quanto às forças de impacto estimadas através de diferentes estudos, para velocidade de impacto de 4,5 m/s, os resultados de Pedersen *et al.* (1993) apresentam valores conservadores, fato também apontado por Qian; Wang e Yan (2006), assim como os valores de Half-Pedersen, que também são conservadores para o tipo comboio do rio Guamá. Os resultados de TB10002 1-99 são menos conservadores de todas as metodologias, e os resultados de Yuan (2008) possuem uma boa correlação com a AASHTO.

Ainda assim, os resultados de AASHTO (2009) são superiores aos indicados pelo Eurocode 1. A diferença média entre as magnitudes indicadas por essas duas normas é de 3,86 MN e, para impactos frontais, as magnitudes encontradas foram de 13,32 MN e 8,77 MN para as normas americana e europeia, respectivamente. A diferença percentual é de 34,16% em relação ao padrão americano.

CONCLUSÃO

Conclui-se que para propostas de sistemas de proteção de pontes contra colisões de comboios hidroviários interiores, as melhores abordagens são as representadas pelas normas americana e europeia, visto que estas possuem margens de segurança próximas, fato que proporciona confiança na elaboração do projeto de sistemas de proteção para pilares de pontes, como defensas flutuantes.

Ressalta-se, também, que projetos de sistemas flutuantes devem vivenciar etapas de dimensionamento estrutural através de normas de sociedades classificadoras e verificadas através de cálculos racionais e simulações estruturais, cujas forças de impacto foram aquelas estimadas anteriormente. Testes de laboratório em pequena escala garantem confiabilidade dos parâmetros utilizados no projeto dessas defensas pois caracterizam a validação dos modelos numéricos.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges. Volume 1. Final Report**. Washington, DC: AASHTO, 1991.

AASHTO. **Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges, 2nd Edition, with 2010 Interim Revisions**. [s.l.] Aashto, 2009.

BRITO, M.; SOBRINHO, B.; MANSUR, F. Critérios de Definição e Dimensionamento de Proteção de Pilares em Pontes. **VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**, v. 1, p. 1–10, 2014.

CONSOLAZIO, G. R.; COOK, R. A.; MCVAY, M. C. **Barge impact testing of the St. George Island Causeway Bridge. Phase III: Phisical testing and data interpretation.** Gainesville, Florida: Department of Civil and Coastal Engineering. University of Florida., 2006.

EN 1991-1-7. **Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions**. European Standard, , 2006. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.7.2006.pdf>

G1 PARÁ. **Parte de ponte da Alça Viária cai no Rio Moju, no Pará**. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2019/04/06/ponte-do-complexo-alca-viaria-cai-novamente-sobre-o-rio-moju-no-para.ghtml>. Acesso em: 25 nov. 2022.

G1 PARÁ. **Ponte do Outeiro é liberada para carros em Belém | Pará | G1**. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2022/07/09/ponte-do-outeiro-e-liberada-para-carros-em-belem.ghtml>. Acesso em: 25 nov. 2022.

GZH. **Navio bate em pilar da ponte do Guaíba, e içamentos do vão móvel são suspensos**. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2020/05/navio-bate-em-pilar-da-ponte-do-guaiba-e-icamentos-do-vao-movel-sao-suspensos-ckasebo5b00dt015nn06bcxdf.html>. Acesso em: 25 nov. 2022.

KNOTT, M. A.; WINTERS, M. **Ship and barge collisions with bridges over navigable waterways**. . Em: 34TH PIANC WORLD CONGRESS. Panama City: 2018. Disponível em: <https://conference-service.com/pianc-panama/documents/agenda/data/full_papers/full_paper_46.pdf>

LEHMANN, E.; YU, X. Inner dynamics of bow collision to bridge piers. Em: **Ship Collision Analysis: Proceedings of the international symposium on advances in ship collision analysis, Copenhagen, Denmark.** 1st. ed. London: Henrik Gluver, 1998. p. 228.

MEIR-DÖRNBERG, K. E. Ship Collisions, Safety Zones and Loading Assumptions for Structures on Inland Waterways" (in German). **VDI-Berichte**, n. 496, 1983.

MINORSKY, V. U. An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants. 1958.

PADOVEZI, C. D. **Conceito de embarcações adaptadas à via aplicado à navegação fluvial no Brasil.** Doutorado em Engenharia Naval—São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

PEDERSEN, P. T. et al. Ship impacts: Bow collisions. **International Journal of Impact Engineering**, v. 13, n. 2, p. 163–187, 1993.

PODER360. **Navio à deriva bate na ponte Rio-Niterói e pista fica interditada**. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/brasil/navio-a-deriva-bate-na-ponte-rio-niteroi-e-pista-fica-interditada/>. Acesso em: 25 nov. 2022.

SAUL, R.; SVENSSON, H. On the Theory of Ship Collision against Bridge Piers. **International Association for Bridge and Structural Engineering**, v. 6, n. P-51, p. 29–40, 1982.

SETRAN, K. A. **Setran conclui obras na ponte Rio Guamá e agiliza serviços no Rio Acará.** , 16 nov. 2019. Disponível em: <https://agenciapara.com.br/noticia/16411/>. Acesso em: 25 nov. 2022

SHA, Y. **Analysis, assessment and mitigation of barge impact load on bridge piers**. PhD Thesis—[s.l.] University of Western Australia, 2013.

SOTOLONGO, J. G.; DAVIDSON, M. T.; CONSOLAZIO, G. R. Design Loads and Pier Responses for Oblique Side Barge Impacts on Bridges. **Journal of Bridge Engineering**, v. 27, n. 6, p. 04022041, 2022.

WANG, J.; YAN, H.; QIAN, H. Comparisons of Ship Collision Design Formula for Bridges Based on FEM Simulations. **Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)**, v. 1, n. 1, p. 46–50, 2006.

WHITNEY, M. W. et al. Barge collision design of highway bridges. v. 1, n. 2, p. 47–58, 1996.

WOISIN, G. Ship–Structural Investigation for the Safety of Nuclear Powered Trading Vessels. **Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft**, p. 225–263, 1971.

WOISIN, G. The Collision Tests of the GKSS. **Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft**, v. 70, p. 465–487, 1976.

WOISIN, G.; GERLACH, W. **On the Estimation of Forces Developed in Collisions Between Ships and Offshore Lighthouses**. Em: IALA CONFERENCE. Stockholm, Sweden: 1970.

YUAN, P. **Modeling, simulation and analysis of multi-barge flotillas impacting bridge piers.** Lexington: University of Kentucky Doctoral Dissertations., 2005.

YUAN, P.; HARIK, I. E. Equivalent Barge and Flotilla Impact Forces on Bridge Piers. **Journal of Bridge Engineering**, v. 15, n. 5, p. 523–532, 2010.

04

Estruturas flutuantes como alternativas de aproveitamento de energia renovável na região Amazônica

Eudes José Coelho Neto
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Jassiel V. H. Fontes
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Harlysson W. S. Maia
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

10.37885/221010654

RESUMO

Estruturas flutuantes são amplamente utilizadas na região amazônica para desenvolver diversas atividades, incluindo o abastecimento de combustíveis, serviços de assistência social e saúde, produção de alimentos, atividades de lazer, entre outras. Devido à necessidade de preservar a região e reduzir o consumo de combustíveis fósseis para desenvolver um futuro sustentável, o aproveitamento das energias renováveis utilizando sistemas flutuantes pode ser uma opção viável para o futuro. O presente trabalho discute algumas possibilidades de uso de estruturas flutuantes para aproveitar energias renováveis na região amazônica. Primeiro, é apresentada uma revisão a respeito do uso de estruturas flutuantes na Amazônia brasileira. Logo, é apresentado um conceito simplificado de estrutura flutuante regional, discutindo algumas opções para aproveitar energias renováveis. Por fim, o trabalho discorre sobre as barreiras que tecnologias do tipo podem apresentar durante a sua implementação na região amazônica. A pesquisa demonstrou que o aproveitamento de energias renováveis disponíveis na região amazônica, tais como a energia solar e a energia das correntezas dos rios, utilizando diversos tipos de sistemas flutuantes, pode ser uma opção para proporcionar energia de baixo consumo em regiões remotas sem acesso à rede elétrica. No entanto, ainda existem barreiras e a necessidade de normativas específicas para implementar esse tipo de tecnologias.

Palavras-chave: Energia Renovável, Estruturas Flutuantes, Oportunidades, Amazônia.

INTRODUÇÃO

O estilo de vida em uma sociedade moderna no século XXI está intimamente ligada ao acesso à energia elétrica, visto que os avanços tecnológicos, em sua maioria, utilizam desse meio para seu funcionamento. O mundo está em constante desenvolvimento, e a energia elétrica tem importância fundamental, pelo que a busca por fontes alternativas de energia já é algo quem vem sendo discutido em praticamente todos os países do globo.

O Brasil é um país com dimensões continentais, contendo a maior parte da bacia amazônica com uma grande quantidade de rios, sendo uma das maiores reservas de água doce do mundo. Com isso em mente, observamos um potencial provedor de energia das correntezas (MATOS *et al.*, 2011), mas também de energia solar (SILVA; DE OLIVEIRA; SEVERINO, 2010).

Cabe mencionar que em muitas comunidades da Amazônia brasileira não existem rodovias, sendo a navegação pelas hidrovias o meio de transporte mais acessível e comum (HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2021). Sistemas flutuantes também desempenham um papel fundamental no abastecimento de serviços nas hidrovias da região.

A carência no fornecimento de energia elétrica em comunidades isoladas na região amazônica se dá devido à baixa densidade demográfica nas mesmas e à falta de rodovias entre as principais cidades da região e as comunidades ribeirinhas, o que deixa economicamente inviável a extensão da rede elétrica até muitas destas localidades. Existe uma falta considerável de conexão à rede elétrica nacional na região Norte do Brasil, como pode ser verificado nos mapas de interligação nacional proporcionados pelo Operador Nacional de Sistema Elétrico do Brasil (ONS) em ONS (2019).

Dispositivos de conversão de diversas fontes renováveis de energia poderiam ser acoplados em embarcações ou estruturas flutuantes regionais para facilitar a geração de energia, pelo menos para equipamentos e tecnologias de baixo consumo, para beneficiar diversos tipos de atividades em regiões remotas da região amazônica.

O presente trabalho discute as possibilidades de uso de estruturas flutuantes regionais para aproveitamento de alguns tipos de energias renováveis, discutindo a problemática e os desafios existentes para implementar tais tecnologias na região amazônica.

Primeiramente, é feita uma revisão do uso de diversas estruturas flutuantes típicas na Amazônia brasileira. Logo, é descrito um conceito simplificado de embarcação flutuante para aproveitamento de energias renováveis. Finalmente, são discutidos alguns desafios de implementação que poderiam ser encontrados na região amazônica.

MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido em três fases principais: (1) revisão das aplicações de estruturas flutuantes comuns no Estado do Amazonas, (2) revisão das possibilidades de inovação para aproveitar energias renováveis com sistemas flutuantes, e (3) discussão das barreiras que podem ser encontradas na implementação de projetos de conversão de energia renovável na região amazônica.

Para a primeira fase do estudo foram feitos, quando possível, levantamentos e visitas técnicas a estaleiros e algumas embarcações, com a finalidade de obter imagens que ajudassem na descrição de embarcações regionais. Algumas imagens foram modificadas de fontes encontradas na internet.

Na segunda fase do estudo, foi proposto o projeto conceitual de uma estrutura flutuante coletora de energias renováveis. Para isto, foram consideradas as dimensões principais de barcaças regionais para modelar os planos de linha e os arranjos estruturais da embarcação. Foi utilizado o software Autocad® para realizar a modelagem. Para descrever o uso das energias renováveis, foi realizada uma revisão da literatura em revistas internacionais indexadas, visando a busca de tecnologias recentes para aproveitamento da energia das correntezas, do vento e do sol. Principalmente, foram pesquisadas as tecnologias de baixo consumo que poderiam ser adaptadas em instalações domésticas, considerando publicações feitas na última década.

Finalmente, a fase de discussão foi feita considerando os resultados das duas primeiras fases e pesquisando os principais desafios técnicos e socioambientais que poderiam ser encontrados na região amazônica para implementar projetos de conversão de energia usando estruturas flutuantes. Informações complementares desta fase foram obtidas por meio de textos acadêmicos e científicos relacionados com o estudo dos possíveis impactos socioambientais causados por tecnologias emergentes na região amazônica.

RESULTADOS

Uso de estruturas flutuantes na região amazônica

A região norte do Brasil possui uma extensa rede de rios e afluentes com diversas características, sendo relevante o uso de estruturas flutuantes para realizar diversas atividades econômicas e socioambientais.

Há muitos anos, a construção naval na Amazônia ganha destaque, não somente pela alta quantidade de obras de construção naval sendo feitas na região até agora, mas também pela notável variedade de finalidades e portes nas embarcações da região. Dentre estas

embarcações, cabe mencionar a construção de diversas estruturas navais que operam com e sem velocidade de avanço (LINS, 2022).

Cerca de 60% da rede hidroviária do Brasil se concentra na região amazônica, sendo as atividades principais relacionadas com o transporte de petróleo e seus derivados, granéis sólidos como grãos e minerais, cargas gerais e de passageiros (ANA, 2007).

Deste modo, os estados localizados ao norte do país possuem uma inerente necessidade para aptidão no setor naval, sendo possível o desenvolvimento e inovação em diversas aplicações.

Embora a maior parte, em números absolutos, dos estaleiros da região norte do Brasil seja de estaleiros de menor porte, alguns estaleiros regionais se destacam por possuírem maquinários tecnologicamente avançados e estruturas adequadas para a construção naval, com pátios munidos de grandes pórticos, veículos para transporte de materiais e uma estrutura que oferece condições adequadas de trabalho. Um exemplo é mostrado na Figura 1a, que mostra um pátio de produção de um dos estaleiros de maior porte no Estado do Amazonas. Vários estaleiros da região ganham destaque por sua construção em linha de produção, possuindo capacidade para construção de embarcações de médio e grande porte em períodos relativamente curtos e com qualidade considerada adequada, pois operam com tecnologias estabelecidas e operadores qualificados, seguindo processos estritos de certificação.

Estaleiros de grande porte e estruturalmente capacitados, pois, não representam a maior parte dos casos em regiões em fase de desenvolvimento na construção naval regional. Na Amazônia brasileira, grande parte das obras de reparo e construção de embarcações são realizadas em pequenos estaleiros localizados bem próximos às margens de rios, como observado nas Figuras 1b e 1c. Em regiões mais distantes das principais rodovias ou cidades principais, pode existir um alto índice de procura por estes estaleiros, principalmente pela atratividade no preço das obras, visto que os custos de execução são inferiores quando comparados com estaleiros de maior porte. É importante mencionar que em muitos destes, podem ser encontrados procedimentos de vistoria menos rigorosos, incluindo a contratação de trabalhadores com pouca adequação à Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) do Brasil. Com relação às Figuras 3b e 3c, percebemos uma falta de ferramentas adequadas para utilização em obras de construção naval. Entretanto, esta é uma realidade em localidades remotas onde a construção naval ainda se encontra em fase de desenvolvimento.

Figura 1. Exemplos de estaleiros localizados no Estado do Amazonas. (a) Pátio de obras de um estaleiro de grande porte. (b) e (c) Casco e casaria de uma embarcação sendo construídos em um estaleiro de pequeno porte, respectivamente.



(a) (b) (c)

Fonte: Eudes José Coelho Neto (2022).

Com o passar dos anos, a construção naval na Amazônia foi absorvendo diversas tecnologias, aumentando o porte de suas obras e modificando suas funcionalidades. Em dias atuais, as embarcações na região não são somente usadas como meio de transporte, pois os construtores se especializaram em adaptar suas obras às mais diversas necessidades encontradas em diferentes localidades. Um dos exemplos mais notáveis está relacionada com a construção de estruturas navais conhecidas na região como “flutuantes”, adaptadas para diversas atividades. É possível que na região amazônica possam ser encontradas estruturas flutuantes, geralmente de forma retangular (tipo barcaça), sendo utilizadas como mercearias, posto de combustível, oficinas, tornearias, unidades de saúde, dentre outras diversas aplicações.

A Figura 2a mostra um flutuante adaptado para fazer o comércio de produtos variados, como uma mercearia ou loja de conveniência flutuante. Por outro lado, a Figura 2b mostra uma estrutura flutuante regional utilizada para revenda de gás de cozinha. Na região norte do Brasil esse tipo de embarcação pode ser conhecido como “pontão”.

Figura 2. Exemplos de embarcações do tipo flutuante usadas em diversas aplicações na região amazônica. (a) Flutuante mercearia situado as margens da cidade de Tefé, Amazonas. (b) Flutuante de revenda de gás de cozinha em Manaus, Amazonas. (c) Unidade básica de saúde fluvial encontrada em Manicoré, Amazonas. (d) Unidade básica de saúde fluvial encontrada em Borba, Amazonas. (e) Posto de combustível flutuante característico da região amazônica, encontrado no Rio Negro, Manaus, Amazonas. (f) Foto de "casas flutuantes" na região do rio Tarumã, Manaus, Amazonas. (g) Representação artística de uma embarcação fábrica de açaí. (h) Laboratório Satélite Mamirauá. (i) Representação artística de uma balsa "butaneira" em Santarém, Pará. (j) Vista de popa de uma draga amazônica.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br



(i)



(j)

Fonte: (a), (b), (h), e (j) Eudes José Coelho Neto (2022). (c) e (d) Ricardo de Almeida Sanches (2022). (e) e (f) Jassiel Fontes. (g) Modificado de Forbes (2021). (i) Modificado de Fogás (2022).

As Figuras 2c e 2d mostram duas embarcações utilizadas como unidade básica de saúde flutuante nas cidades de Manicoré e Borba, respectivamente, no estado do Amazonas. Este tipo de flutuante é bastante utilizado em municípios do interior do Amazonas para proporcionar serviços médicos diversos ao público.

Outro exemplo de estrutura flutuante regional é mostrado na Figura 2e. Este tipo de estrutura recebe o nome de "posto flutuante" e proporciona serviços de abastecimento de combustível a diversos tipos de embarcações da região. Devido à extensão das hidrovias, e considerando que em muitas regiões do Estado do Amazonas não existem rodovias, é comum que existam postos flutuantes para proporcionar serviços de abastecimento de combustíveis.

Outro tipo de aplicação para estruturas flutuantes na região amazônica consiste na realização de atividades de recreio e lazer. Por exemplo, a Figura 2f mostra diversas "casas flutuantes" que costumam ser alugadas para realizar eventos de lazer. Este tipo de flutuante deve estar regularizado com as normativas municipais, estaduais, das entidades certificadoras ou sociedades classificadoras de embarcações e da capitania dos portos da região em que se encontram. Muitas destas estruturas têm sistemas de alimentação com painéis solares e plantas de tratamento de água.

Na região amazônica também podemos encontrar dispositivos flutuantes destinados a atender demandas inerentes da própria região, relacionadas com a produção de alimentos. A exemplo, os grupos *Valmont*, empresas do setor agrícola, e *Transportes Bertolini*, lançaram no ano de 2021 um projeto inovador na região para produção de alimentos regionais. O projeto consistiu na construção de uma balsa-fábrica para processamento de polpa de açaí (Figura 2g). A embarcação vem ainda equipada com diversos painéis solares para utilização do maquinário instalado na mesma.

Aparelhos flutuantes também são utilizados na região para fins acadêmicos e científicos. É o caso do flutuante de pesquisa *Laboratório Satélite Mamirauá* (Figura 2h). Construída por uma empresa amazonense, a embarcação foi encomendada pelo *Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá* e fomentada pelo *Ministério da Ciência, Tecnologia*

e Inovação do Brasil, para fins de manejo de recursos naturais, pesquisa e desenvolvimento social, principalmente na região do médio Solimões, no estado do Amazonas.

Na região, também podemos encontrar estruturas flutuantes destinados ao armazenamento e transporte de gases (Figura 2i). Estas embarcações não propulsadas são de suma importância para abastecimento de gás natural em algumas comunidades nos os estados amazônicos, visto a inviabilidade econômica em construir gasodutos até elas.

Outros tipos de estruturas flutuantes que podemos encontrar na região amazônica são as dragas (Figuras 2j). Essas têm como principal objetivo a extração de areia e seixo do fundo dos rios. Dragas são de fácil distinção quando comparados com outros dispositivos flutuantes, pois comumente seu casco pode ser do tipo catamarã, contendo tubos de sucção, chamados de "lanças". Estes flutuantes também são utilizados na extração de minérios no leito dos rios, como ouro (MARTINS *et al.*, 2022).

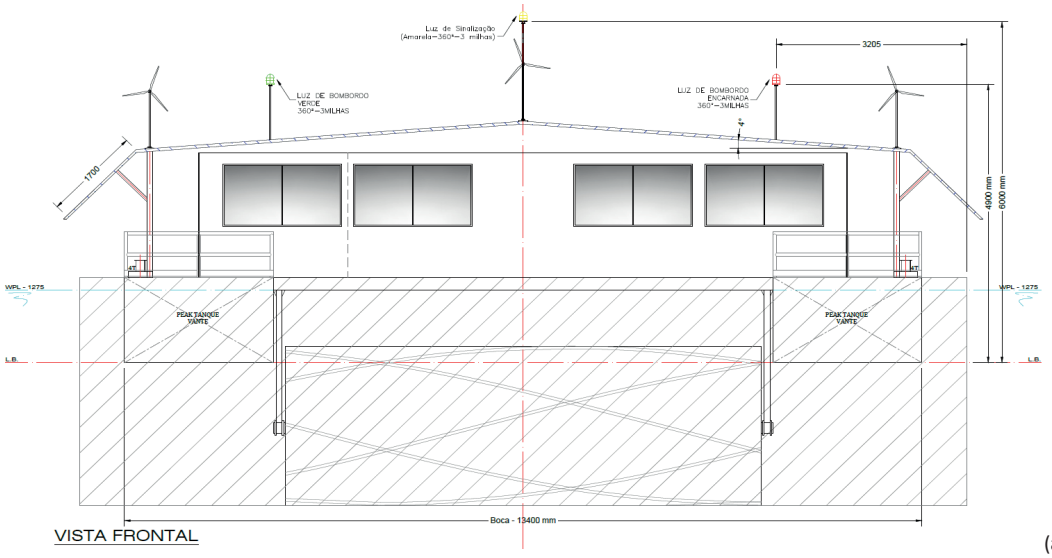
Os exemplos de estruturas flutuantes e seus usos alternativos anteriormente citados, reforçam a afirmação de que os construtores navais da região amazônica são exímios adaptadores de embarcações do tipo barcaça flutuante.

Considerando a habilidade nata do construtor naval da região amazônica em adaptar embarcações, assim como o potencial de energia renovável existente devido às condições geográficas e existência de diversos rios e afluentes na região, existe a possibilidade de inovação para aproveitar energias renováveis nas embarcações regionais, como apresentado na seguinte seção.

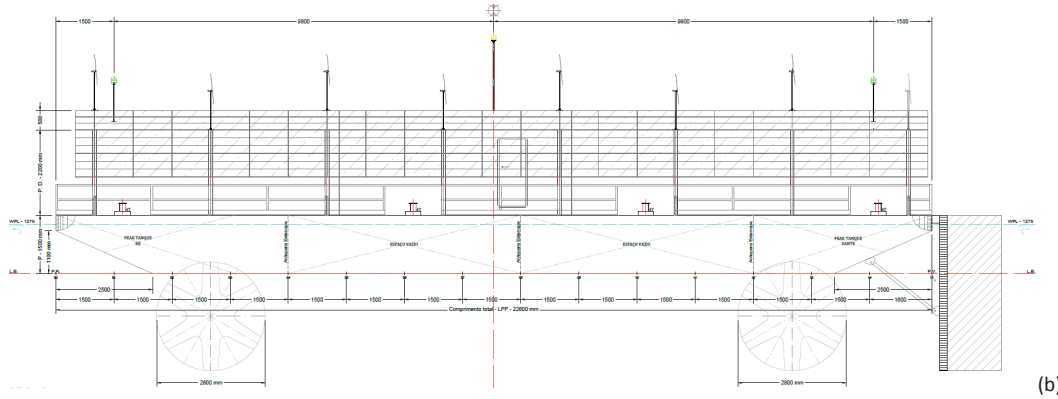
Alternativas para o aproveitamento de energias renováveis por meio de estruturas flutuantes

Considerando as condições da construção naval de estruturas do tipo "flutuante" na região amazônica e a disponibilidade de aproveitamento de energias renováveis como a energia hidrocinética e a energia solar (MATOS *et al.*, 2011), fica evidente o potencial de desenvolvimento de projetos de conversão de energia renovável utilizando estruturas flutuantes desenvolvidas na região. A Figura 3 mostra um desenho conceitual de uma embarcação sustentável desenvolvida pelos autores, incluindo a vista frontal (Figura 3a), vista longitudinal (Figura 3b), vista aérea do convés principal (Figura 3c) e um arranjo de cobertura com painéis solares distribuídos. Além dos painéis solares, a embarcação é do tipo catamarã, com duas turbinas hidrocinéticas instaladas entre os dois cascos. Além disso, uma série de turbinas eólicas de pequeno porte foi instalada longitudinalmente. A discussão de cada tipo de tecnologia é apresentada a seguir.

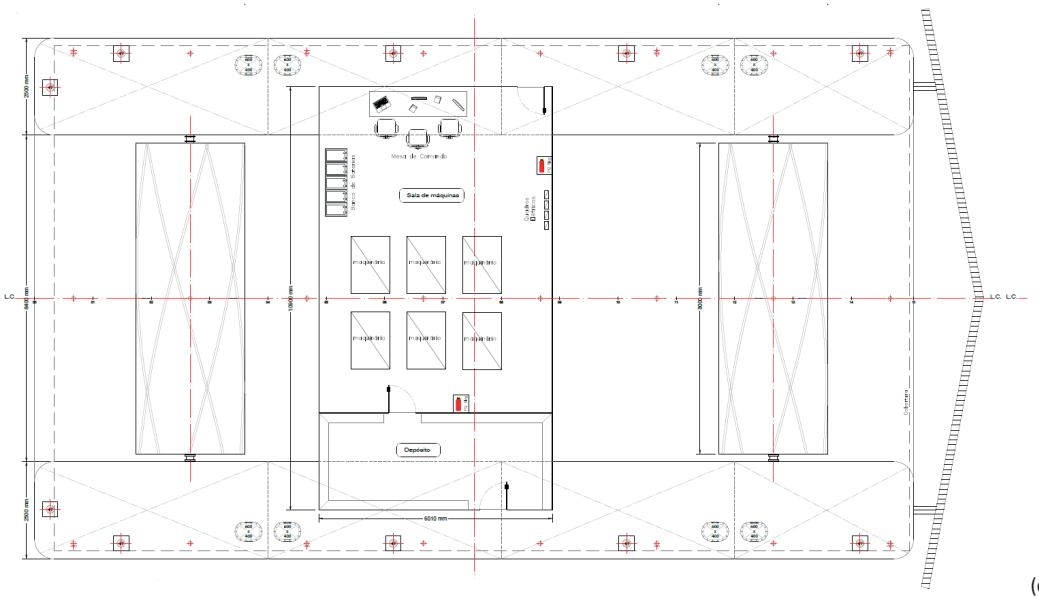
Figura 3. Proposta de desenho conceitual de embarcação tipo flutuante para aproveitamento de energias renováveis na região amazônica. (a) Vista frontal. (b) Perfil longitudinal. (c) Convés principal. (d) Cobertura com painéis solares.



(a)

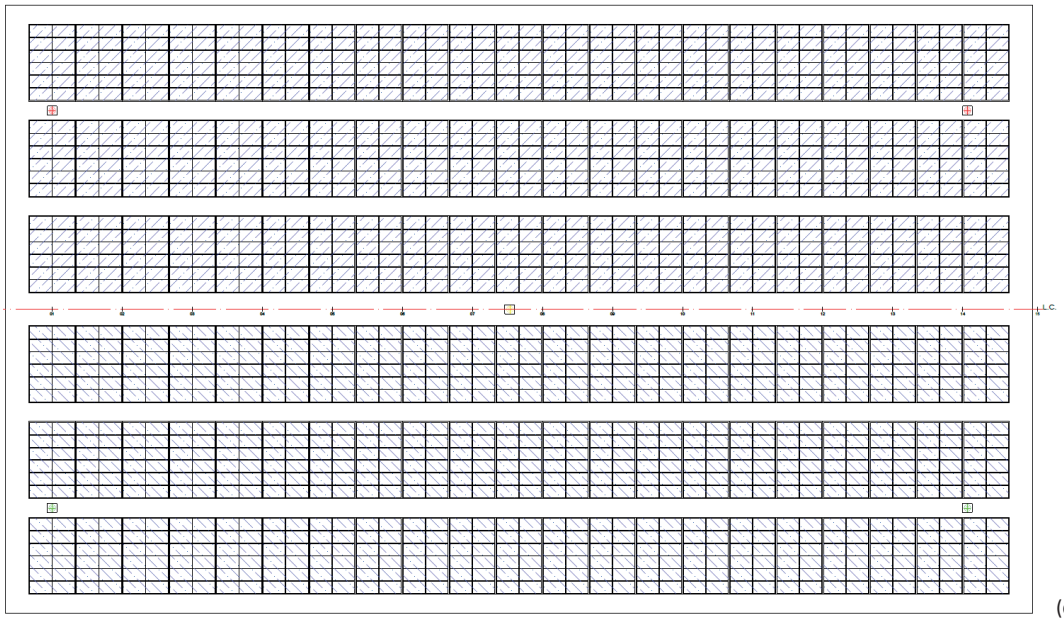


(b)



(c)

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

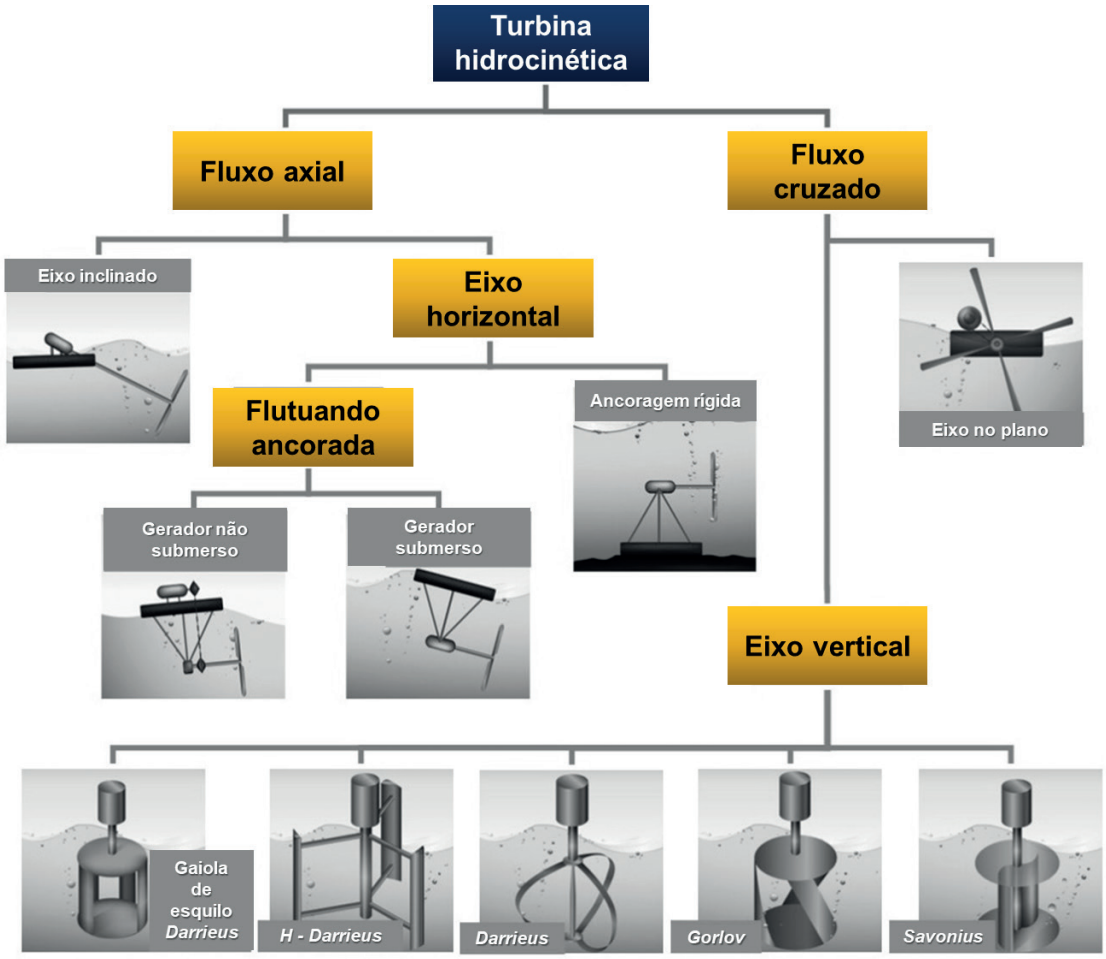


(d)

Fonte: Eudes José Coelho Neto, 2022.

A ideia principal proposta na Figura 3 consiste em um casco de uma embarcação que proporcione a flutuabilidade adequada para se instalar um sistema de turbinas hidrocinéticas (THC). Para fins práticos, recomenda-se que o desenho da embarcação seja similar aos protótipos construídos na indústria naval regional e que seja adaptado para que possam ser posicionadas as pás de uma THC. O modo de operação seria de maneira estacionária em um local onde exista potencial de aproveitamento das correntezas dos rios, utilizando um sistema de ancoragem para manter a posição. Uma THC pode ser utilizada com pás de formatos diferentes e disposta em diversos arranjos operacionais com relação à superfície d'água, como mostrado na Figura 4.

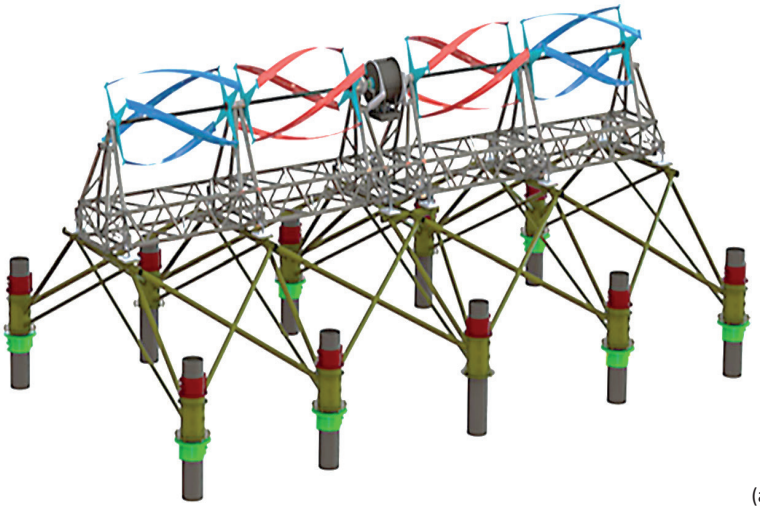
Figura 4. Diferentes arranjos para uma THC.



Fonte: Behrouzi et al. (2014) e Aristizábal-Tique et al. (2021).

Para a implementação prática de THCs acopladas nas estruturas flutuantes na região amazônica, principalmente em estágios iniciais de projeto, não necessariamente teriam de ser projetadas desde seu início, visto que algumas empresas já atuam no ramo da coleta de energia das ondas e correntezas e, provavelmente, já existam alguns dispositivos comerciais. É o caso, a exemplo, da empresa *Ocean Renewable Power Company*, que tem em seus catálogos algumas ideias e projetos que podem ser adaptados à embarcação que está sendo discutida. A Figura 5a mostra um dos modelos ofertados pela empresa, chamado *TidGen*, que é um dispositivo implementado fazendo uso da gravidade para sua ancoragem no fundo de corpos d'água. Contudo, poderia ser acoplado em uma embarcação regional, como apresentado anteriormente na Figura 3. A Figura 5b mostra um exemplo de um protótipo de embarcação coletora da energia das correntezas conhecido como VARUN-III, que foi projetado para operar no Rio Ganges, na Índia (BHARDWAJ; BHARDWAJ, 2019). Arranjos similares podem ser pensados para utilizar dispositivos conversores em estruturas flutuantes regionais.

Figura 5. Representação alternativa do arranjo da turbina hidrocinética *TidGen*. Imagem usada sob a licença *Creative Commons* CC-BY-NC-ND 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/). (b) Protótipo da tecnologia VARUN-III proposta de sistema flutuante com turbina hidrocinética instalada no canal superior do Ganges, Uttarakhand.



(a)



(b)

Fonte: (a) Nelson et al. (2018). (b) Modificado de Bhardwaj e Bhardwaj et al. (2019).

Segundo Solomin *et al.* (2021), projetos de sistemas flutuantes com tecnologias renováveis híbridas, combinando energia fotovoltaica com plantas hidrocinéticas ou eólicas, teriam a capacidade tecnológica de produzir grande parte da eletricidade anual do mundo. Os conceitos de sistemas de aproveitamento de energia híbridos vêm ganhando notoriedade ao longo dos anos, visto que seus desenvolvimentos e aprimoramentos podem ser, além de altamente rentáveis, bastante beneficiosos ao meio ambiente, visto que as energias são consideradas limpas.

Matos *et al.* (2011) apresentaram um estudo discutindo as energias renováveis que podem ser aproveitadas na região amazônica, discutindo diversas possibilidades e barreiras para seu uso. A região amazônica tem potencial para aproveitamento de energia solar, como apontado por Schmid e Hoffmann (2004), que propuseram um estudo com alternativas para substituir o uso do combustível *diesel* por energia solar na região.

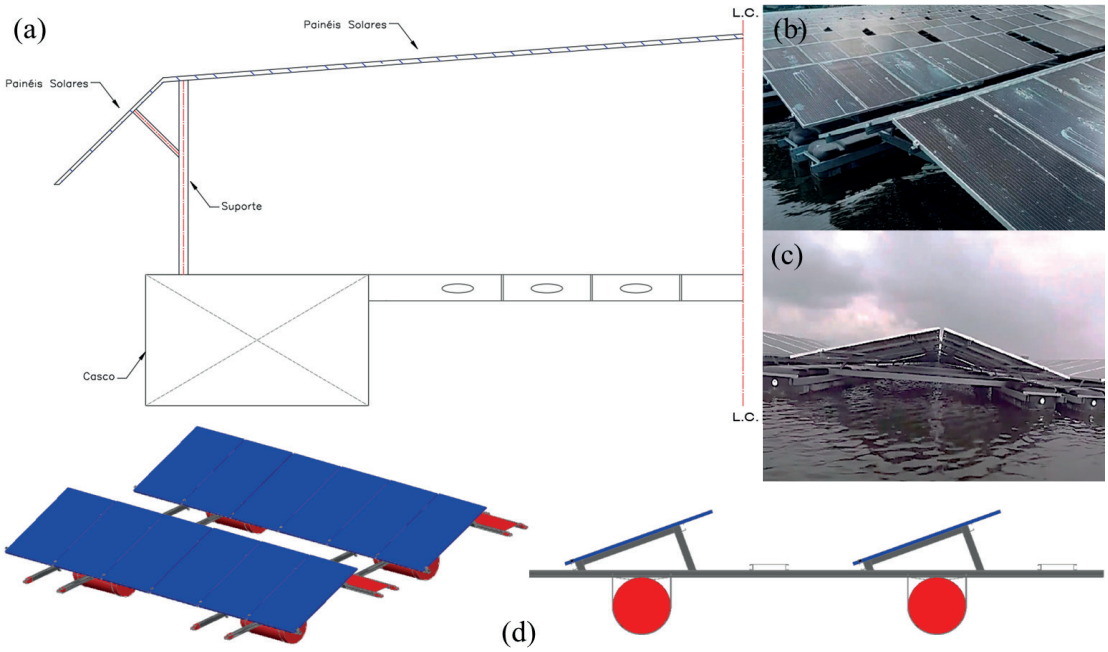
Por outro lado, embora a região amazônica tenha uma extensa área florestal, com muitas árvores e plantas, temos ocorrências eventuais de ventos que poderiam ser

aproveitadas, considerando uma produção de eletricidade para baixo consumo (SÁNCHEZ; TORRES; KALID, 2015).

As Figuras 6 e 7 mostram como poderiam ser alocados dispositivos na estrutura flutuante, visando coletar energia solar e eólica, respectivamente. É importante mencionar que, atualmente, já existem tecnologias madurecidas para aproveitamento de energia solar e estas podem ser encontradas com facilidade em lojas e sites comerciais nacionais (SOLARBRASIL, 2022). Também, já existem microturbinas eólicas de baixo consumo que podem ser adquiridas em alguns sites comerciais internacionais (ALIBABA, 2022).

Precisaríamos, de forma evidente, estruturar as embarcações com suportes ideais para montagem das placas solares (Figura 6a). As Figuras 6b e 6c mostram exemplos de instalação de painéis solares em estruturas flutuantes. Pode-se observar que o arranjo típico possui uma inclinação dos painéis com relação ao eixo horizontal (Figura 33d).

Figura 6. (a) Casco da embarcação com suporte para painéis fotovoltaicos. (b) Exemplo de instalação de painéis solares em estruturas flutuantes. (c) Exemplo de estrutura flutuante com painéis solares. (d) Proposta de instalação de painéis seguindo alternativas da literatura. As figuras (b)-(d) foram usadas sob a licença CC-BY 4.0.

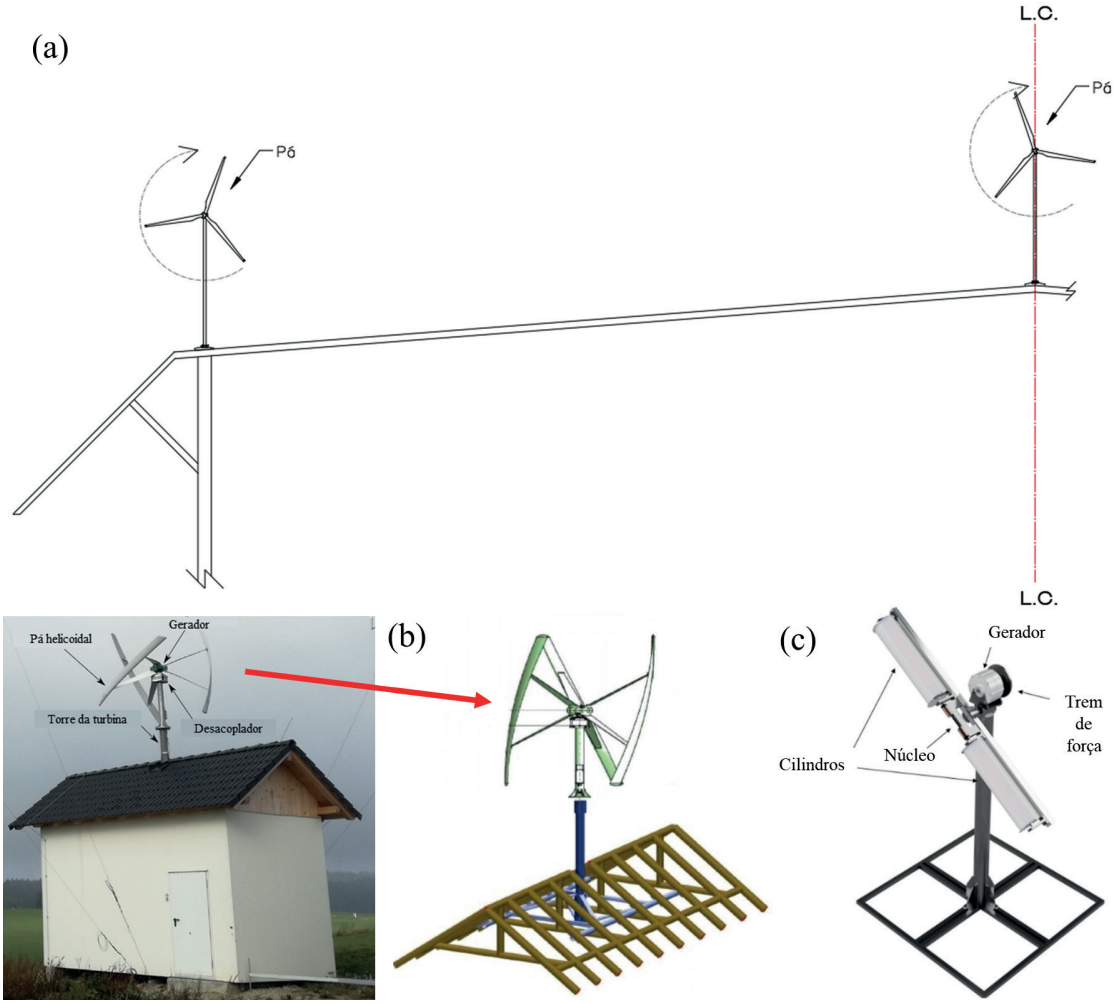


Fonte: (a) Elaboração própria; (b) e (c) Pedroso de Lima et al. (2021); (d) Kim et al. (2020).

A Figura 7a mostra uma ideia do arranjo de microturbinas eólicas proposto para as embarcações regionais. Cabe mencionar que atualmente existem vários tipos de turbinas de vento que estão sendo desenvolvidas para uso residencial. A Figura 7b mostra um exemplo de turbina helicoidal utilizada para uma casa que poderia ser considerada (CASTELLANI *et al.*, 2019). Por outro lado, avanços científicos mais recentes propõem o uso de turbinas com pás cilíndricas, que utilizam o "efeito Magnus", causado pelo ar para se movimentar, como pode ser visto na Figura 7c (LUKIN *et al.*, 2022).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 7. (a) Suportes com pás eólicas. (b) Alternativa de uso de microturbinas de vento residenciais. (c) Alternativa de uso de tecnologias de microturbinas recentes baseadas no efeito Magnus. As figuras (b) e (c) foram usadas sob a licença CC-BY 4.0.



Fonte: (a) Elaboração própria. (b) Castellani et al. (2019) . (c) Lukin et al. (2022).

Com as alternativas mostradas nas figuras anteriores poderiam ser aproveitadas diversas energias renováveis por meio de estruturas flutuantes regionais. É importante considerar que as embarcações vão precisar de um espaço destinado para equipamentos, incluindo maquinários, baterias, alternadores e demais componentes necessários para o seu funcionamento. Todavia, e dependendo do local onde o flutuante irá operar, devemos nos preocupar com os resíduos trazidos pelos rios em seu trajeto, pois os rios amazônicos são conhecidos por transportarem em seus percursos biomassa liberada pela natureza, como troncos de árvores e plantas flutuantes.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

DISCUSSÃO

Desafios de implementação na região amazônica

A construção de uma embarcação conversora da energia das correntezas pode esbarrar em desafios encontrados na região amazônica. Esses desafios podem aparecer durante os processos de planejamento, construção, instalação e uso.

A Amazônia atualmente se encontra em desenvolvimento tecnológico com relação às atividades de construção naval e aproveitamento de energias renováveis. Visto isso, o processo de fabricação de uma estrutura flutuante do tipo deve ser devidamente acompanhando pelo responsável técnico, e o projeto final deve conter a maior quantidade possível de informações.

O desempenho de qualquer protótipo tende a aumentar por meio de aprimoramentos e versões atualizadas. É importante que os dimensionamentos sejam feitos para que o desempenho inicial da embarcação se tornar atrativo para possíveis investidores. Em continuação, são descritos alguns fatores que precisam ser considerados durante o planejamento de estruturas flutuantes com fins de aproveitamento de energias renováveis na região amazônica.

- Um aspecto importante na construção do flutuante conversor de energia será o seu custo de construção, pois, por se tratar de um conceito novo na região, a cotação de valores para sua fabricação pode oscilar bastante de um construtor para outro;

- A localidade onde o flutuante pode ser instalado deve ser estudada de forma incisiva. O estudo do sítio de instalação deve ser feito considerando dois fatores: (1) deve-se ter em mente as características geográficas das comunidades a que se deseja atender, e (2) devem ser avaliadas as condições dos corpos de água ao entorno (cinemática, composição química, batimetria, tipo de solo para ancoragem etc.), pois, a comunidade a ser atendida pode não se encontrar em local adequado para instalação do flutuante;

- Dependendo do local de instalação escolhido, as manutenções e reparos necessários para o pleno funcionamento da embarcação podem se tornar de extrema complexidade;

- Sistemas de ancoragem adequados devem ser escolhidos. Para isto, o projeto dos sistemas de ancoragem pode ser baseado nas pesquisas desenvolvidas para outras energias renováveis. Como exemplo, pode ser mencionado o caso dos dispositivos de conversão de energia das ondas, onde já existem algumas alternativas para projetar sistemas de ancoragem de dispositivos flutuantes, como descrito por Davidson *et al.* (2017);

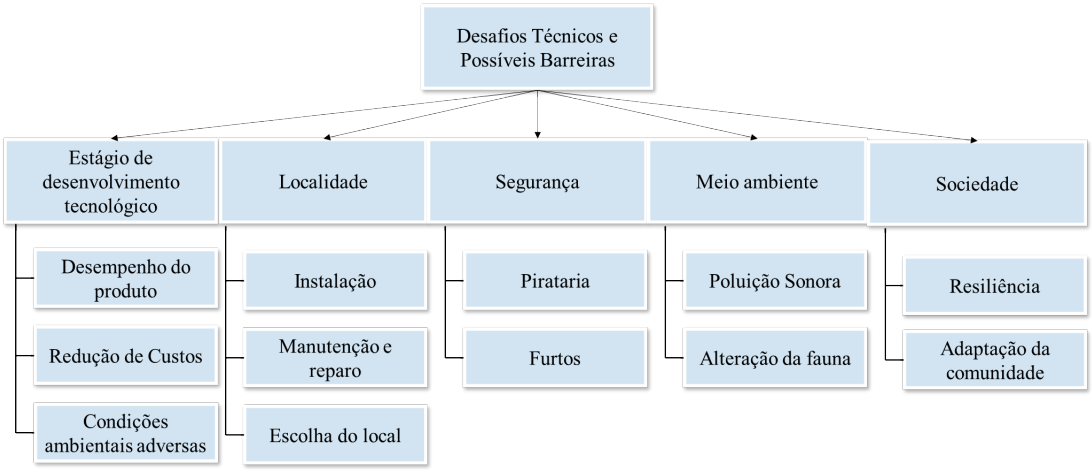
- A flora e a fauna amazônica são indiscutivelmente das mais diversas, sendo a biodiversidade regional uma referência mundial. A embarcação deve estar localizada em pontos estratégicos, onde ela não venha a causar impactos ou mudanças na rotina dos animais que habitam ao entorno;

- A região norte do Brasil ainda é acometida pela ação de atividades ilegais, como atividades de pirataria; então, a embarcação deve ser pensada de forma que venha a manter seus equipamentos em total segurança contra furtos e roubos. Provavelmente, o uso de tecnologias 4.0, como por exemplo a Internet das coisas (JAVAID *et al.*, 2022), possa contribuir para monitorar o funcionamento da embarcação e manter comunicação com estações de vigilância;

- A implementação de um flutuante conversor de energia renovável pode fazer com que a população ao entorno dela possa ter seu dia a dia alterado. A resiliência da população ao entorno deve ser estudada para que se possa ter um funcionamento harmônico entre a comunidade e o dispositivo;

A Figura 8 apresenta os diversos desafios que poderiam ser encontrados na instalação de uma embarcação coletora de energia das correntezas na região amazônica.

Figura 8. Desafios técnicos e possíveis barreiras para instalação de uma embarcação coletora de energia das correntezas na região amazônica.



Fonte: Elaboração própria.

CONCLUSÃO

O presente trabalho discutiu o uso de estruturas flutuantes, típicas da região amazônica, como alternativa para aproveitar energias renováveis. Foi feito um levantamento de diversas aplicações de estruturas flutuantes na Amazônia brasileira. Também, foi discutido um desenho conceitual de embarcação conversora de alguns tipos de energia renovável: hidrocinética, eólica e solar, discutindo as possibilidades de inovação. Por último, foram discutidas algumas barreiras que podem ser encontradas na implementação deste tipo de tecnologias na região. As principais conclusões são listadas a seguir:

- Existe a necessidade de proporcionar alternativas de geração de energia elétrica, ao menos para equipamentos e atividade de baixo consumo, em regiões remotas da região norte do Brasil;

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

- Existe disponibilidade de conversão de energia hidrocinética, solar e, eventualmente, eólica, na região amazônica, podendo ser aproveitado por meio de dispositivos de conversão de energia instalados em estruturas (ou sistemas) flutuantes;

- A indústria naval regional pode contribuir significantemente no desenvolvimento de diversos tipos de estruturas flutuantes sustentáveis de aproveitamento energético;

- A preservação ambiental, a resiliência social e os custos de instalação e operação, são fatores cruciais a serem pesquisados durante o planejamento de projetos de conversão de energia das correntezas usando sistemas flutuantes;

- Os desafios técnicos principais podem estar relacionados com a ancoragem, estabilidade em condições ambientais adversas, prevenção de colisões por causa de objetos flutuantes como troncos, e monitoramento operacional em regiões remotas;

- Com relação à legislação marítima para este tipo de estruturas na região amazônica, é possível que ainda não existam normas específicas que considerem a problemática local. Porém, projetos pioneiros podem consultar as normativas regionais relacionadas com embarcações flutuantes típicas.

Agradecimentos

J. V. H.-F. agradece o suporte proporcionado pelo GPA/UEA (Portaria N° 086/2021-GR/UEA). H.W.S.M. agradece o suporte de GPA/UEA (Portaria N° 409/2021-GR/UEA).

REFERÊNCIAS

ALIBABA. **Mini Turbina Eólica Micro**. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/g/mini-micro-wind-turbine.html>. Acesso em: 4 out. 2022.

ANA. **ANA - Agência Nacional de Águas: A navegação interior e sua interface com o setor de recursos hídricos**. , 2007. Disponível em: <https://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/images/abook/pdf/2016/25abr%20cad%203.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2022

ARISTIZÁBAL-TIQUE, V. H. et al. Development of riverine hydrokinetic energy systems in Colombia and other world regions: a review of case studies. **Dyna**, v. 88, n. 217, p. 256–264, 2021.

BEHROUZI, F.; MAIMUN, A.; NAKISA, M. Review of various designs and development in hydropower turbines. **International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering**, v. 8, n. 2, p. 293–297, 2014.

BHARDWAJ, B.; BHARDWAJ, N. **Hydrokinetic-Solar Hybrid Floating Renewable Energy Generation System to Explore Hydro and Solar Power Potential Worldwide**. Proceedings of the 2nd International Conference on Large-Scale Grid Integration of Renewable Energy in India, New Delhi, India. **Anais**...2019.

CASTELLANI, F. et al. Experimental vibration analysis of a small scale vertical wind energy system for residential use. **Machines**, v. 7, n. 2, p. 35, 2019.

DAVIDSON, J.; RINGWOOD, J. V. Mathematical modelling of mooring systems for wave energy converters—A review. **Energies**, v. 10, n. 5, p. 666, 2017.

DE LIMA, R. L. P. et al. In-situ water quality observations under a large-scale floating solar farm using sensors and underwater drones. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 6421, 2021.

FOGÁS. **Fogás: Galeria de imagens**. Disponível em: <https://www.fogas.com.br/?page_id=1149>. Acesso em: 23 set. 2022.

FORBES. **Açaí em fábrica flutuante, a nova saga amazônica pronta para navegar**. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2021/04/acai-em-fabrica-flutuante-a-nova-saga-amazonica-pronta-para-navegar/>. Acesso em: 6 abr. 2022.

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.

JAVAID, M. et al. Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. **Sustainable Operations and Computers**, 2022.

KIM, S.-H. et al. Design and installation of 500-kW floating photovoltaic structures using high-durability steel. **Energies**, v. 13, n. 19, p. 4996, 2020.

LINS, N. V. M. **Construção Naval no Amazonas**. Editora Valer ed. Manaus: Editora Valer, 2022.

LUKIN, A. et al. Small Magnus Wind Turbine: Modeling Approaches. **Applied Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1884, 2022.

MARTINS, W. B. R. et al. Mining in the Amazon: Importance, impacts, and challenges to restore degraded ecosystems. Are we on the right way? **Ecological Engineering**, v. 174, p. 106468, 2022.

MATOS, F. B. et al. A research on the use of energy resources in the Amazon. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3196–3206, 2011.

NELSON, K. et al. A framework for determining improved placement of current energy converters subject to environmental constraints. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 37, n. 7, p. 654–668, 2018.

ONS. **Mapa Geoelétrico Rede de Operação - Brasil - 2024**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 6 out. 2022.

SÁNCHEZ, A.; TORRES, E.; KALID, R. DE A. Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 278–290, 2015.

SCHMID, A. L.; HOFFMANN, C. A. A. Replacing diesel by solar in the Amazon: short-term economic feasibility of PV-diesel hybrid systems. **Energy Policy**, v. 32, n. 7, p. 881–898, 2004.

SILVA, S. B.; DE OLIVEIRA, M. A.; SEVERINO, M. M. Economic evaluation and optimization of a photovoltaic–fuel cell–batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 6713–6723, 2010.

SOLARBRASIL. **Energia Solas Painéis Solares**. Disponível em: <https://www.loja.solarbrasil.com.br/lista/construcao/energia/energia-solar/paineis-solares/>. Acesso em: 4 out. 2022.

SOLOMIN, E. et al. Hybrid floating solar plant designs: a review. **Energies**, v. 14, n. 10, p. 2751, 2021.

05

Logistics of the arc north amazonian corridors: An analysis using linear programming

Tatiana de Oliveira Russo
University of Campinas - UNICAMP

Matheus Melo de Souza
University of Campinas - UNICAMP

Andrea Leda Ramos de Oliveira
University of Campinas - UNICAMP

Maisa Sales Gama Tobias
Federal University of Pará - UFPA

Valcir João Farias da Cunha
Federal University of Pará - UFPA

Marcus Pinto da Costa da Rocha
Federal University of Pará - UFPA

Carolina Costa Ramos
Federal University of Pará - UFPA

doi 10.37885/221111025

ABSTRACT

Brazil occupies a prominent position on the international scene in several agricultural chains, being the largest producer and exporter of soybeans, sugar, coffee, among others. Part of this efficiency is explained by the technological advances, investments in research and expansion of cultivation that have enabled significant progress in the production of commodities. Within this aspect, the strategic location, due to the proximity of the ports to international consumer markets and the wide availability of more sustainable intermodal transport routes, makes the Amazonian Northern Arc play a central role. This being said, this study proposed to classify the supply and demand of the ports of the Northern Arc, as well as to develop an optimization model of the logistic transport corridors, through Linear Programming techniques, for soybean from Mato Grosso. The aspects evaluated were: transport price, municipal production and port capacity, through the BR-163 (MT-PA), Ferrogrão (EF-170) and the Araguaia-Tocantins waterway corridors. The analysis concluded that the use of intermodality, such as rail and waterway transportation provides a large reduction in transportation costs, as well as greater energy efficiency and lower emissions of polluting gases, and promotes an optimization of the Mato Grosso soybean supply chain, besides stimulating competitiveness in the international Market.

Keywords: Port Logistics, Linear Programming, Cost Analysis.

INTRODUCTION

Soybean is considered one of Brazil's main agricultural products and has gained increasing notoriety over the years with technological advances in production (NETO *et al.*, 2019). In the July 2021 harvest, Brazil reached a record soybean production estimated at 135.9 million tons, an increase of 11 million tons over 2019/2020, positioning Brazil as the largest soybean exporter in the world (CONAB, 2021). However, inconsistent with the positive impact of agribusiness on the Brazilian economy, the country has an inefficient logistics infrastructure, which increases transportation costs and decreases Brazilian competitiveness in relation to global agribusiness.

Most Brazilian soybeans are currently sold to the foreign market mainly through the ports of the South and Southeast regions, namely: Santos, in the state of São Paulo,Paranaguá, in the state of Paraná, and Rio Grande, in the state of Rio Grande do Sul (MDIC, 2021). These ports, despite having better port infrastructure in terms of productivity and capacity, will soon be unable to keep up with the increase in national supply and global demand (Lopes, 2017). In this case, we ask: how do the Amazonian Northern Arc ports behave in the soybean logistics chain and what would be the best economically feasible route to transport soybeans from the Midwest to the destination ports? The state of Mato Grosso is the only state that exports cargo to all major ports, in addition, many municipalities have more than one destination port (EMBRAPA, 2016). In Brazil, 27 municipalities export more than 500,000 tons of soybeans and corn and have more than one port as their destination. Of these, 15 are located in the state of Mato Grosso, which makes it not only the largest producing state, but also the state with the most logistical options. However, the large number of options does not materialize in efficiency, since most of the journeys are still made on roads in poor condition and over long distances (MPL, 2014).

In this context, the region known as the Amazonian Northern Arc, located above the 16th Parallel, stands out. It is defined as the export zone through the terminals and private use of the ports of Porto Velho (RO), Miritituba (PA), Porto Nacional (TO), and Nova Xavantina (MT) to the north and northeast of the country, joining the ports of Itacoatiara (AM), Santarém (PA), Vila do Conde (PA) and Itaqui (MA) (Rodrigues, 2021).

CASE STUDY

The Northern Amazonian Arc

Conceptually, the term Amazonian Northern Arc is defined as "Strategic plan that comprises the ports and transshipment stations of the states of Rondônia, Amazonas, Pará,

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Amapá and Maranhão." According to (MAPA, 2016). Amazonian Northern Arc can also be defined as "An imaginary line that crosses the Brazilian territory on the 16th south parallel, passing near the cities of Ilhéus (BA), Brasília (DF) and Cuiabá (MT)."

The Amazonian Northern Arc system is formed by the ports of: Itacoatiara, located in the state of Amazonas; Santarém, Barcarena and Vila do Conde, in Pará; São Luís and Itaqui, located in Maranhão, and Santana, in Amapá. The support platforms are the Cargo Transshipment Stations (ETC), which are operational support for multimodal corridors such as: Porto Velho in Rondônia, Miritituba in Pará, Nova Xavantina in Mato Grosso and Porto Nacional in Tocantins among others (CONAB, 2017).

Figure 1. Northern Amazonian Arc Corridors.



Fonte: Autores 2020.

Ports and Transshipment Stations of the Amazonian Northern Arc

The port of Itaqui is one of the main ports of the Amazonian Northern Arc, and has a strategic location, it is close to international markets, being the first port of entry and the last port of exit for the Asian market, whose route is the Panama Canal. In addition, this port shortens about 7 days of navigation, compared to other ports in the southeastern and southern regions of Brazil, these factors favor competition for the Amazonian Northern Arc (Silva *et al,* 2020). Its logistics route is directly linked to the Carajás railroad (EF- 315), operated by the Vale do Rio Doce company to the municipality of Açailândia in Maranhão, where its stretch interconnects with the North-South railroad (EF - 151), to Porto Nacional in the state of Tocantins and is more than 700 kilometers long (Bucker, 2019).

The Port of Santarém is located in the city of Santarém in the state of Pará, on the right bank of the Tapajós River, about 3 kilometers from the confluence of the Amazonian River, whose administration is under the responsibility of the Companhia Docas do Pará (CDP). It is a strategic port between the road and river modes where cargo is transported

for major trading companies such as Cargill, Cianport and Bunge. Maritime access is via The Tapajós and Amazonia rivers. Road access is via BR 163 (Cuiabá-Santarém), Cuiabá Avenue and BR 230 Transamazonica (EMBRAPA, 2021). The Port of Vila do Conde is located in the municipality of Barcarena, Pará State, on the right bank of the Pará River, 55 km from Belém and about 3.3 km downstream from Vila Murucupi (formerly Vila do Conde), opposite Marajó Bay, making it a very attractive route for the export of soybeans produced in the North, Northeast and Midwest regions, consolidating its position as a new alternative for maritime transport (CDP, 2022).

The Itacoatiara port is located in the state of Amazonianas, on the left bank of the Negro River, 13 kilometers from the Solimões River, this port is the main port of entry to the state. Access to this port is also via highways AM-010 and BR-174 and BR-319, connecting the states of Roraima and Rondônia. The main products exported at the port are soybeans through a bulk terminal Hermasa and wheat imported by TUP Ocrim (EMBRAPA, 2018). The Miritituba transshipment terminal in Pará was initially conceived for grain transportation. The transshipment operation consists of receiving trucks and loading them onto barges via a sucker. When transporting grain between Miritituba and Vila do Conde for export, the trucks and barges, which would return empty on the same route would carry fertilizers on the return trip (Bucker, 2019).

The Porto Velho cargo transshipment terminal, located in the state of Rondônia, is a Private Use Terminal (TUP) of the company Cargill Agrícola S.A. that is considered a strategic point for the flow of grains in the Amazonian Northern Arc. This company has been operating since 2003 in the capital of the state of Rondônia, located on the right bank of the Madeira River, and has the capacity to handle 2 million tons of grains annually. The unit receives solid bulk (soybeans and corn) produced in the state of Rondônia and the western region of Mato Grosso, from where they are transported by road via BR-363 to Porto Velho, which receives this product and then performs the transshipment to barges, bound for the ports of Itacoatiara (AM) or directly to the port of Santarém (PA), bound for world markets (CARGILL, 2021).

The transshipment terminal of Porto Nacional - TO is located in the state of Tocantins 20 km from Palmas, where there are companies such as VLI, which is responsible for carrying out the transshipment of soybean production from Mato Grosso through the road modal (BR - 158) to the railroad (North South Railroad - EF - 151) with destined for the port of Itaqui in Maranhão (Souza *et al,* 2020). The Nova Xavantina transshipment terminal is located in the state of Mato Grosso, where two multimodal route options are available: the first is by road-rail from Nova Xavantina to the port of Santos (SP), and the second option involves the multimodal corridors of the Amazonian Northern Arc, using the waterway mode between the

municipalities of Nova Xavantina to the port of Vila do Conde in Pará, through the Araguaia-Tocantins waterway (Resende *et al,* 2007).

Routes of the logistic corridors

The Amazonian Northern Arc has multimodal corridors, among which we can highlight the road, waterway and railway modals. Basically, its origin is located in the central-wester region of the country, in the agricultural production zone, and follows a transport axis destined to an export platform. Due to the availability of the Amazonian River system, the main transportation flow used is the waterway, where the Madeira and Tapajós river waterways stand out. The road mode serves as a support, moving the production from the producing centers to the transshipment units between trucks and barges or between trucks and the rail mode (CONAB, 2017). Among the logistics corridors of the Amazonian Northern Arc, we can highlight the operating and projected corridors. The Madeira Corridor is an operating corridor that has been used since 1997 by companies such as Amaggi to transport grain crops from the northwest of the state of Mato Grosso (Leandro and Silva, 2016). The products are transported by road via BR- 364 (MT-RO), covering a distance of 853 km, from Sapezal/MT to the cargo transshipment station in the port city of Porto Velho in Rondônia. From there, the grains are transported by bulk barges on the Madeira waterway, following the Amazonian River until reaching the port of Itacoatiara in the state of Amazonas, or directly to the port of Santarem in Pará, where the products are exported to the international market (CONAB, 2017).

The Tapajós Corridor is one of the main operating logistics corridors, as it is the corridor that connects the central-western region of the country to the state of Pará, through the Br-16 (Cuiabá-Santarém), through which grain production is transported from the central region of Mato Grosso (Sinop, Sorriso, among others) to the transshipment station of Miritituba/PA at a distance of approximately 995 km or directly to the port of Santarém/PA at a distance of 1,293 km. BR-163 is a longitudinal federal highway that is extremely strategic for the logistics of the Amazonian Northern Arc by integrating the Midwestern region of the country with the Northern ports (Ogita *et al,* 2019).

The Tocantins Corridor is an operating corridor, where currently the main route is the North-South railroad, which serves the northeast of Mato Grosso (Querência, among others), the north of Goiás and the MATOPIBA region, where the products are transported by road to the terminals of Porto Nacional (TO), or in Porto Franco/MA, where the transshipment to the railroad takes place, which then goes to the ports of São Luís or Itaqui in Maranhão (Castilho and Arrais, 2017). The Ferrogrão Corridor (EF-170) is a projected corridor that aims to consolidate the new rail corridor for exports from Brazil through the Amazonian Northern Arc. The railroad is 933 km long, connecting the grain producing region of the Center-West

to the state of Pará, with the grain production ending at the port of Miritituba in the state of Pará. The project is an important factor in the development of the logistical infrastructure of the agricultural areas of the state of Mato Grosso, enabling the region to have greater efficiency in the distribution of production at lower logistical costs and could be an important factor in inhibiting deforestation, since its construction will be parallel to the BR-163 (PPI, 2021).

The Tocantins-Araguaia Waterway Corridor is a projected corridor, where the backbone of this corridor is the Tocantins River and is located in the Brazilian Cerrado. It has a navigable potential of approximately 3,000 km. However, it needs improvements, such as the construction of a lock, dredging, signaling and especially the removal of the Pedral do Lourenço, so that its maximum potential for exporting grains to the ports of Vila do Conde/ PA and São Luís/ Itaqui/MA can be explored (Almeida, 2004).

Transportation Model

Case Study

In the development of this research, the method applied was the Linear Programming method for the optimization of soybean transportation for the municipalities of Querência, Sorriso, Sapezal, Sinop, Diamantino and Campo Novo do Parecis, which are located in the state of Mato Grosso, considered the largest soybean producing and exporting state in Brazil. The logistic corridors BR-163 (MT-PA), BR-364 (MT-RO), BR-158 (MT-PA) Ferrogrão Railroad (EF-170), North-South Railroad (EF-151) and the Tocantins-Araguaia waterway, were taken as the object of study where the transportation of soybeans from these municipalities to the ports of the Amazonian Northern Arc is planned, in particular the ports of (Itacoatiara, Santarém, Vila do Conde and Itaqui). The criteria used in the choice of these municipalities were: for their large production of soybeans, their geographical location for being close to the logistical corridors under study.

The decision variables considered in the Linear Programming Transport Model are: the quantities of soybean transported in millions of tons during 2019 using the 2019 Sidra IBGE data, the distances between origins and destinations, which were obtained using Google Maps software, and the freight values, which were divided into road freight and intermodal freight, since soybean can be transported by road mode directly to ports or used combination of modes (road-hydro or road-rail). The freight values were calculated according to the method of Rocha (2020), according to equation 1 described below. The freights were estimated for the same origin-destination (OD) combination between the transshipment terminals and the ports.

$$Freights: e^{-0,072867} . d_{od}^{0,767908}$$

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Based on the values found by equation 1, the reference values for waterway and rail freight were obtained through discounts in the value of road freight for the same combination between origin and destination locations. Such percentages were obtained as follows: the waterway freight corresponds to 40% of the road freight value and for rail freight it was 70% of the road freight value for the same combination of origin and destination.

Linear Programming Model

Objective Function

Based on the theory of Linear Programming, especially the transportation problem, a linear optimization model was developed, with the objective of minimizing the total cost transportation. The data considered in the model thus aggregating land transportation costs, transshipment fees, and port fees, according to formula 2 described below:

$$Cost = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} R_{i\ .}\ FR_{ij} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{r} P_{ik\ .\ FP_{ik}} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{r} P_{ik\ .}\ CT_{k} + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{m} I_{kj\ .\ FI_{kj}} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} (R_{ij} + I_{kj})\ .\ CE_{j}$$

DISCUSSION

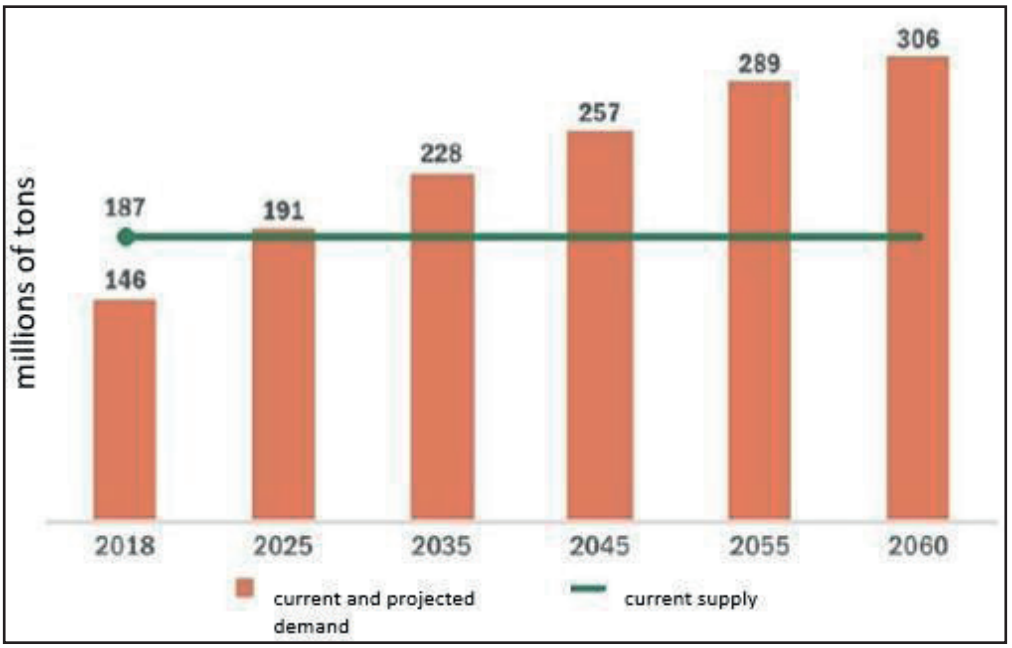
Supply And Demand Analysis

According to PNLP (2019) in 2018 the Amazonian Northern Arc was responsible for the flow of 23.1% of Brazilian soybeans. In 2025, its participation will increase, reaching 28.5%, about 54 million tons. In 2060, the Amazonian Northern Arc will drain about 34.6%, a value corresponding to 105 million tons. However, according to (PNLP, 2019), when analyzing the national panorama, the results of the national demand projection show a growth of 110% during the projected period (2018-2060), reaching a level of 305 million tons in 2060.

As of 2025, the Brazilian port capacity is already inefficient, with a deficit of 4 million tons, and if nothing is done, this figure could reach 119 million tons in the last year of the projection (PNLP, 2019), as shown in Figure 2 below.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figure 2. Brazilian port capacity.

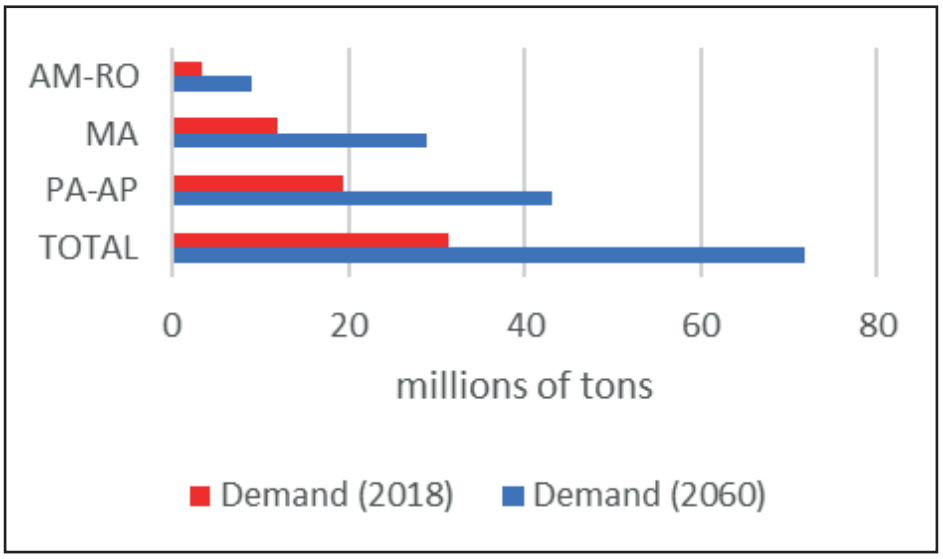


Fonte: PNLP, 2019.

Analysis of the demand of port clusters

The current demand of the Pará-Amapá Cluster is 19.44 million tons, in 2060 this value will reach 43.12 million tons, a 122% increase compared to 2018. The Amazonia-Rondônia Cluster had a demand in 2018 of 3.4 million tons, and in 2060 the value may reach 8.92 million tons, an increase of approximately 162%. The Maranhão Cluster had in 2018 a movement of 11.84 million tons and in 2060 according to the PNLP projection the demand will be 28.83 million tons (PNLP, 2019), an increase of 143%. Figure 3 below illustrates the capacity and demand in the future scenario.

Figure 3. The Capacity and Demand In The Future Scenario.



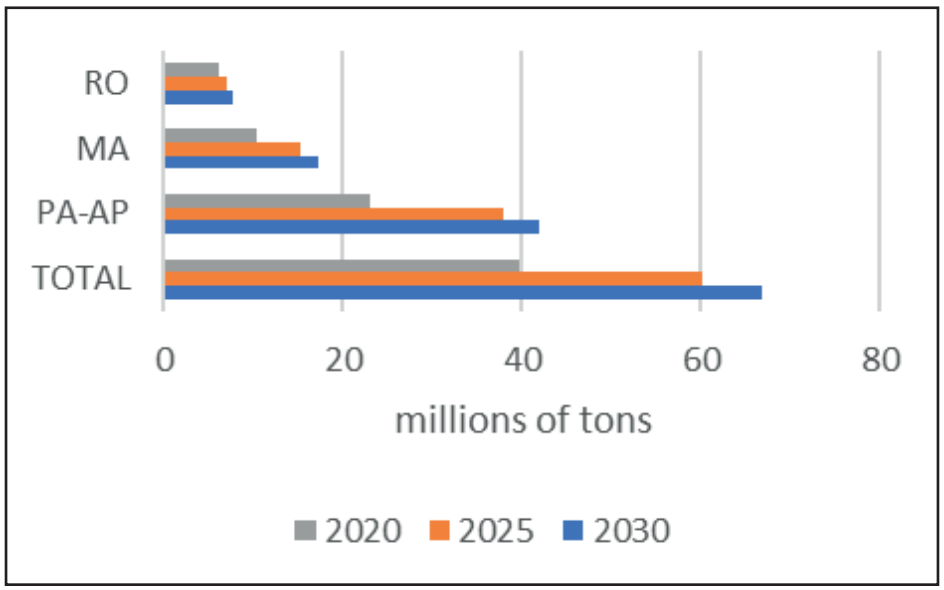
Fonte: PNLP, 2019.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

The states of Amazonas and Rondônia have the highest rate of increase in demand, although the values are substantially lower than those present in the others. Next come the states of Pará and Amapá, with the participation of Amapá as a great novelty and logistic option for the Amazonian Northern Arc in the coming years. From the analysis it is concluded that the total deficit is 80.87 million tons in 2060 (PNLP, 2019), so changes are needed in the coming years to balance the logistics of soybean outflow through the region.

The current capacity of the Pará-Amapá Cluster is approximately 23.15 million tons. In 2025 this value increases to 37.88 million tons. In 2030, the predicted quantity is 41 million tons, an increase of 81%. In relation to the Amazonas-Rondônia Cluster, no official data was found about the projections of port capacity in the state of Amazonas for soy, thus, only the analysis of the state of Rondônia through the port complex of Porto Velho was considered. Therefore, in 2020 the capacity was estimated at 6.19 million tons, while in 2025 the value considered was 7.13 million tons, about 15% higher. In 2060 the projected port capacity is 7.76 million tons. Finally, the Maranhão Cluster, which in 2020 had a capacity of 10.34 million tons, in 2025 it is estimated that this value will increase by about 46%. In 2030, the projected port capacity is 17.29 million tons, an increase of 67% over current capacity (PNLP, 2019). Figure 4 illustrates these scenarios.

Figure 4. Capacity and demand in different scenario..



Fonte: PNLP, 2019.

CONCLUSION

Throughout the development of this research, four scenarios were analyzed, taking into account the offers of the producing municipalities, the requirements of the ports and cargo transshipment stations (ETC), and the freight values.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

In (Scenario 1), only the BR - 163 route (MT-PA) was considered, where the optimization model provided a total minimum freight cost of R$ 1,944,293,004.71, to carry out the transportation of the production supply of the studied municipalities during a one year period. In the case of transshipment, 5, 13 million tons were transported to thetransshipment station in Miriticuba to the port of Santarém. Another transshipment that occurred was from Porto Velho to the port of Itacoatiara, where 2.47 million tons were transported.

In (Scenario 2), we considered the BR-163 (MT-PA) and Ferrogrão routes, where the optimization model provided a total minimum freight cost of R$ 1.751.984.808,01 transporting 6,68 million tons from the cities of Campo Novo dos Parecis, Sorriso, Sinop and Diamantino via the projected Ferrogrão railroad to the port of Santarem. It transported from Querência to the port of Vila do Conde, via the BR-158 and from Sapezal to the transshipment station in Porto Velho to the port of Itacoatiara.

In (Scenario 3), we considered the routes of BR-163 (MT-PA) and the Araguaia -Tocantins waterway, where the optimization model provided a total minimum freight cost of R$ 1.890.122.030,41, to transport the soy production supply from the cities of Sorriso, Sinop and Diamantino to the Miriticuba transshipment station destined for the port of Santarem. From Campo Novo do Parecis and Sapezal, 2,47 million tons were transported to the Porto Velho transshipment station, destined for the port of Itacoatiara. And from Querência, 2,28 million tons were transported via the Araguaia-Tocantins waterway to the port of Vila do Conde.

In (Scenario 4), the three logistic corridors were considered: BR-163 (MT-PA), Ferrogrão and Araguaia-Tocantins waterway, where the optimization model provided a total minimum cost of freight of R$ 1.697.813.833,71, where 6,68 million tons were transported from the cities of Campo Novo do Parecis, Sorriso, Sinop and Diamantino by Ferrogrão railroad to the port of Santarem. From Sapezal to the transshipment station of Porto Velho, 0,92 million tons were transported and from Querência, 2,28 million tons were transported by the Araguaia-Tocantins waterway to the port of Vila do Conde. This is further proof that the transport of cargo via the river is more economical, due to the low cost of freight and its greater transport capacity. However, one of its biggest obstacles would be its high-cost revitalization, remembering that the corridor needs infrastructure works for its full operation.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

REFERENCES

ALMEIDA, A. Hidrovia Tocantins-Araguaia: Importance and Economic, Social and Environmental Impacts as Perceived by Local Economic Agents. PhD Thesis. Luiz de Queiroz" College of Agriculture. University of São Paulo. Piracicaba, São Paulo, 2004.

BUCKER, S. L. Fertilizer Supply Chain Design. Application of the Optimization Model. Master's dissertation. Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019. p. 78.

CARGILL: Freight Transshipment Station in Porto Velho, 2022.

CASTILHO, D; ARRAIS, T. A. The North-South Railway and the regional economy of Brazil's center-north. 2017.

CDP, Companhia Docas do Pará. 2022. Port Authority: "Port of Vila do Conde", Belém,Pará, Brazil.

CONAB. National Supply Company. CONAB Studies. Observatório Agrícola. v.6. Brasília, Distrito Federal. 2017.

CONAB. National Supply Company. 10th Survey of the Brazilian Crop Monitoring Report, 2021.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. "Brazilian Agricultural and Livestock Macrologistics: Delimitation of Logistical Basins", Campinas, Brazil. 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Soy in numbers (2020/2021crop). 2021.

LEANDRO, T. S.; SILVA, A. C. "Mapping the Logistics Infrastructure of the State of Mato Grosso". Waterway Mode. Várzea Grande - MT - Integrative Project III of the Logistics Technology Course at Univag (Centro Universitário). 2016.

LOPES, H. S. Analysis of Brazilian Soybean Flow through Discrete Event Simulation. Doctoral thesis. Postgraduate Program in Production Engineering. Federal University of Itajubá. Itajuba, Minas Gerais. 2017.

MAPA, Ministry of Agriculture, Livestock and Supply: Infrastructure and Logistics. 2021.

MDIC, Ministry of Development, Industry and Foreign Trade. Statistical data. 2021

PRO-LOGISTICS MOVEMENT (MPL). Mato Grosso Agriculture and Livestock Federation. Logistics in Mato Grosso. Mato Grosso, 2014.

OGITA, S; RESENDE, L. F; ASSIS, T. F. Study of the Amazonian Northern Arc Logistics Corridors. Informe Banco Mundial, p. 24, 2019.

PNLP. National Port Logistics Plan. PNLP - 2019. Ministry of Infrastructure. Brasília, Federal District, 2019.

PPI (Partnership and Investment Program): EF-170 Railroad - MT/PA - Ferrogrão. 2021.

RESENDE, E.S; BONJOUR, S.C.M; FIGUEIREDO, A. M. R. Analysis of Alternative Transport Routes: The case of soybeans in Mato Grosso. Journal of Social Studies, Year 9, n. 1, 2007.

ROCHA, F. V. Efficiency analysis of investment projects in multimodal infrastructure for soybean transportation in Brazil. Doctoral thesis. Luiz de Queiroz Higher School of Agriculture. University of Sao Paulo. Piracicaba, Sao Paulo. 2020.

RODRIGUES, J. C. (2021). The Amazonian Northern Arc project in the Amazonian and its relationship with agribusiness. Revista da Casa da Geografia de Sobral, v. 23, p. 317-351.

SILVA, A. J; SOARES, L. M; LUCAS, M.J. Análise do escoamento de grãos do Brasil pelo Amazonian Northern Arc. XI FATECLOG. Os Desafios da Logística Real no Universo Virtual.

SILVA, A. J; SOARES, L. M; LUCAS, M. J. Analysis of grain flow from Brazil through the Amazonian Northern Arc. XI FATECLOG. The Challenges of Real Logistics in the Virtual Universe.

SOUZA, M. M; ROCHA, M. P. C; FARIAS, V. J. C; TAVARES, H. R. Optimization of soybean outflow routes from Mato Grosso, Brazil. International Journal for Innovation Education and Research, v.8, n. 08 p. 2, 8/Jan. 2020. ISS 2411-2933.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO (ANTAQ). Anuário Estatístico 2020. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2020. Disponível em: http://anuario.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/opendoc.htm?document=painel%5Cantaq%20-%20anu%C3%A1rio%202014%20-%20v0.9.3.qvw&lang=pt BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true. Acesso em: 20 Jan. 2022.

ASSIS, C.P.; COSTA, L.D.V.; HIRASSAKA, S.A. Infraestrutura logística brasileira de transporte e o impacto na escoação de grãos exportados pelo Brasil. Revista Caribeña de Ciencias Sociales, Out, 2019.

CHWIF, L.; MEDINA, A.C. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos, Teoria & publicações. 4. ed. São Paulo: Ed Campus-Elsevier, 2014.

CREECH, C. T., AMORIM, R. S., LAUTH, T. J., OSÓRIO, A. L. N. A. Development of a Sustainable Waterway Masterplan on an Amazon Megariver: The Madeira River, Brazil. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, USA, v. 147, n. 5, p. 502-1007, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Inicia novo ciclo de dragagem no Rio Madeira. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-novo-ciclo-de-dragagem-no-rio-madeira. Acesso em: 20 Jan. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Soja em números (safra 2020/21). Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 20 Jan. 2012.

MONTEIRO, M. G.; BRISOLA, M. V.; LEITÃO, F. O.; SILVA, W. H. da. Limitações e Problemas no Transporte Da Soja No Brasil. Limitations and problems in soy transport in Brazil. Informe GEPEC, [S.l], v.25, n.1, p. 261–283, 2021. Disponível em: https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/25650. Acesso em: 23 jan. 2022.

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: Cadernos De Arquitetura E Urbanismo, n.22, p.143–158, 2018. Disponível em: https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/25676. Acesso em: 23 Jan. 2022.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: Winter Simulation Conference, 7., 2011, Phoenix. Anais.... Phoenix, AZ, USA p. 12-24.

SANTOS, A. J. dos. Transporte fluvial de carga de grãos do baixo madeira ao baixo amazonas. 2019. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2019.

06

Estudo preliminar da resistência ao avanço e dos movimentos de uma barcaça regional: algumas considerações para o uso de software em fases de anteprojeto

Jorge Artur Leite da Silva Júnior
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Jassiel V. H. Fontes
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Harlysson W. S. Maia
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Irving D. Hernández
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Ricardo Almeida Sanches
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

doi 10.37885/221110952

RESUMO

A região amazônica possui diversas atividades de navegação fluvial relacionadas com o transporte de cargas utilizando barcaças. Todavia, ainda é necessário divulgar procedimentos para caracterizar o comportamento hidrodinâmico deste tipo de embarcação na região. O presente trabalho apresenta um procedimento simplificado, incluindo considerações de uso de alguns métodos disponíveis em software comercial, para avaliar alguns aspectos hidrodinâmicos de uma barcaça regional que possam ser úteis na fase de anteprojeto, tais como a resistência ao avanço e o movimento em ondas. Como caso de estudo, foi considerada uma barcaça de transporte de carga que opera no Estado do Amazonas. Para fins de comparação, foi avaliado o efeito da mudança da inclinação da proa e popa do casco em alguns parâmetros hidrostáticos, resistência ao avanço e movimentos. Foram utilizados métodos simplificados disponíveis em um software comercial, discutindo as limitações de cada análise e propondo considerações para melhorar os estudos em fases posteriores de projeto. Foi concluído que embora diversos softwares de Engenharia Naval podem ser ferramentas úteis para realizar análises práticas na indústria, em várias situações ainda será necessário validar os resultados obtidos com dados experimentais e realizar simulações de fluidodinâmica computacional que incluam os efeitos da viscosidade d'água.

Palavras-chave: Análise Paramétrica, Barcaça Regional, Comportamento Hidrodinâmico, Geometria do Casco, Região Amazônica, Maxsurf.

INTRODUÇÃO

Grande parte do transporte fluvial de cargas na Amazônia é realizado utilizando diversos tipos de barcaças. Dentre as mercadorias que são comumente transportadas por barcaças podemos citar os derivados de petróleo; materiais químicos; granéis sólidos, líquidos e gasosos; veículos; madeiras; maquinários, entre outras. Por este motivo, estudos preliminares que permitam conhecer parâmetros hidrodinâmicos e estruturais, para fins de projeto, são relevantes.

Estudos científicos relacionados com o projeto de barcaças têm sido foco de estudo nos últimos anos em diversas regiões do mundo. Tabaczek *et al.* (2007) analisaram a resistência do casco de barcaças rebocadas em águas rasas. Cálculos numéricos utilizando software de fluidodinâmica computacional (*CFD*, *Computational Fluid Dynamics*) foram realizados variando a forma da proa.

A estabilidade e os movimentos de uma barcaça foram analisados por Dhavalikar *et al.* (2009), que fizeram cálculos referentes às características hidrostáticas iniciais, a curva de estabilidade intacta e os operadores de amplitude de resposta (*RAO, Response Amplitude Operators*) dos movimentos de rolagem (*roll*) e cabeceio (*pitch*).

Uma análise do potencial econômico da padronização de uma barcaça para navegação interior, para fins de movimentação de derivados líquidos de petróleo, foi proposta por Basso (2012). Neste trabalho, foi realizando um levantamento das características da barcaça e dos componentes que poderiam ser padronizados, tais como as suas cavernas e anteparas estanques, com o intuito de minimizar os custos de compra e montagem de materiais. Foram obtidos resultados interessantes referentes à economicidade de materiais para a fabricação da barcaça, tais como a redução de até 3% dos custos com materiais utilizados nos perfis estruturais das cavernas e bulbos.

Larsen (2012) apresentou um estudo do comportamento dinâmico (movimentos) de uma barcaça utilizando o método de escoamento potencial conhecido como *Teoria das Faixas,* conhecida em inglês como *Strip Theory* (SALVESEN; TUCK; FALTINSEN, 1970). Foram avaliados os movimentos de arfagem (*heave*) e cabeceio (*pitch*). Concluiu-se que a discrepância entre resultados numéricos e experimentais nesse tipo de análise pode ser devida a fatores relacionados com imprecisões das medidas experimentais e a ausência da viscosidade d'água nas análises numéricas.

Obreja (2013) realizou testes de resistência ao avanço em um modelo experimental de uma barcaça transportadora de gás. A estimativa da resistência ao avanço foi feita por meio do método de regressão de *Holtrop-Mennen*. Também, têm sido implementados alguns métodos para o cálculo da resistência ao avanço de embarcações em águas restritas. Por exemplo, o trabalho desenvolvido por Skupien e Prokopowicz (2014) teve por objetivo

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

analisar a resistência ao avanço de embarcações que operam em navegação interior. Por meio de métodos de regressão e métodos de cálculo de resistência ao avanço já conhecidos, como a equação de *Marchal* e a fórmula de *Howe*, foram calculadas as curvas de potência para estimar o consumo de combustível dessas embarcações.

A predição da resistência ao avanço total de uma barcaça carvoeira autopropelida, utilizando *CFD*, foi apresentada no trabalho de Purwana e Husodo (2015). A pesquisa teve por objetivo estimar a resistência ao avanço total de uma barcaça com propulsão própria que opera no transporte de carvão. Os resultados comparativos entre o método *CFD* usando o software *ANSYS-CFX* e o método de *Holtrop* foram satisfatórios para baixas velocidades, principalmente na faixa entre 2 e 4 nós.

Abramowicz-Gerikg *et al.* (2017) apresentaram o desenvolvimento de um sistema de direção acoplado na popa de uma barcaça que opera em rotas de navegação interior. Os resultados *CFD* foram validados com resultados experimentais de modelos.

Llauca (2018) realizou um estudo experimental de resistência ao avanço em barcaças menores, com três diferentes relações de comprimento e boca. Foi feita a extrapolação dos dados dos modelos para o protótipo das barcaças em tamanho real, e em seguida foram obtidas as curvas de resistência ao avanço, assim como as curvas de potência efetiva, considerando dois calados por barcaça.

Kwon e Yeon (2021) pesquisaram a otimização do ângulo de inclinação de uma barcaça tipo *FPSO* (*Floating, Production, Storage and Offloading*) desde uma perspectiva de estabilidade de reboque e carregamento. Especificamente, a pesquisa teve por objetivo analisar a inclinação da popa e da proa da barcaça, utilizando modelagem *CFD* com o software *STAR-CCM+*. Com as simulações em *CFD* e as suas respectivas comparações experimentais, foi possível obter conclusões sobre a estabilização do movimento de *yaw* da embarcação. Com relação à resistência ao avanço, foi concluído que quanto menor for o ângulo de proa, menor será a resistência ao movimento da barcaça.

Embora existam diversas pesquisas relacionadas com a avaliação do comportamento hidrodinâmico de barcaças a nível mundial, ainda é necessário contribuir com a divulgação de estudos didáticos que mostrem procedimentos práticos para avaliar aspectos hidrodinâmicos de embarcações que operam na região amazônica, propondo considerações no uso de software para fins de anteprojeto. Por tanto, este trabalho apresenta um procedimento para realizar, de maneira simplificada e preliminar, o estudo da resistência ao avanço e dos movimentos de uma barcaça regional usando métodos disponíveis em software comercial. Como caso de estudo, visa-se avaliar o efeito da mudança da inclinação da proa e da popa nas características hidrostáticas, resistência ao avanço, e comportamento em ondas, de uma barcaça de carga que opera no Estado do Amazonas. Para demonstrar o procedimento,

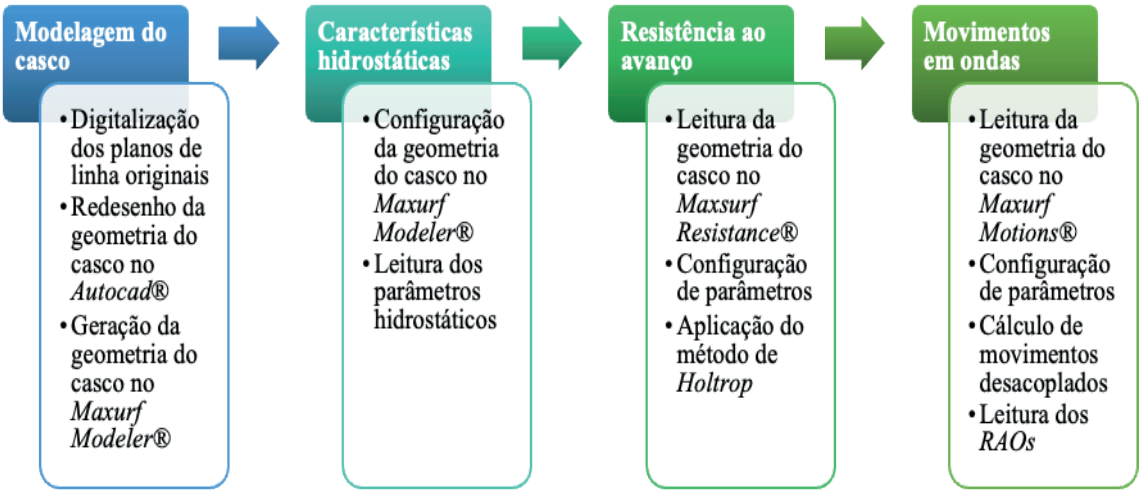
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

são utilizados métodos disponíveis na versão acadêmica do software *Maxsurf* da *Bentley Systems*®. Um caso padrão (caso real) e quatro casos de estudos (com diferentes geometrias do convés, variando a inclinação da proa e da popa) foram avaliados neste estudo. Visa-se demonstrar o uso de métodos simplificados para analisar diversos parâmetros de projeto preliminar, propondo considerações para aprimoramento das análises.

MÉTODOS

O presente trabalho visa apresentar um estudo sistemático de diversas configurações do casco de uma barcaça regional, com o intuito de avaliar a influência da variação das inclinações da proa e popa em alguns parâmetros hidrostáticos importantes, incluindo a resistência ao avanço total e o comportamento em ondas regulares. A Figura 1 mostra o procedimento considerado no presente trabalho.

Figura 1. Procedimento de análise.



Fonte: Elaboração própria.

Uma vez que os planos de linha originais da barcaça regional foram digitalizados e redesenhados no software *Autocad®*, a versão acadêmica do software *Maxsurf®* desenvolvido pela empresa *Bentley Systems* foi utilizada para realizar análises hidrodinâmicas comparativas. Basicamente, foram utilizados os softwares utilitários *Modeler*, *Resistance* e *Motions* para modelar a embarcação, realizar as análises de resistência ao avanço e avaliar o comportamento em ondas regulares, respectivamente. Para informações detalhadas dos métodos utilizados, o leitor pode consultar os manuais de uso disponíveis em cada software.

Modelagem do casco da barcaça regional

No presente trabalho, foi considerada como referência uma barcaça regional que opera no transporte de granel no Estado do Amazonas (Figura 2). A barcaça tem um comprimento

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

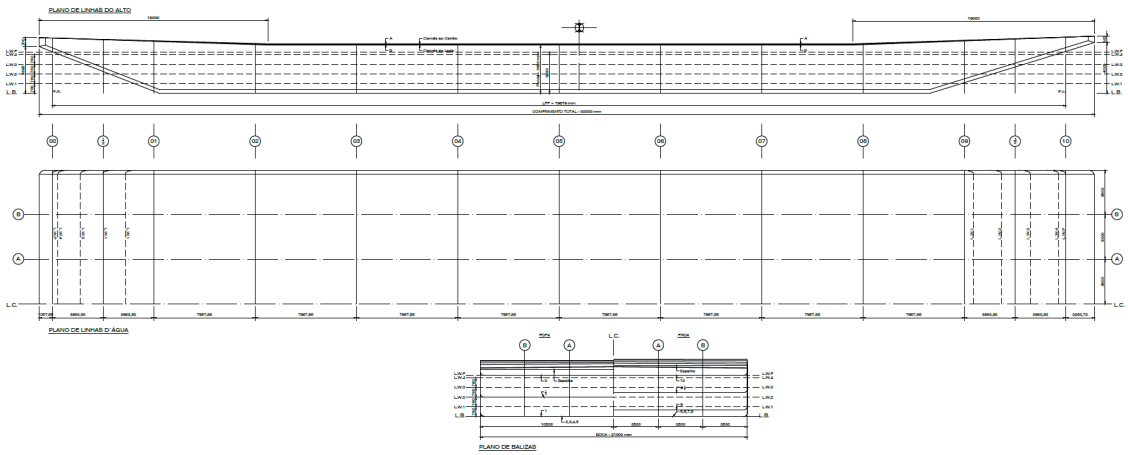
total de 83 m, comprimento entre perpendiculares de 76,7 m, boca moldada de 21 m, pontal moldado de 3,8 m, e calado de projeto de 3,14 m.

A Figura 2a mostra algumas imagens da barcaça em operação, incluindo vistas da barcaça carregada com granel sólido e acoplada com um empurrador fluvial, caracterizando um comboio fluvial. Os planos de linha da embarcação (Figura 2b) Foram digitalizados a partir dos planos de referência, utilizando o software de desenho técnico *Autocad®*. A Figura 2b mostra os planos de alto, de linhas d'água e de balizas da embarcação de referência. O plano de linhas d'água mostra uma vista vertical da barcaça, onde podem ser vistas as 5 linhas d'água utilizadas no projeto, enquanto o plano de balizas mostra as vistas da proa e da popa da embarcação. No desenho técnico da barcaça (caso padrão e casos de estudo), foram consideradas 13 balizas para o desenho geométrico (além da presença dos espelhos de proa e popa da embarcação). As balizas 0, 0,5 e 1 são relacionadas às inclinações da popa e as balizas 9, 9,5 e 10 são relacionadas às inclinações da proa.

Figura 2. Barcaça regional considerada como caso de estudo. (a) Fotos da barcaça em operação. (b) Planos de linhas, incluindo plano de linhas do alto, plano de linhas d'água e plano de balizas.



(a)



(b)

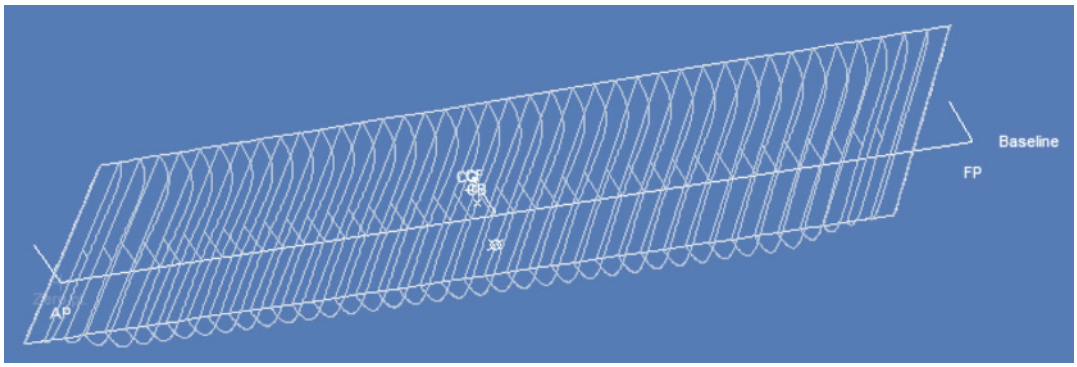
Fonte: (a) Jorge Artur Leite da Silva Júnior. (b) RGF – Eng. Ricardo Sanches.

A Figura 3a mostra a barcaça padrão representada por suas balizas, gerada no software *Maxsurf Modeler*. Esta figura mostra 41 balizas, que foram geradas entre as balizas de referência com o objetivo de contornar e representar adequadamente as dimensões principais da barcaça. A Figura 3b mostra uma vista da superfície do casco, onde podem ser vistas as inclinações do casco da proa e da popa da barcaça padrão.

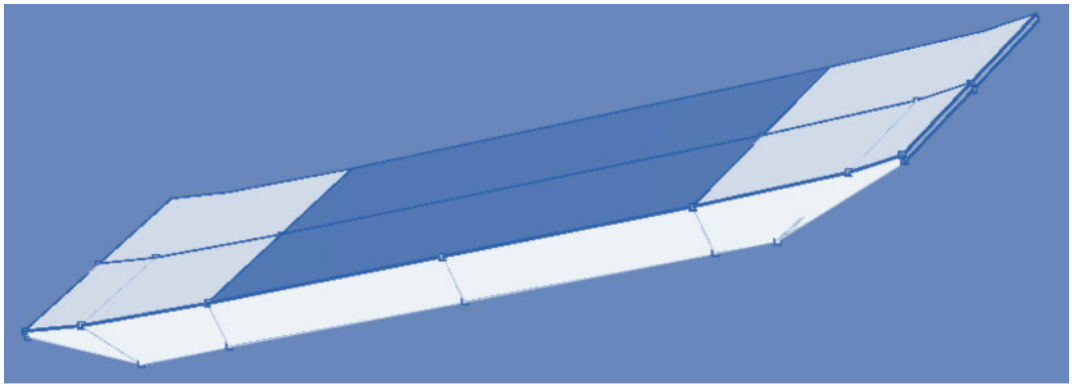
No presente trabalho, diferentes configurações geométricas do casco da barcaça padrão foram avaliadas. Para isto, as extremidades da proa e da popa foram consideradas com as inclinações mostradas na Figura 3c. As inclinações do caso padrão e dos quatro casos de estudo considerados são mostradas na Tabela 1.

Na Figura 3c, o contorno azul representa a geometria original da barcaça (caso padrão), enquanto os contornos em preto representam as novas geometrias da barcaça, de acordo com os ângulos de inclinação indicados. A linha amarela representa o calado de operação, em 3,14 m. Os respectivos ângulos de cada caso são medidos em relação à linha que liga os espelhos de proa e popa, seguindo o procedimento de medição dos ângulos encontrado em Kwon e Yeon (2021), (ver linha amarela na Figura 3c). Para as comparações do caso padrão com os demais casos de estudo, o calado de projeto da barcaça foi mantido constante.

Figura 3. Modelo do caso padrão de barcaça. (a) Balizas que foram geradas no *Maxsurf Modeler*. (b) Superfície do casco. (c) Vista de perfil das extremidades dos cascos das barcaças consideradas como caso de estudo. A linha amarela representa o calado de operação, em 3,14 m.

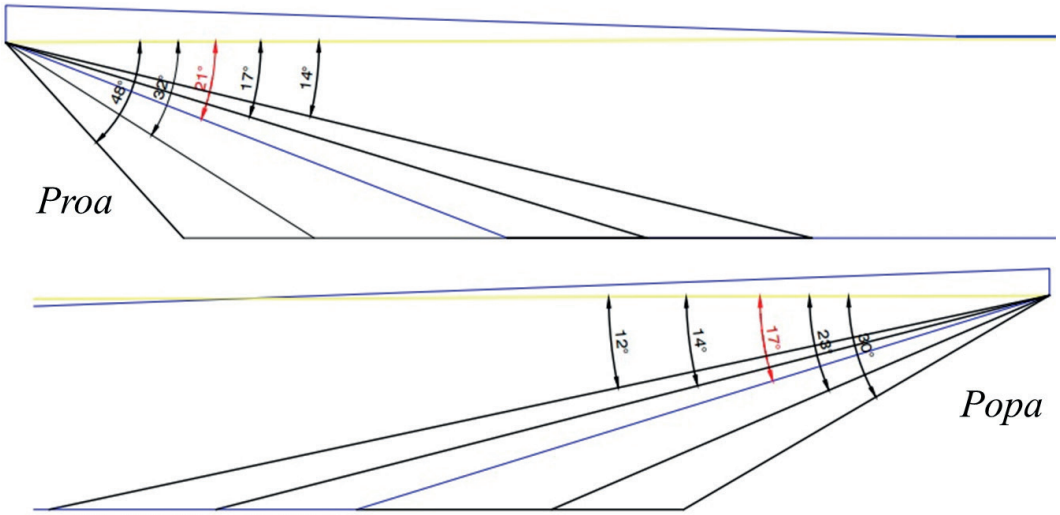


(a)



(b)

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br



(c)

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 1. Ângulos de inclinação de proa e popa dos casos de estudo.

Ângulo	Proa	Popa
Caso padrão	17°	21°
Caso 1	23°	32°
Caso 2	30°	48°
Caso 3	14°	17°
Caso 4	12°	14°

Fonte: Elaboração própria.

Cálculo das características hidrostáticas, resistência ao avanço e movimentos

Características hidrostáticas principais: O software *Maxsurf Modeler* foi usado para modelar a geometria do casco, de maneira que fosse facilmente importado nos outros utilitários. Além disso, a modelagem possibilitou conhecer as características hidrostáticas principais do casco correspondente a cada caso de estudo. As características hidrostáticas principais foram analisadas na medida da linha d'água, considerando o calado de operação de 3,14 m. Os parâmetros hidrostáticos principais analisados foram os seguintes:

– Δ, deslocamento da embarcação (em toneladas, ton);
– BM_t, raio metacêntrico transversal (em metros, m);
– GM_t, altura metacêntrica transversal (em metros, m);
– *LCB*, centro longitudinal de carena (em metros, m);
– TP_c, toneladas por centímetro (em toneladas por cada centímetro, ton/cm);
– MT_c, momento para trimar 1 centímetro (em toneladas-metro, ton.m);
– C_b, coeficiente de bloco (adimensional);
– C_m, coeficiente de seção mestra (adimensional);
– C_p, coeficiente prismático (adimensional);

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

– C_{wp}, coeficiente de área do plano d'água (adimensional);
– $C_{L/\Delta}$, coeficiente de razão comprimento-deslocamento (adimensional).

Informações mais detalhadas sobre as características hidrostáticas de uma embarcação podem ser encontradas em Lee (2019).

Resistência ao avanço: O software *Resistance* é um módulo do software *Maxsurf* que possui diversos modelos para cálculos práticos de resistência ao avanço. Estes modelos são baseados principalmente em séries sistemáticas e modelos de regressão para embarcações em diversos regimes de operação, como deslocamento, semi-planeio e planeio. Faltinsen (2005) proporciona detalhes dos regimes de operação de embarcações. No presente estudo, será considerado o regime de deslocamento, definido para baixos números de *Froude*, menores do que 0,4. O número de Froude é definido como $Fn=v/(gL)^{0.5}$, sendo v a velocidade da embarcação (em m/s), g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s^2), e L é o comprimento da embarcação (em m). Neste trabalho foi utilizado o Método de *Holtrop*, disponível no *Maxsurf Resistance*. Informações mais detalhadas sobre o cálculo de resistência ao avanço de uma embarcação pelo método de regressão de *Holtrop* podem ser encontradas em (HOLTROP, 1978; HOLTROP; MENNEN, 1978; MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

Comportamento em ondas: O software *Motions* é um módulo do software *Maxsurf* utilizado para avaliar o comportamento em ondas de uma embarcação de maneira simplificada, sem considerar os efeitos da viscosidade d'água. Ou seja, o escoamento é considerado como potencial, considerando o escoamento como irrotacional, invíscido e incompressível.

Para avaliar a dinâmica de embarcações de deslocamento, foi utilizado o método da *Teoria das Faixas* (*Strip Theory*), cujos detalhes podem ser encontrados na literatura, incluindo o trabalho de Salvesen, Tuck e Faltinsen (1970), que mostra a *Teoria das Faixas Moderna*. Este modelo é uma das abordagens mais conhecidas na avaliação de movimentos de embarcações cuja relação comprimento/boca seja maior do que ~3 (JOURNÉE; MASSIE, 2001), ou seja, embarcações com forma 'alongada', considerando ondas regulares. O método permite a obtenção, em pouco tempo computacional se comparado com métodos *CFD*, das amplitudes dos movimentos translacionais (*surge*, *sway*, *heave*) e rotacionais (*roll*, *pitch*, *yaw*), de maneira desacoplada. Tais movimentos são calculados em relação ao sistema de coordenadas definido na embarcação (usualmente colocado no centro de gravidade dela). Como resultado das análises, são obtidos alguns gráficos que representam a amplitude do deslocamento com relação às frequências de encontro das ondas com a embarcação. Na Engenharia Naval esses gráficos são conhecidos como *Operadores de Amplitude de Resposta* (*RAOs, Response Amplitude Operators*). Estes gráficos serão obtidos para os movimentos desacoplados de *heave* e *pitch*, considerando cinco velocidades de avanço diferentes (v: 1; 2,5; 4; 5,5; e 7 nós), para todos os casos de estudos descritos

na Tabela 1. Para o cálculo dos *RAO* foram consideradas as frequências de encontro das ondas predeterminadas no software (*considerando o espectro JONSWAP*), considerando a incidência das ondas pela proa (*head sea*). Informações mais detalhadas sobre a dinâmica dos movimentos de uma embarcação usando métodos de escoamento potencial podem ser encontradas em Salvesen, Tuck e Faltinsen (1970), Journée e Massie (2001), Faltinsen (1993), entre outros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados das características hidrostáticas principais

A Tabela 2 mostra as características (parâmetros) hidrostáticas principais dos casos de estudo avaliados, assim como os coeficientes hidrostáticos. O caso 2 possui um maior coeficiente de bloco (C_b) dentre todos os casos de estudo. Porém, o caso 4 possui o maior valor de GM_t, fazendo com que este caso seja um candidato a apresentar maior estabilidade transversal dentre os analisados. O caso 4 também possui os menores valores de TP_C e MT_c. Quanto menor o valor de toneladas por centímetro da embarcação, e menor o valor do momento para trimar 1 cm, mais estável seria esta embarcação, o que ocorre no caso 4 de estudo.

Tabela 2. Características hidrostáticas e parâmetros hidrostáticos dos casos de estudo, avaliados nas linhas d'água das barcaças.

Características hidrostáticas principais					
	Caso Padrão	**Caso 1**	**Caso 2**	**Caso 3**	**Caso 4**
Δ	4567	4859	5059	4358	4105
BM_t	13,21	12,65	12,33	13,63	14,22
GM_t	14,85	14,27	13,93	15,29	15,91
LCB	40,47	40,46	40,46	40,49	40,48
TP_c	16,41	16,73	16,97	16,17	15,89
MT_c	101,58	107,50	112,20	97,08	92,09
Coeficientes hidrostáticos					
	Caso Padrão	**Caso 1**	**Caso 2**	**Caso 3**	**Caso 4**
C_b	0,886	0,924	0,949	0,858	0,823
C_m	1	1	1	1	1
C_p	0,886	0,924	0,949	0,858	0,823
C_{wp}	1	0,999	1	0,999	1
$C_{L/\Delta}$	4,711	4,708	4,707	4,716	4,727

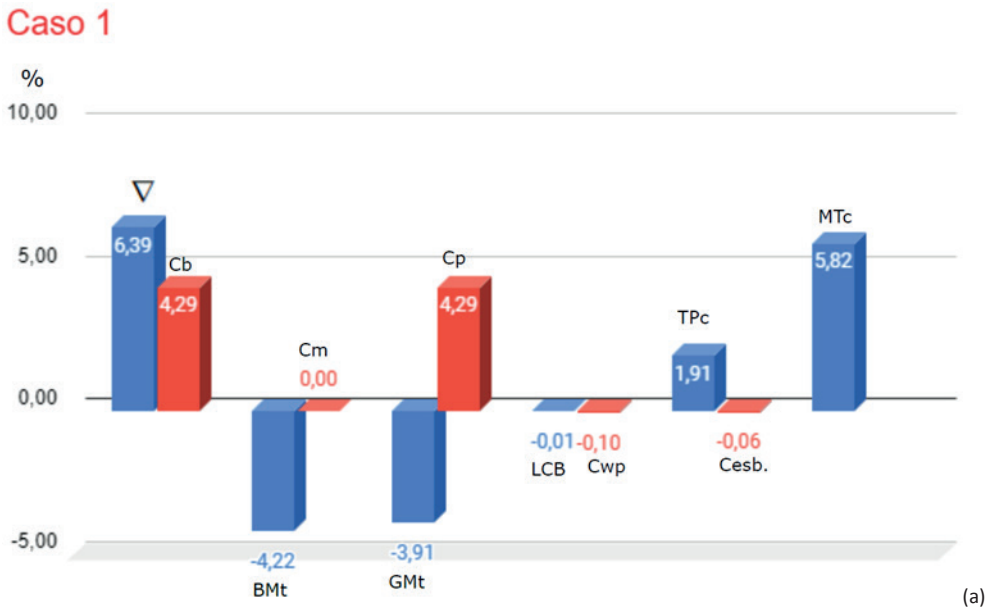
Fonte: Elaboração própria.

Para quantificar a variação dos parâmetros hidrostáticos com relação ao caso padrão, foi considerada a porcentagem de variação (%v) como *%v* = (*VR*-*VN*/*VR*)*100, sendo *VR* o

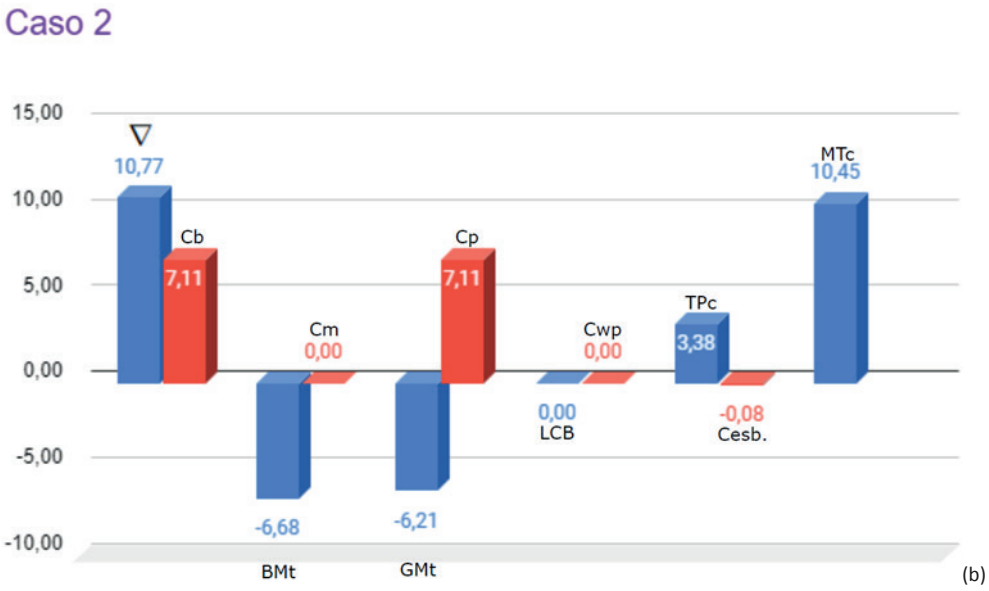
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

valor de referência (caso padrão) e *VN* o valor novo (caso com variação da inclinação do casco). Os resultados são apresentados na Figura 4. Pode-se observar que alguns parâmetros variam de maneira positiva ou negativa com relação ao caso padrão, considerando se o ângulo de inclinação da proa e da popa do casco é maior ou menor ao de referência.

Figura 4. Gráficos de barras, representando o erro de cada característica hidrostáticas estudada, para cada caso de estudo. (a) Caso 1. (b) Caso 2. (c) Caso 3. (d) Caso 4.

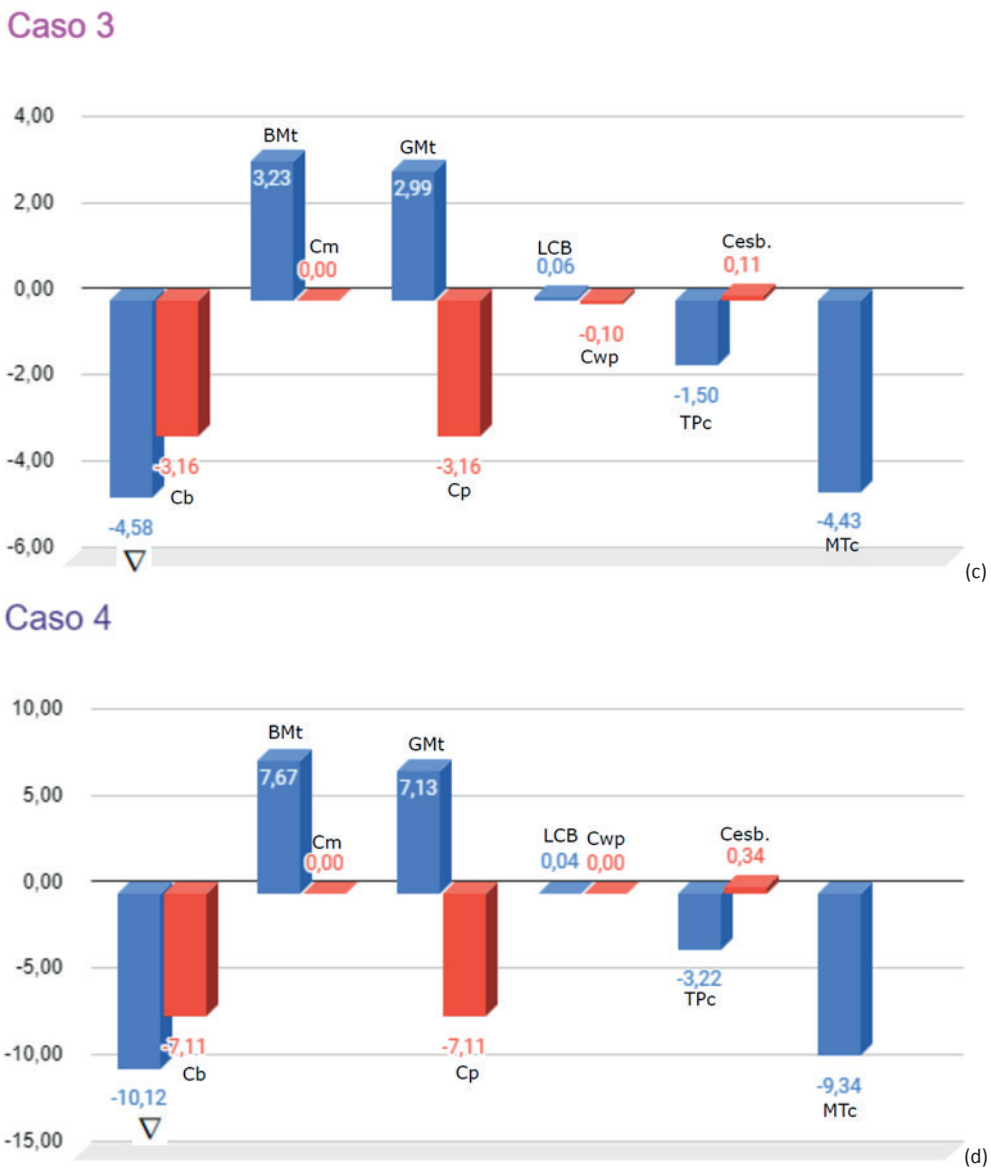


(a)



(b)

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br



Fonte: Elaboração própria.

Resultados de resistência ao avanço

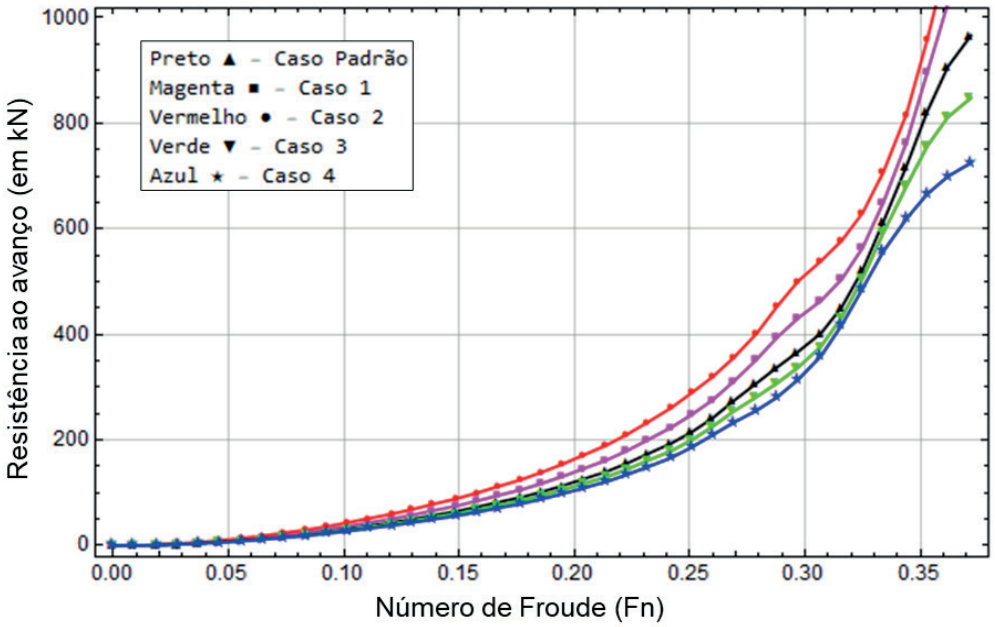
A Figura 5 mostra a comparação dos resultados de resistência ao avanço para os diferentes casos de estudo. O eixo vertical é representativo da resistência ao avanço (em kilonewtons, kN), enquanto o eixo horizontal representa o número adimensional de *Froude* (*Fn*) variando de 0 a 0,372. Para a presente barcaça, esta faixa de *Fn* corresponde ao regime de deslocamento, segundo a definição de Faltinsen (2005).

A partir dos resultados mostrados, é evidente que a mudança na forma do casco tem contribuição na resistência ao avanço para diferentes velocidades. Nota-se que com o presente método, as magnitudes da resistência ao avanço começam a se diferenciar a partir de *Fn* = 0,05, ou seja, a uma velocidade de operação de *v* = 2,78 nós (~1,43 m/s). Entre os casos 1 e 2, mesmo os dois tendo por resultado o aumento da resistência ao avanço, no caso 2 o aumento é mais abrupto com variações e médias maiores. Os casos 2 e 4

apresentaram a maior e menor resistência ao avanço em comparação com o caso padrão, respectivamente. Portanto, o caso 4 poderia ser considerado como o caso de estudo mais eficaz, considerando o método utilizado.

É importante mencionar que os resultados mostrados são para o regime de deslocamento e que foram calculados para uma barcaça autopropulsada, considerando apenas o formato do casco sem o empurrador. Embora o método de *Holtrop* seja um método baseado em um modelo de regressão obtido a partir de dados experimentais, sugere-se que, para estudos mais detalhados que considerem o acoplamento do empurrador e apêndices, análises com métodos de fluidodinâmica computacional, incluindo a validação experimental, sejam realizadas. Procedimentos similares deverão ser seguidos para estimativas mais adequadas de potência requerida usando dados de resistência ao avanço. É importante que o usuário selecione o método adequado, segundo os modos de operação das embarcações (ver manual do software para maiores esclarecimentos com relação à aplicabilidade de cada método disponível).

Figura 5. Comparação dos resultados de resistência ao avanço utilizando o método de *Holtrop*.



Fonte: Elaboração própria.

Resultados do comportamento em ondas

A Figura 6 mostra os gráficos *RAO* que apresentam as respostas do movimento de *heave* das barcaças do caso padrão e dos casos de estudo 1-4. No eixo horizontal são mostradas as frequências de encontro das ondas regulares com a embarcação (em rad/s). No eixo vertical é mostrado o deslocamento de translação de *heave* em forma adimensional (m/m). O deslocamento é dado em m/m devido à teoria linear considerada no uso do escoamento potencial. Ou seja, o deslocamento é dado por amplitude unitária da onda.

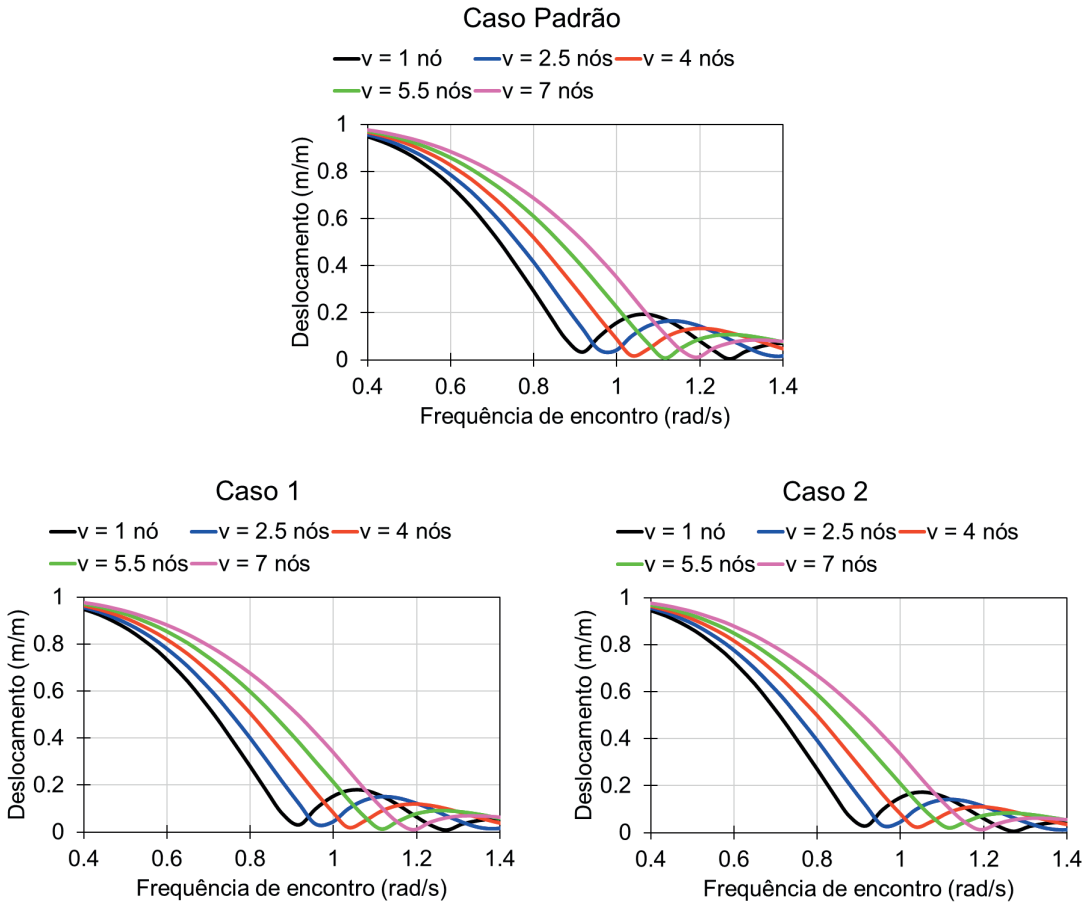
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Por exemplo, um valor de 1 m/m corresponderia a 1 m de deslocamento de *heave* devido a uma onda de 1 m de amplitude. Por outro lado, um valor de 0,5 m/m corresponde a um deslocamento de *heave* de 0,5 m causado por uma onda de 1 m.

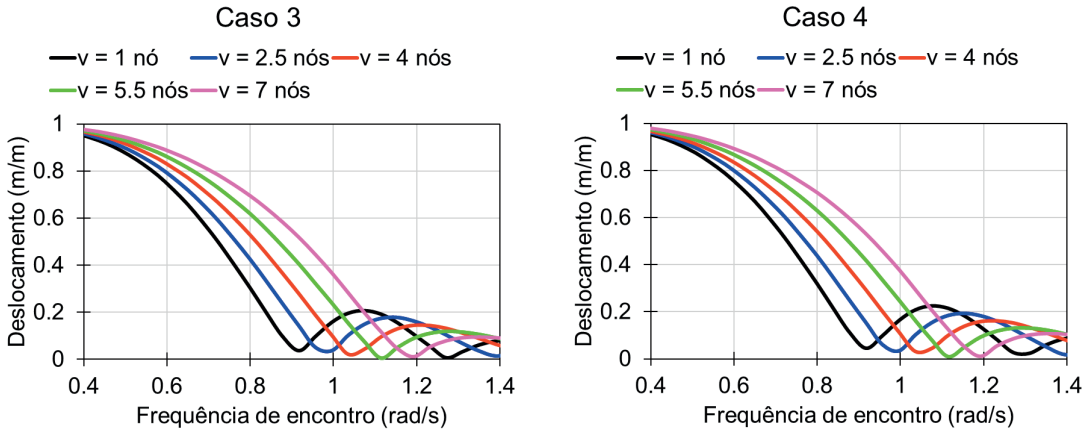
Nos gráficos *RAO* apresentados na Figura 6 não existem mudanças significativas entre a tendências das curvas para os cinco casos de estudo, mas sim para as diferentes velocidades de avanço. A variação da inclinação da proa e popa do casco tem pouco efeito com relação à amplificação dos deslocamentos de *heave*. Nota-se que em ondas longas (menores frequência de encontro), as respostas da barcaça seguem o movimento da onda (frequência de encontro próxima a 0,4 rad/s). Por outro lado, os deslocamentos atingem o mínimo entre 0,8 – 1,0 rad/s. Este efeito pode ocorrer em uma situação em que o comprimento das ondas seja menor do que o comprimento da embarcação, causando compensação de carregamentos, ou seja, sem causar movimento na embarcação. Em frequências maiores do que 1,2 rad/s as respostas de *heave* para todas as velocidades se mantém menores do que 0,2 m/m.

Os casos de estudo 1 e 2 se destacaram, na análise das 5 velocidades, como os casos que obtiveram as menores variações de amplitude significativa de *heave*. Por exemplo, operando com velocidade de 1 nó, os casos 1 e 2 obtiveram uma diminuição de 1,63% e 2,63% em relação ao caso padrão, respectivamente.

Figura 6. Resposta em *heave* para o caso padrão, caso 1, caso 2, caso 3 e caso 4.



Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br



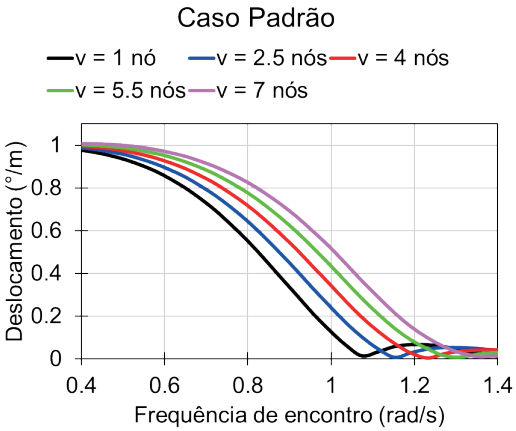
Fonte: Elaboração própria.

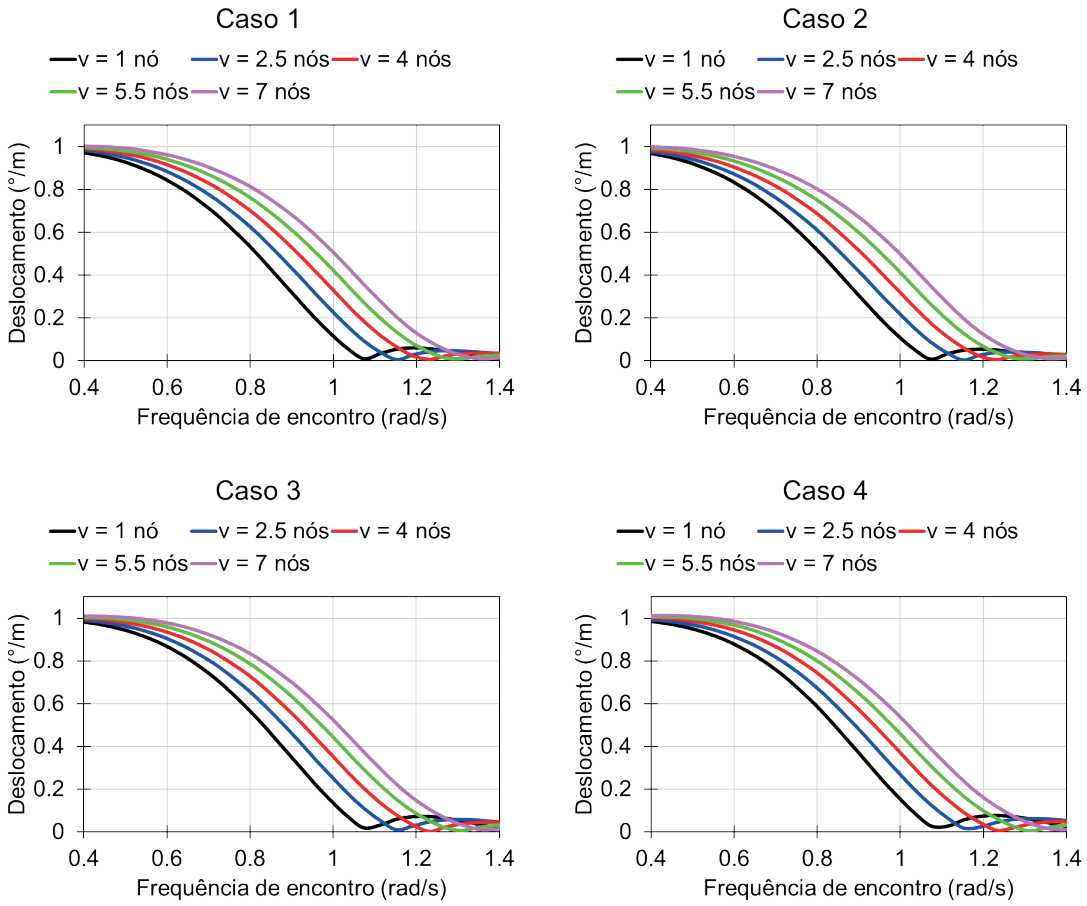
De maneira análoga ao movimento de *heave* mostrado na Figura 6, a Figura 7 mostra os gráficos *RAO* do movimento rotacional de *pitch*, dado de maneira adimensional em °/m. Ou seja, o deslocamento angular da embarcação, em graus (°), a partir da origem do sistema coordenado (localizado no centro de gravidade), para amplitude unitária de onda (ver manual do software para a descrição do sistema de coordenadas predeterminado).

Assim como observado no movimento de *heave*, é possível notar que a variação das inclinações da forma do casco pouco afeta os movimentos angulares da barcaça. No entanto, a mudança da velocidade de avanço tem contribuição significante nos deslocamentos angulares.

Na comparação dos gráficos *RAO* do movimento de *pitch* (Figura 7), os casos de estudo 1 e caso de estudo 2 se destacaram na análise das 5 velocidades como os casos que obtiveram as menores variações de amplitude. Por exemplo, operando a 2,5 nós o caso 1 obteve uma diminuição de 2,69% em relação ao caso padrão, enquanto o caso 2 obteve uma diminuição de 4,26% operando a 1 nó. Quanto maior a velocidade de operação, menores são as variações de amplitude significativa nos casos 1 e 2.

Figura 7. Resposta em *pitch* para o caso padrão, caso 1, caso 2, caso 3 e caso 4.





Fonte: Elaboração própria.

É importante mencionar que método da *Teoria das Faixas*, para avaliar os movimentos de embarcações, considera o escoamento como potencial, ou seja, considera o fluido como invíscido, irrotacional e incompressível. Além disso, o método é recomendado para ser utilizado em estruturas "alongadas". Embora o método disponível no software tenha sido comparado com alguns dados experimentais (ver manual), sugere-se, antes de qualquer implementação prática, validar (comparar) os resultados obtidos com alguns dados experimentais de embarcações do tipo barcaça. Desta maneira, poderá ser definida a faixa de aplicabilidade do método. Análises mais detalhadas, incluindo acoplamentos consideráveis de movimentos (exemplo: *heave*, *pitch* e *roll* juntos), podem ser feitos usando métodos *CFD*, tais como os disponíveis em OPENFOAM (JASAK *et al.*, 2007), ANSYS FLUENT (MATSSON, 2022) , STAR CCM+ (SIEMENS, 2017), etc. Os movimentos de estruturas "pouco alongadas" podem ser avaliados usando métodos *CFD* ou métodos de escoamento potencial tridimensional, incluindo os disponíveis em WAMIT (LEE, 1995), NEMOH (PENALBA; KELLY; RINGWOOD, 2017), ANSYS AQWA (ANSYS, 2013), entre outros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para contribuir com o desenvolvimento da Engenharia Naval na região amazônica é necessário promover o conhecimento técnico que permita desenvolver projetos de embarcações e outras estruturas navais mais eficientes e seguras. O presente trabalho apresentou um procedimento simplificado de análise comparativa de parâmetros hidrostáticos, de resistência ao avanço e de movimentos de uma barcaça de transporte de carga regional, que pode ser de utilidade em atividades de anteprojeto de embarcações regionais. No estudo comparativo, foi verificado, de maneira preliminar, que a variação da forma do casco pode contribuir no seu comportamento hidrodinâmico. No entanto, é importante salientar a necessidade de validar os resultados do software com medições obtidas em escala real ou reduzida. Análises hidrodinâmicas mais detalhadas podem ser feitas com software de fluidodinâmica computacional que considerem os efeitos da viscosidade d'água. Espera-se que o presente estudo, incluindo as considerações apresentadas, sirvam como material de apoio para análises paramétricas de diversas embarcações regionais, visando obter parâmetros preliminares de projeto.

Agradecimentos

A pesquisa desenvolvida foi parcialmente apoiada pela 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 – CT&I Áreas Prioritárias.

J.A.L.S.J. agradece o suporte proporcionado pelo programa de iniciação científica PAIC/FAPEAM (Edição 2021-2022). J. V. H. F. agradece o suporte proporcionado por GPA/UEA (Portaria N° 086/2021-GR/UEA). Agradecimentos especiais são para a empresa *Bentley Systems*® pela licença acadêmica do software *Maxsurf*.

REFERÊNCIAS

ABRAMOWICZ-GERIGK, T.; BURCIU, Z.; JACHOWSKI, J. An innovative steering system for a river push barge operated in environmentally sensitive areas. **Polish Maritime Research**, 2017.

ANSYS, A. AQWA theory manual. **ed. Canonsburg, PA 15317, USA**, 2013.

BASSO, E. D. **Análise do potencial econômico da padronização de uma barcaça para navegação interior**. Trabalho de Conclusão de Curso—Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

DHAVALIKAR, S.; NEGI, A.; DOSHI, R. **Stability and motion analysis for barges**. National Conference on Computer Aided Modelling and Simulation in Computational Mechanics. **Anais**...CAMSCM 09, North Eastern Regional Institute of Science and Technology …, 2009.

FALTINSEN, O. **Sea loads on ships and offshore structures**. [s.l.] Cambridge university press, 1993. v. 1

FALTINSEN, O. M. **Hydrodynamics of high-speed marine vehicles**. [s.l.] Cambridge university press, 2005.

HOLTROP, J. Statistical data for the extrapolation of model performance tests. **International Shipbuilding Progress**, v. 25, n. 588, 1978.

HOLTROP, J.; MENNEN, G. A statistical power prediction method. **International shipbuilding progress**, v. 25, n. 290, 1978.

JASAK, H. et al. **OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations**. International workshop on coupled methods in numerical dynamics. **Anais**...IUC Dubrovnik Croatia, 2007.

JOURNÉE, J. M.; MASSIE, W. W. Offshore hydromechanics. **TUDelft, Lecture Notes**, 2001.

KWON, C. S.; YEON, S. M. Optimization of slope angles of a barge-shaped FPSO from the towing stability and load perspective. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 13, p. 786–793, 2021.

LARSEN, H. T. S. **Análise do comportamento de um navio utilizando a teoria das faixas**. Dissertação de Mestrado—Lisboa, Portugal: Universidade Nova de Lisboa, 2012.

LEE, B. S. **Hydrostatics and Stability of Marine Vehicles**. [s.l.] Springer, 2019.

LEE, C.-H. **WAMIT theory manual**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering, 1995.

LLAUCA, W. R. H. **Estudio experimental de resistencia al avance en barcazas menores**. Trabalho de Conclusão de Curso—Valdivia, Chile: Univesidad Austral de Chile, 2018.

MATSSON, J. E. **An Introduction to ANSYS Fluent 2022**. [s.l.] Sdc Publications, 2022.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship resistance and propulsion**. [s.l.] Cambridge university press, 2017.

OBREJA, D. **Experimental model resistance tests on a gas carrier barge**. Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati Fascicle XI - Shipbuilding. ISSN 1221-4620. **Anais**... Galati, Romania: 2013.

PENALBA, M.; KELLY, T.; RINGWOOD, J. Using NEMOH for modelling wave energy converters: A comparative study with WAMIT. 2017.

PURWANA, A.; HUSODO, A. W. Total Resistance Prediction of Self Propelled Coal Barge (SPCB) Using Computational Fluid Dynamic. **Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan**, v. 12, n. 2, p. 97–105, 2015.

SALVESEN, N.; TUCK, E.; FALTINSEN, O. Ship motions and sea loads. **The Society of Naval Architects and Marine Engineers**, 1970.

SIEMENS, P. Simcenter STAR-CCM. **Academic Research, Release**, v. 12, 2017.

SKUPIEŃ, E.; PROKOPOWICZ, J. Methods of calculating ship resistance on limited waterways. **polish maritime research**, n. 4, p. 12–17, 2014.

TABACZEK, T.; KULCZYK, J.; ZAWIŚLAK, M. Analysis of hull resistance of pushed barges in shallow water. **Polish Maritime Research**, v. 14, n. 1 (51), p. 10–15, 2007.

07

Fabricação de embarcação de pequeno porte com aproveitamento de recursos naturais renováveis

Vitor Hugo Chaves de Lemos
Universidade Federal do Pará - UFPA

Douglas Santos Silva
Instituto Militar de Engenharia - IME

Roberto Tetsuo Fujiyama
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221010572

RESUMO

Objetivo: Este trabalho tem o objetivo de avaliar a construção e a viabilidade técnica da utilização de madeira e fibras naturais, como estrutura e reforço na utilização de cascos e elementos estruturais de pequenas embarcações em comparação aos cascos atualmente construídos, em laminado de fibras sintéticas. **Métodos:** Foi apresentada em etapas, a construção de uma embarcação de pequeno porte, com materiais compósitos de matriz poliéster, compensado naval, fibras de juta e fibras de miriti, sendo estes últimos de fontes de materiais renováveis, baixo consumo e abundantes na natureza. Foram utilizados os programas computacionais RHINOCEROS 5.0 e HECSALV Ship Project 7.8.0.9, o primeiro para o desenvolvimento de geometrias tridimensionais e o segundo para a determinação das curvas de estabilidade da embarcação. O casco teve os reforços transversais (cavernas) de compensado naval e longitudinais chapeamento de tiras de miriti e laminado manual de tecido de juta com resina poliéster tereftálica. **Resultados:** O casco foi concebido como casco duplo com inserção de garrafas PET entre os dois, aumentando a reserva de flutuabilidade e tendo sido obtido um equilíbrio estável para baixos centros de gravidade, mesmo em grandes graus de inclinação da embarcação. O custo final ficou reduzido em 48% e a capacidade de carga da embarcação aumentada em 33,33% que uma embarcação comercial do mesmo porte. **Conclusão:** O método de fabricação proposto para a embarcação mostrou-se viável e atendeu aos padrões comerciais, sendo possível ainda converter o protótipo para embarcações maiores, mantendo o baixo custo.

Palavras-chave: Embarcação, Fibras Naturais, Ecodesign, Laminação Manual.

INTRODUÇÃO

Há 500 anos, os portugueses (Lusitanos) possuíam sua própria técnica naval. E ao chegarem aqui, os índios já utilizavam canoas como principal meio de transporte. Com isso, os lusitanos trataram de capacitar mão-de-obra nativa para construir as embarcações, porém o modelo europeu não era adequado ao meio amazônico. O tipo de barco a vela, não era a forma certa de obter propulsão, pois além de não haver ventos com intensidade suficiente na região, o casco precisava ser mais largo para cortar ondas grandes e vencer as intempéries (LEMOS, 2017).

O Brasil por sua localização geográfica, por sua extensa costa marítima e por sua abundância em madeira, logo se tornou escala para suporte às grandes navegações portuguesas. Em Salvador, na Bahia, no momento em que era capital do Brasil, foi criado o primeiro estaleiro de reparos navais, chamado de “Ribeira das Naus”. Em sua obra, (BOTTINELLY, 1990), diz que o primeiro tipo de canoa adaptada pelos colonizadores, denominada “canoa de obra” era uma adaptação dos batéus portugueses. Os mestres de obras caboclos receberam dos portugueses a iniciação na arte da construção naval formal, no entanto, através dos anos desenvolveram e aperfeiçoaram as condições amazônicas.

Nos últimos anos, os construtores de barcos têm passado por uma série de desafios para minimizar o consumo de materiais, reduzir a quantidade de horas de construção e principalmente introduzir novos materiais que reúnam, em boa parte, as características mecânicas já conhecidas.

Conforme (MANZINI e VEZZOLI, 2005), o ecodesign é um modelo ‘projetual’ ou de projeto (design), orientado por critérios ecológicos. (KAZAZIAN, 2005) destaca que, mesmo com aplicação de critérios ecológicos no desenvolvimento de produtos, não existe um produto totalmente ecológico, pois qualquer processo produzirá algum tipo de impacto. Assim, segundo o autor, o ecodesign seria uma abordagem de melhoria contínua, que visa um ciclo de fluxos, de sinergias de atores.

Por meio do ecodesign é possível repensar os produtos, considerando requisitos ecológicos, adoção de melhorias técnicas disponíveis e produção limpa (economia de energia e matérias-primas, preservação da biodiversidade, minimização de resíduos, utilização de tecnologias limpas, uso de combustíveis renováveis, etc.). Assim, o ecodesign pode ser um fator diferencial do produto, como também um atributo de qualidade deste produto, o que requer a consideração de alguns princípios, aplicados nas etapas do ciclo de vida de um produto (pré-produção, produção, distribuição, uso, descarte), de modo a prever e prevenir o potencial de agressividade ao meio ambiente (BREZET e HEMEL, 1997; KINDLEIN JR. *et al.*, 2004; MANZINI e VEZZOLI, 2005 apud SANTOS, 2011).

O ecodesign é exatamente a expressão sucinta desses princípios e consiste em projetar ou conceber produtos de forma mais ecológica possível. Representa a consolidação da cultura da racionalidade numa empresa, que passa a gerar produtos concebidos à luz da ecoeficiência, da adoção de tecnologias limpas e da prevenção à geração de resíduos. Portanto, o ecodesign assegura que um produto seja proveniente do uso mais racional possível de energia, de água e matérias-primas, e pode incluir até estudos sobre biodegradação e(ou) reciclagem de resíduos de processos de produção e de produtos em fim de vida (NAVEIRO *et al.*, 2005).

Neste sentido, apresentou-se neste trabalho uma opção para o desenvolvimento e construção de uma embarcação de pequeno porte, duplo casco, sem convés (boca aberta), com a aplicação de compensado naval no cavername e anteparas, fibra de juta (*Corchorus capsularis*) na laminação, em substituição à fibra de vidro, garrafas PET como associado de flutuação entre os cascos, resina de poliéster terefitálico e tiras naturais de miriti (*Mauritia flexuosa*) como chapeamento duplo de fundo, proa e costado, demonstrando a confiabilidade, durabilidade, facilidade no manuseio do material, leveza como um todo e principalmente um menor custo em comparação com outros materiais compósitos conhecidos.

MATERIAIS

Compensado naval

O compensado naval foi adquirido no comércio de Belém-PA, em folhas de 2,2 x 1,6 m e 15 mm de espessura para a confecção das cavernas com cola das chapas à base fenólica, resistente à água.

As camadas foram coladas umas às outras cada uma com seu grão perpendicular às camadas adjacentes para maior força. Há geralmente um número ímpar de dobras, porque a simetria faz com que o placado seja menos propenso a “entortamentos”, e o grão nas superfícies exteriores segue sempre o mesmo sentido. As dobras são ligadas sob o calor e a pressão com colas fortes, geralmente com resina fenólica, fazendo da madeira compensada um tipo do material composto. O contraplacado é geralmente chamado de madeira original projetada.

Uma razão comum para usar a madeira compensada em vez da madeira lisa é sua resistência à rachadura, ao encolhimento, à torção, e ao seu alto nível de força. Esta substituiu muitos outros tipos de madeira em aplicações de construção por estas razões.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Fibras de miriti

Os talos (fibras) de miriti (*Mauritia flexuosa*) foram aplicados como chapeamento do costado e do fundo, tanto externo como interno da embarcação, dando seu formato. Estas fibras foram adquiridas no comércio local de Belém, oriundas de Abaetetuba-PA em talos de 1500 mm por 100 mm de diâmetro médio. Na Figura 1, tem-se a imagem do miriti usado no chapeamento da embarcação.

Figura 1. Tiras de miriti.



Fonte: LEMOS (2017).

Resina poliéster

A matriz utilizada no material compósito foi a resina poliéster tereftálica insaturada e pré-acelerada, fabricada pela Royal Polímeros com a denominação comercial de Denverpoly 754. O agente de cura utilizado foi o peróxido de MEK (Butanox M-50), na proporção de 0,33% (v/v), ambos foram adquiridos no comércio de Belém-PA.

Tecido de juta

O tecido de juta (*Corchorus capsularis*) aplicado como reforço no compósito para a fabricação de laminado, foi adquirido no comércio de Belém-PA, na forma de tecido nas dimensões de 1,5 m de largura e 10 m de comprimento. Na Figura 2, tem-se a ilustração do tecido de juta usado na fabricação do material compósito.

Figura 2. Tecido de juta usado na fabricação do material compósito.



Fonte: LEMOS (2017).

Material compósito para o casco da embarcação

Nesta pesquisa, foi adotado o método da laminação manual para fabricar o material compósito a ser usado no fundo, costado, popa e proa da embarcação, tanto no casco externo como no casco interno, aplicados sobre as tiras de miriti. As tiras de miriti foram montadas como chapas de ancoragem no casco da embarcação para o tecido de juta.

O material compósito produzido obedeceu aos procedimentos desenvolvidos por (SANTOS, 2015). Nesta pesquisa, foram usadas na fabricação dos laminados de três camadas a configuração tecido/tecido/tecido. Na Tabela 1, tem-se as propriedades mecânicas do material compósito pesquisado por (SANTOS, 2015).

Tabela 1. Propriedades mecânicas do material compósito tecido/tecido/tecido.

Tipo de Laminado	Força Máxima (kN)	Tensão na Força Máxima (MPa)	Deslocamento na Força Máxima (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Tecido/Tecido/Tecido	1,81 (± 0,11)	28,54 (± 1,78)	1,71 (± 0,13)	1,07 (± 0,29)

Fonte: Adaptado de SANTOS (2015).

A Tabela 2 descrimina o material utilizado por quantidade e suas respectivas unidades.

Tabela 2. Material quantificado e utilizado na embarcação.

Material	Quantidade	Unidade
Compensado (1600 x 2200 x 15 mm)	1	Folha
Miriti (1500 x 100 mm)	17	Vara
Tecido de Juta (1,5 x 10 m)	10	m
Resina Poliéster	10	L
Catalisador	2	Und
Garrafas PET 500 ml	80	Und

Fonte: LEMOS (2017).

MÉTODOS

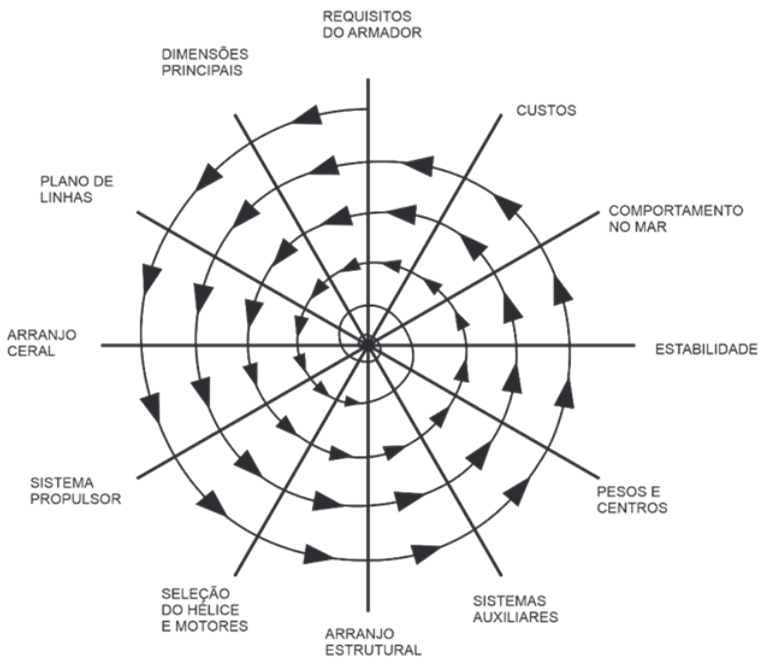
Concepção do projeto da embarcação

A concepção do projeto originou-se na opção de utilização de novos materiais na conformação do casco da embarcação sem degenerar sua resistência mecânica, tampouco sua estabilidade. A opção escolhida por compensado naval, madeira de miriti e manta de juta com resina de poliéster, pode perfeitamente ser acertada, principalmente em função do caráter renovável do material empregado. Contudo, há que se ter uma perfeita noção do emprego da embarcação para um encadeamento de raciocínio lógico para o desenvolvimento do projeto.

Segundo (OHANA, 2010), para que o projeto de uma embarcação tenha pleno sucesso, um procedimento muito utilizado a fim de guiar as principais etapas de um projeto de engenharia naval é o proposto pelo professor J. H. Evans do Instituto Tecnológico de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology – MIT) em 1959.

Dá-se a este procedimento o nome de Espiral de Projeto, que sugere uma metodologia não linear descrevendo os processos em sequência para cada área específica do projeto de uma embarcação. Esta metodologia não pode ser linear, uma vez que as mais importantes características de um projeto bem-sucedido são sua interatividade entre áreas afins e seu caráter progressivo de elaboração, sendo assim, para melhor guiar o projeto da embarcação proposta neste trabalho adotou-se a Espiral de Projeto da Figura 3. A observação da espiral de projeto indicará os requisitos necessários, as dimensões da embarcação, as linhas e curvas hidrostáticas, arranjo geral, arranjo estrutural, estabilidade e custos.

Figura 3. Espiral de Projeto.



Fonte: Os autores (2022).

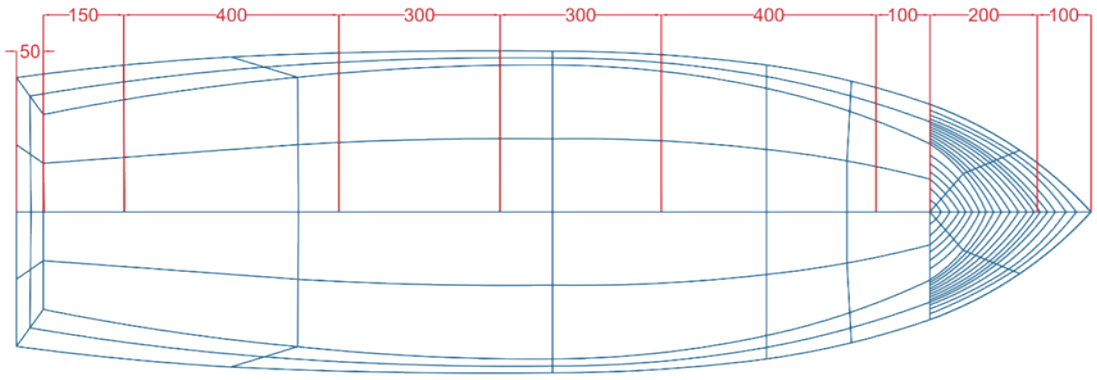
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Projeto da embarcação e avaliação da estabilidade

A embarcação foi projetada com a concepção de pequeno porte e “boca aberta” (sem convés), sem quilha (fundo chato) e duplo casco. Foram ainda, acrescentados 80 unidades de garrafas PET (Polietileno Tereftalato) entre dois cascos para reserva de flutuabilidade. Os dados gerais como desenho das cavernas, alinhamento destas com a linha de centro da embarcação, espaçamento entre as cavernas, foram concebidos na plataforma RHINOCEROS 5.0 que apresentou o formato do casco com as principais dimensões como: comprimento total, boca máxima, pontal moldado, calado de projeto, área externa total do casco, volume moldado, capacidade de carga e quantidade de pessoas.

A Figura 4 ilustra o desenho esquemático do barco mostrando a vista superior da embarcação com o espaçamento entre as cavernas em mm.

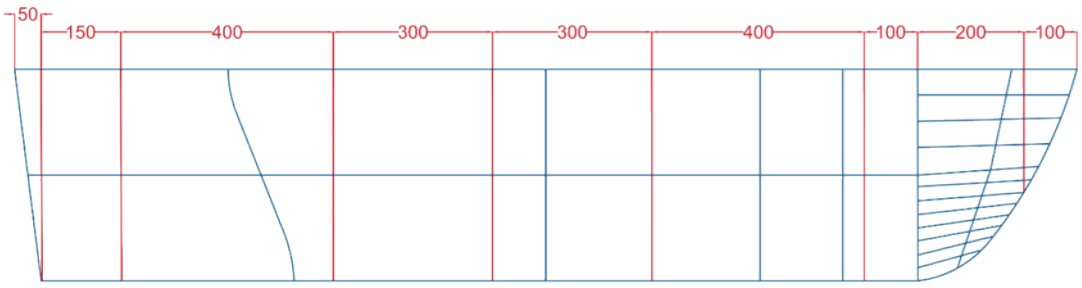
Figura 4. Desenho esquemático ilustrando a vista superior da embarcação.



Fonte: Os autores (2022).

Além do espaçamento entre as cavernas, delineou-se o formato da proa com as estruturas longitudinais finalizando até a roda de proa, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5. Desenho esquemático com vista lateral das longitudinais até a proa.



Fonte: Os autores (2022).

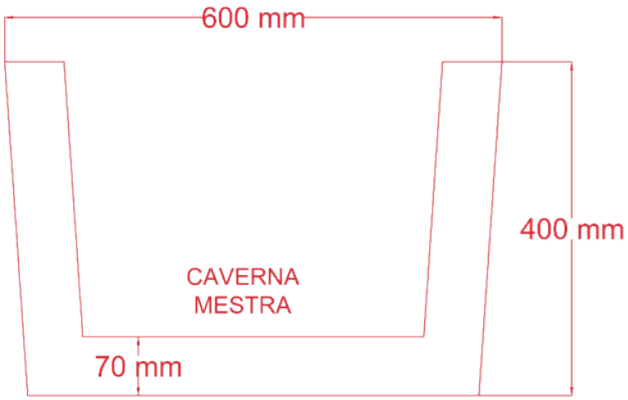
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Após o delineamento do casco, utilizou-se o programa HECSALV Ship Project 7.8.0.9., obtendo-se a entrada dos dados do programa RHINOCEROS 5.0, para avaliação de dados necessários para a análise de navios e outras estruturas marinhas flutuantes.

Desenho, corte das cavernas e alinhamento de montagem pela linha de centro (LC)

As cavernas foram cortadas em compensado naval de 15 mm de espessura, seguindo as orientações transversais da fibra em relação à linha de centro da embarcação, com o propósito de se evitar a delaminação. As cavernas foram numeradas e a numeração iniciou-se pela caverna 1, próximo a proa e seguiu-se até o número 8 no espelho da popa. A Figura 6 ilustra as medidas constantes da caverna mestra, havendo apenas diferença na largura destas para as outras cavernas.

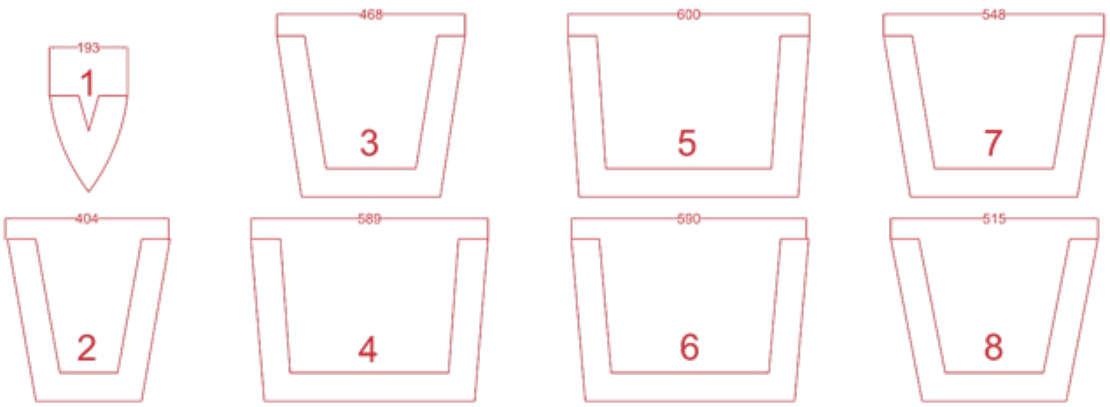
Figura 6. Medidas da caverna mestra.



Fonte: Os autores (2022).

Na Figura 7, tem-se a ilustração esquemática com as dimensões e numeração das cavernas, onde observa-se a numeração iniciando em 1 e finalizando em 8.

Figura 7. Ilustração esquemática com as dimensões e numeração das cavernas, onde observa-se a numeração iniciando em 1 e finalizando em 8.

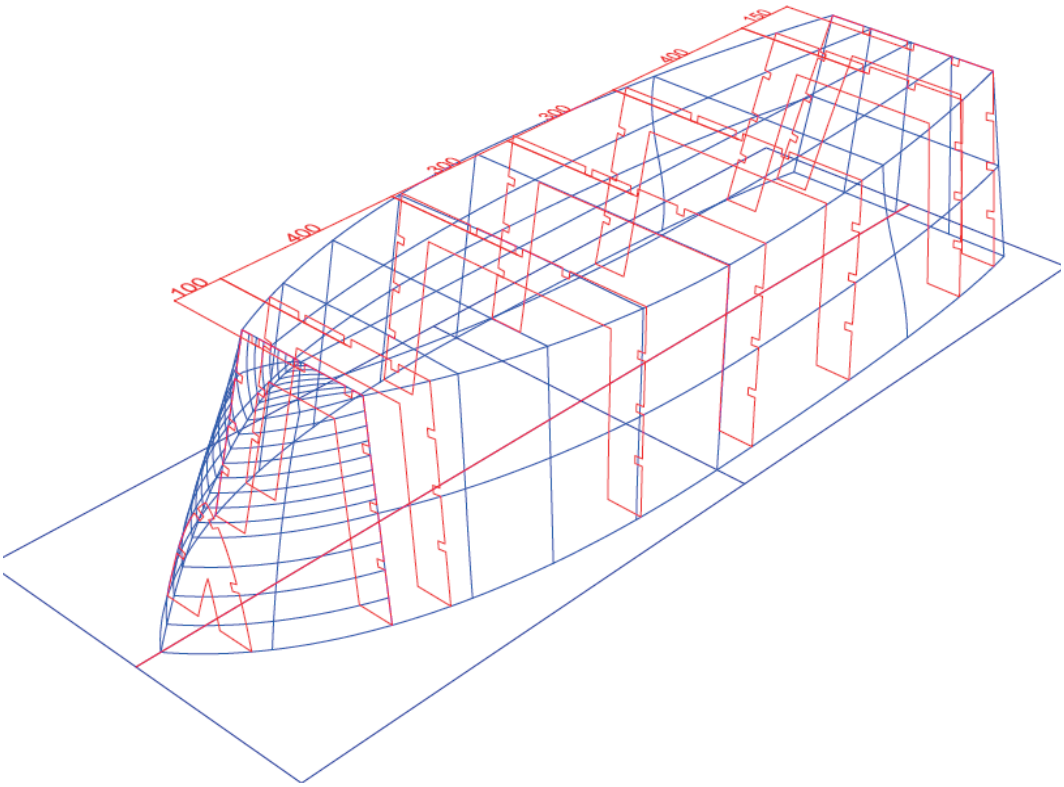


Fonte: Os autores (2022).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

O alinhamento para montagem das cavernas pela linha de centro é primordial para a simulação do formato do casco. As cavernas foram alinhadas da proa para a popa de ponta cabeça, da caverna 1 até a caverna 8, mantendo-se o espaçamento e alinhamento pela linha de centro, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8. Distribuição das cavernas ao longo da linha de centro.



Fonte: Os autores (2022).

Etapas de montagem e fabricação do casco

A embarcação foi construída em casco duplo de boca aberta e fundo chato, com inserção de garrafas PET (Polietileno Tereftalato) entre os dois cascos, tanto no costado como no fundo, como reserva de flutuabilidade. Uma descrição das etapas é apresentada a seguir:

Etapa 1: Corte dos perfis de compensado e das tiras de miriti

Inicialmente foram impressos em escala natural os desenhos dos perfis da caverna conforme ilustrado na Figura 9. Esses desenhos foram colados na folha de compensado e depois com o auxílio de uma serra tico-tico manual foram efetuados os cortes seguindo as linhas de contorno do desenho dos perfis. O corte das tiras de miriti foi realizado em talos da planta de 65 à 90 mm de diâmetro e 1,3 e 1,9 m de altura. Buscou-se ter uniformidade nas dimensões das tiras e desta forma padronizou-se a utilização de réguas (tiras) de 53 à 90 mm de largura e 7 à 9 mm de espessura.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 9. Perfis de compensado naval e das tiras de miriti.



Fonte: LEMOS (2017).

Etapa 2: Alinhamento dos perfis da caverna

O alinhamento das cavernas consistiu em distribuir de forma alinhada todas as cavernas ao longo de toda a extensão do comprimento do barco, tendo-se o cuidado em se traçar a linha de centro longitudinal da embarcação da popa até a proa, centralizando e aprumando as cavernas. O espaçamento entre as cavernas foi definido conforme o programa RHINOCEROS 5.0 e adotado na montagem. A Figura 10 ilustra o alinhamento dos perfis da caverna.

Figura 10. Alinhamento dos perfis da caverna.



Fonte: LEMOS (2017).

Etapa 3: Fixação das tiras de miriti para união das cavernas na face externa da embarcação - costado, do fundo e espelho da popa

De posse das tiras de miriti foi iniciado a fixação sendo a primeira tira fixada na altura da quilha e depois adicionado as tiras de miriti nas longitudinais do costado e fundo, "amarrando" todas as cavernas, tendo o cuidado de seguir a curvatura do casco como um todo. A colocação das tiras de miriti foi realizada até a caverna n° 7, já que a proa da embarcação necessita de uma etapa específica. A fixação das tiras de miriti foi feita com grampos de aço galvanizado, pregos e fitas dupla face no cavername. A fixação iniciou-se

primeiro na altura da quilha e após, colocação de tiras de miriti nas longitudinais do costado e fundo, “amarrando” todas as cavernas, seguindo assim a curvatura do casco como um todo. A Figura 11 ilustra a colocação das tiras de miriti.

Figura 11. Detalhe da colocação das tiras de miriti em (a) e em (b) a fixação das tiras de miriti no fundo e costado.



(a) (b)

Fonte: LEMOS (2017).

Etapa 4: Fixação das tiras de miriti para união das cavernas na face externa da embarcação – proa

Por se tratar de uma embarcação de pequeno porte, a proa da embarcação foi desenvolvida em pequena escala e foi tratada de forma específica, sendo traçada a linha de centro com uma linha de prumo com dois pesos nas extremidades. A partir da metade da largura do espelho da popa, foi assentado o prumo até a caverna 8, início da estrutura da proa. Esta etapa é importante, pois se tem o alinhamento do casco com a roda de proa que terá sua curvatura de acordo com o projeto. A Figura 12 ilustra o detalhe das talas de miriti (5 mm x 5 mm) na confecção da proa.

Figura 12. Detalhe das talas em (a) miriti (5 mm x 5 mm) na confecção da proa no sentido longitudinal e em (b) talas de miriti no sentido ortogonal.



(a) (b)

Fonte: LEMOS (2017).

Para a conformação da proa, foram cortadas tiras de miriti com espessura de 2 mm, conferindo excelente flexibilidade para a curvatura e contornos da proa e roda de proa. As tiras de miriti foram fixadas em sentido ortogonal ao das tiras do costado com grampos de aço galvanizado. Assim, pode-se criar uma boa ancoragem para a futura laminação. A Figura 13 mostra o detalhe das tiras de miriti montadas na proa.

Figura 13. Detalhe das tiras de miriti em (a) montadas na proa e em (b) conformando a roda de proa.



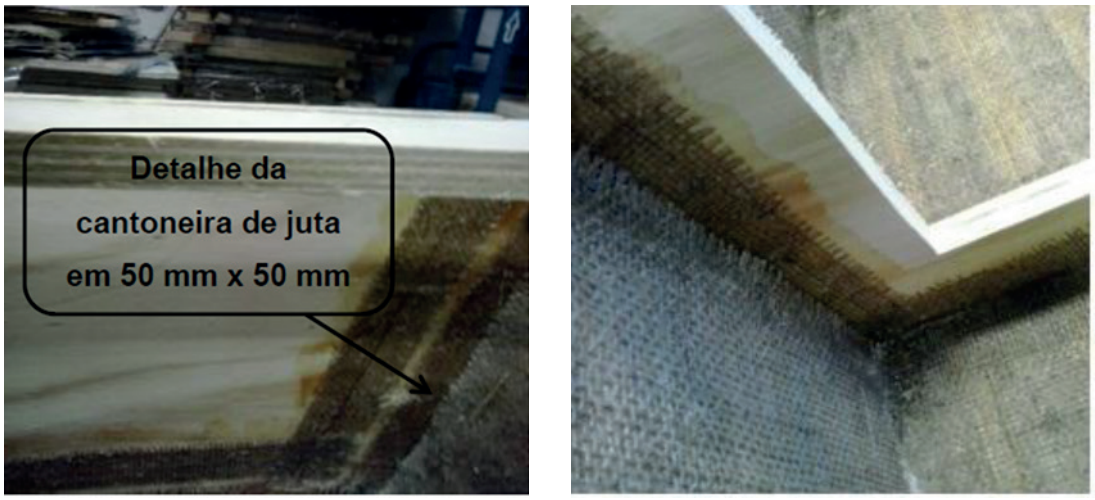
(a) (b)

Fonte: LEMOS (2017).

Etapa 5: Corte do tecido de juta e laminação de cantoneiras em "L" de material compósito na superfície interna da embarcação

Iniciou-se o processo de reforço das cavernas às tiras de miriti do costado, do fundo e espelho da popa. O reforço foi realizado com a laminação da fibra de juta com a resina de poliéster terefitálico com catalisador MEK (Butanox M-50), nas dimensões dos braços das cavernas de compensado naval, se estendendo às tiras de miriti do costado, do fundo e espelho da popa. Nesta etapa, o tecido de juta foi cortado de forma a apresentar largura de 100 mm, uma vez que esses tecidos seriam aplicados nas uniões miriti/compensado, formalizando uma cantoneira com lado de 50 mm de comprimento. A Figura 14 ilustra o detalhe da cantoneira gerada quando uma lâmina de tecido de juta foi colada na junção do miriti e compensado.

Figura 14. Detalhe das cantoneiras em (a) em "L" do tecido de juta e em (b) reforço das cavernas com o fundo e costado com fibra de juta.



(a) (b)

Fonte: LEMOS (2017).

Etapa 6: Corte do tecido de juta e laminação do material compósito na superfície externa da embarcação

Um molde feito de papel jornal foi usado para orientar o corte do tecido de juta. Este molde de papel era tal que apresentava cobertura de toda a área da superfície externa da embarcação. Depois do corte o tecido foi aplicado na superfície externa do barco e iniciou-se a laminação manual com o uso da matriz poliéster. O tecido de juta de recobrimento do fundo foi feito em uma única tiragem, havendo *over lap* apenas na junção com o tecido do costado. Na Figura 15, tem-se a ilustração do fundo da embarcação após a laminação do tecido de juta no fundo da embarcação.

Figura 15. Fundo da embarcação após a laminação do tecido de juta.



Fonte: LEMOS (2017).

Etapa 7: Corte do tecido de juta e laminação do material compósito na superfície interna do casco externo da embarcação

Após a conformação do casco, fundo, espelho da popa e da proa, iniciou-se a laminação interna com o tecido de juta e resina poliéster, adotando-se o sistema manual com a aplicação da resina com pincel, rolo de lã e rolo de metal. As mantas de juta foram cortadas na secção transversal entre os espaçamentos de cada caverna desde o topo do costado de um bordo, cobrindo o fundo e seguindo até o topo do costado do bordo contrário, evitando-se ao máximo o over lap (superposição no encontro de dois tecidos no processo de laminação manual). Este efeito ocorreu apenas onde já havia sido aplicadas as uniões de manta de juta e resina em "L" das junções das cavernas e tiras de miriti de fundo e costado. Na Figura 16, tem-se a ilustração da região interna do casco externo antes e depois de laminado o tecido de juta.

Figura 16. Região interna do casco externo em (a) antes da laminação e em (b) depois de laminado o tecido de juta.



(a) (b)

Fonte: LEMOS (2017).

Etapa 8: Inserção do banco de apoio ao navegador, inserção das garrafas PET no espaço entre o duplo casco e fixação das tiras de miriti para união das cavernas na face interna da embarcação

Antes de iniciar a montagem do segundo casco, esperou-se a cura do material compósito por 3 dias. O segundo casco foi moldado em tiras de miriti na parte interna, porém antes, introduzido entre os cascos, 80 unidades de garrafas PET (Polietileno Tereftalato) tampadas, de 500 ml, na qual foram encaixadas lado a lado sem ancoragem entre elas ou com o casco. Estas garrafas exercem um papel importante de reserva de flutuabilidade, posto que em qualquer tipo de avaria do casco externo, por exemplo: colisão com trocos submersos, bancos de areia e outros, onde haja entrada de água, estas funcionarão como pequenos tanques de flutuação, garantindo a navegabilidade com certa segurança. Desta forma, a altura das cavernas (hastilha) foi propositalmente alterada para 70 mm, acima do

diâmetro das garrafas PET de 60 mm, a fim de acondicioná-las, deitadas, tanto no fundo como no costado da embarcação. Na Figura 17, tem-se a forma como foram inseridos o banco de apoio ao navegador, as garrafas PET e o miriti na caverna, gerando o casco interno da embarcação.

Figura 17. Forma como foram inseridos o banco de apoio ao navegador, as garrafas PET e o miriti na caverna.



Fonte: LEMOS (2017).

Tendo sido cortadas as tiras de miriti no formato interno do casco, procurou-se preencher todo seu contorno, seguindo a altura das cavernas. Desta forma, o desenho interno das cavernas deu o formato do costado e fundo internos. Note-se que nesta fase, optou-se em montar um banco do operador e antepara de separação da proa (caverna alta) com o resto do casco, conferindo melhor estanqueidade.

Etapa 9: Corte do tecido de juta para a laminação do material compósito na face interna da embarcação

A etapa final constou da laminação interna das tiras de miriti no costado e fundo, tendo-se o cuidado de executar o fechamento do duplo casco na parte superior integrando-o como um todo. As etapas da laminação do tecido de juta na face interna e do fundo da embarcação podem ser vistas na Figura 18.

Figura 18. Detalhe da laminação em (a) laminação do segundo casco interno, (b) laminação do costado do segundo casco e em (c) laminação do fundo do casco interno.



(a) (b) (c)

Fonte: LEMOS (2017).

A embarcação finalizada contém 2 m de comprimento, 70 cm de largura e um pontal (altura) em torno de 60 cm. Na Figura 19, tem-se a embarcação desenvolvida finalizada.

Figura 19. Embarcação desenvolvida finalizada.



Fonte: MORAES (2018).

RESULTADOS

Normalmente, para a construção de embarcações de pequeno porte (esporte e recreio), existem inúmeras opções, embora dentre todas, as construídas com mantas de fibras de vidro sejam as mais usadas. Considerando a tecnologia empregada atualmente na sua fabricação, tornam-se cada vez mais baratas e acessíveis. Contudo, na hora de se decidir a respeito de determinado tipo de material de construção, é comum considerar o projeto, tipo de construção e matérias-primas de uma forma global. Há que se considerar, contudo, o descarte na natureza e seus impactos ambientais. A Figura 20 mostra uma embarcação

de fibra de vidro, com mesmo porte da concebida no laboratório de materiais compósitos da Universidade Federal do Pará.

Figura 20. Embarcação de esporte e recreio similar à concebida neste projeto.



Fonte: LEMOS (2017).

A concepção do projeto da embarcação de materiais compósitos com fibras de juta e miriti, visa principalmente dar uma nova opção de materiais mais baratos e de acordo com o ecodesign. A Tabela 3 apresenta uma comparação de características e preços entre a embarcação da Figura 20 e a embarcação fabricada neste projeto.

Tabela 3. Comparação de características e preços. * Não incluído mão-de-obra.

Características	Embarcação Comercial	Embarcação Protótipo
Ano de Fabricação	2017	2017
Marca	KARMARINE	GPMAC UFPA
Material Utilizado	Compensado naval, resina poliéster, gel coat	Compensado naval, resina poliéster, juta, miriti, garrafas pet
Comprimento Total (m)	2	2
Calado Projetado (m)	-	0,34
Calado (m)	0,4	0,4
Pontal (m)	0,4	0,6
Boca (m)	1	0,6
Quantidade de Pessoas	2	1
Peso da Embarcação (Kg)	30	33,4
Capacidade de Carga (Kg)	240	360
Custo Total (R$)	1.000,00	520,00

Fonte: LEMOS (2017).

DISCUSSÃO

Observa-se, que as embarcações apresentadas na Tabela 3 são similares em dimensões. O peso total da embarcação fabricada com fibras de juta e miriti mostrou ter seu peso aumentado em 10,18% quando comparado com a embarcação comercial. Dois pontos

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

positivos que merecem destaque são o custo final de fabricação e a capacidade de carga, que a embarcação projetada e construída, mostrou-se superior. O custo final ficou reduzido em 48% e a capacidade de carga da embarcação aumentada em 33,33%.

Segundo (NASSEH, 2008), o sucesso da utilização de materiais compósitos para fabricação de barcos é devido a um grande número de vantagens que esses materiais têm quando comparados a outros tipos. Uma das principais vantagens sobre materiais como aço e alumínio é a variedade de estrutura que pode ser conseguida combinando materiais básicos. Entretanto, a grande diferença em relação a outros tipos de materiais se deve a ortotropia, que significa que o material pode resistir de forma diferente quando submetido a cargas em diferentes direções. É possível, então, construir uma embarcação mais leve e resistente, colocando fibras apenas nas direções onde existam forças atuando.

(NASSEH, 2008), ainda complementa que as construções e embarcações em materiais compósitos não falham de uma hora para outra, a não ser em fortes impactos. O modo mais comum de falha é um decréscimo de propriedades mecânicas ao longo do tempo, devido à baixa qualidade de fabricação e dos materiais utilizados.

CONCLUSÃO

O método de fabricação proposto para a embarcação mostrou-se viável e a embarcação proposta no projeto atende aos padrões comerciais. A embarcação projetada e construída teve seu custo final reduzido em 48% e a capacidade de carga da embarcação aumentada em 33,33% que uma embarcação comercial do mesmo porte. O miriti e o compensado naval mostraram ser boas alternativas para a fabricação de embarcações do porte do projeto.

Nota-se, que os materiais compósitos possuem grandes vantagens quando comparados a outros produtos para a construção de embarcações. Como exemplo: excelente resistência e relativa rigidez para sua densidade, são fáceis de utilizar, são leves, fáceis de reparar, têm boa resistência à corrosão e às intempéries e ainda resistência à abrasão.

Vale ressaltar ainda que na maioria das Marinhas de Guerra do mundo, embarcações e navios utilizados na varredura e caça de minas aquáticas, tem seus cascos construídos em madeira e mais recentemente de materiais compósitos, haja vista que estes artefatos explosivos entram em atividade de detonação com a simples aproximação de navios com cascos de aço que, em navegação, alteram o campo magnético nas proximidades das minas e estas explodem dependendo da assinatura magnética registrada de cada navio. Desta forma, não detonarão com a aproximação de pequenas embarcações como pesca ou recreio e sim para navios maiores.

Considerando que o projeto previu a inserção de garrafas PET de 500 ml, houve um aumento das alturas das cavernas (hastilhas) e consequente redução do volume interno,

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

ou seja, espaço interno e maior peso. Esta condição pode ser melhorada com a inserção de garrafas PET de menor volume com consequente diminuição da altura das cavernas e maior espaço interno com diminuição de peso.

Sugere-se, nos próximos projetos de embarcações deste mesmo design, que se aumente a boca da embarcação para 1 metro, pelo menos. Assim, a cota metacêntrica aumenta e o raio metacêntrico se distancia do centro de gravidade como um todo, aumentando a estabilidade da embarcação mesmo com pesos maiores.

REFERÊNCIAS

BOTINELLY, T. **Amazônia: uma utopia possível**. Manaus: Imprensa Universitária, 1990. 189p.

BREZET, J.C. HEMEL, C.G. v. (1997). **Ecodesign: A promising approach to sustainable production and consumption**. UNEP, Paris.

KAZAZIAN, T. (org). **Haverá a idade das coisas leves: Design e desenvolvimento sustentável**, 2ª. Ed., São Paulo: SENAC, 2005.

KINDLEIN JUNIOR, W.; BRAUM, A. F.; GUANABARA, A. S. **Estudo da melhoria da sustentabilidade de projeto de novos produtos baseados na biônica**. In: Anais P&D Design, São Paulo, 2004.

LEMOS, V. H. C. **Construção de embarcações de pequeno porte com aproveitamento de recursos naturais renováveis**. 2017. 119f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Industrial) Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis – os requisitos ambientais dos produtos industriais**. Editora da Universidade de São Paulo – EDUSP, São Paulo, 2005.

MORAES, A. **Um barco de fibra de juta e miriti**. Jornal Beira do Rio, 2018. Disponível em: <https://beiradorio.ufpa.br/index.php/nesta-edicao/246-um-barco-de-fibra-de-juta-e-miriti>. Acesso em: 30/10/2022.

NASSEH, J. **Técnica e prática de laminação em composites**. Rio de Janeiro. 2008.

NAVEIRO, R. M.; PACHECO, E. B. A. V.; MEDINA H. V. (2005) **Ecodesign: O desenvolvimento de projeto de produto orientado para reciclagem**. In: Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, 5 Anais... Porto Alegre: IGDP.

OHANA, G. **Desenvolvimento do projeto de uma embarcação do tipo late e aplicação do método de volumes finitos para predizer a resistência ao avanço**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará, 2010.

PROGRAMA COMPUTACIONAL HECSALV Ship Project 7.8.0.9 – **Desenvolvimento de curvas hidrostáticas e estabilidade de embarcações**.

PROGRAMA COMPUTACIONAL RHINOCEROS 5.0 – **Desenvolvimento de geometrias tridimensionais**.

SANTOS, A. S. **Gestão do design e sustentabilidade: um modelo de diagnóstico e a indústria da mobilidade urbana**. 2011. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Artes e Design, 2011.

SANTOS, J. E. M. **Placas laminadas de poliéster e fibras de juta em diferentes configurações**. 2015. 90f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Industrial) Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

08

Mapa batimétrico de assoreamento como apoio à navegação na Amazônia: caso no rio Tapajós/PA

Raimunda Josinete da Silva Loureiro Mácola
Universidade Federal do Pará - UFPA

Gilberto Loureiro Mácola
Universidade Federal do Pará - UFPA

Hito Braga de Moraes
Universidade Federal do Pará - UFPA

Maisa Sales Gama Tobias
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221111028

RESUMO

O artigo teve como objetivo descrever a morfologia do leito do rio Tapajós, compreender o padrão de assoreamento que ocorreu no canal de navegação, no trecho entre a cidade de Aveiro e a localidade de Fordlândia, com base em dados dos levantamentos batimétricos no ano de 2021. De igual modo, este estudo pretende avaliar a vazão sólida dos sedimentos em suspensão e a vazão liquida associada, medida com ADCP em agosto e outubro em Aveiro e Fordlândia. Para o efeito, elaborou-se o mapa batimétrico temático, com a identificação específica e sazonal dos pontos de assoreamento ao longo do ano. Aponta-se que se obteve mapas cartográficos por meio de levantamento batimétrico com equipamento monofeixe, em trecho compreendido entre o município de Aveiro e o distrito de Fordlândia, no Estado do Pará, sendo selecionados dois trechos, utilizando como referência as cartas náuticas da região e imagens de satélite, associados ao levantamento expedito nesses trechos. Foram produzidos novos mapas com a identificação dos subtrechos críticos, por períodos do ano, além de comparação com diversos casos de acidentes com embarcações e relatórios de escoamento da produção. Concluiu-se que, o trecho em estudo tende a ser estável no que se refere à profundidade e ao traçado do canal, ao se considerar a região de média e de cheia vazão, notou-se que há aumento da vazão líquida de aproximadamente 3000m³/s em Aveiro, já em Fordlândia esse valor cai para 1000 m³/s.

Palavras-chave: Batimetria, Navegação, Tapajós, Assoreamento, Mapeamento.

INTRODUÇÃO

O mercado tem se tornado cada vez mais competitivo, tanto o nacional como o internacional e para suprir tal demanda passou-se a requerer canais de acesso a bacias, berços de atracação e portos adequados à realidade (XIE *et al.,* 2018). Isso implica que é preciso ter canais mais largos e profundos a fim de propiciar que os mais variados tipos de embarcações possam circular livremente e sem problemas (YUILL *et al.,* 2016).

Além disso, as embarcações têm aumentado de tamanho e de calado, requerendo a adequação dos locais para que trafeguem adequadamente através das vias artificiais e aquáticas e se aproximem dos terminais portuários e dos portos (KHOSRONEJAD *et al.*, 2020). Isso é necessário para promover o embarque e o desembarque dos componentes que estão sendo transportados (NICHOLAS *et al.,* 2013).

Desse modo os rios são indispensáveis para o desenvolvimento de uma dada região (MANDLBURGER *et al.,* 2015). Esses locais contam com um papel ecológico relevante, contudo, existe a utilização antrópica intensa relacionada com a implantação de polos industriais, marinas, instalações portuárias, entre outras coisas. Soma-se a isso ainda outros tipos de modalidades relacionadas à aquicultura e a possibilidade de contar com um potencial recreativo e demais atividades nas regiões (ZHOU *et al.*, 2014; GUO *et al.,* 2014).

Luan *et al.* (2014) afirmam que conhecer a distribuição de sedimentos e da natureza presente no fundo dos rios é essencial para planejar os canais de acesso das áreas de despejo, marinas, portos, entre outras instalações. Para Maselli *et al.* (2018) o entendimento de tal questão é necessário, pois a segurança da navegação é completamente dependente da dinâmica sedimentar.

Além disso, efetuar operações de dragagem para desassorear um rio para propiciar os calados aos navios é algo complexo (YUILL *et al.,* 2015. YEPEZ *et al.,* 2018). Soma-se a isso ainda os custos de tal atividade que oneram o estado e os empreendimentos (HACKNEY *et al.,* 2017). A diminuição do calado operacional máximo é algo que impacta de modo direto as dimensões das embarcações que podem acessar o rio, podendo se tornar um grande problema em determinados casos (VOLP *et al.,* 2016; MAAB *et al.,* 2018).

De acordo com Santos *et al.* (2020) nas situações destacadas anteriormente os navios podem deixar de ser carregados devido à ausência de profundidade, algo que lhe obriga a deixar a seu ponto de partida com menos carga que o esperado. Para *Su et al.* (2017) tem-se ainda nesses casos a falta de equilíbrio na produtividade operacional, na formação de custos e da produtividade do porto, uma vez que se começa a requerer mais navios para promover a movimentação de um mesmo volume de carga.

Frente a esse cenário pode-se apontar que o sistema Tapajós é um dos principais corredores hidroviários que constituem um projeto denominado Arco Norte que interliga as regiões produtoras de milho e de soja para o exterior. Nesse caso os produtos são conduzidos para o porto através do rio Tapajós. Tal região tem experimentado então, nos últimos

anos, uma movimentação cargueira elevada, alterando a dinâmica de bancos de areia ao longo do rio (ANTAQ, 2018).

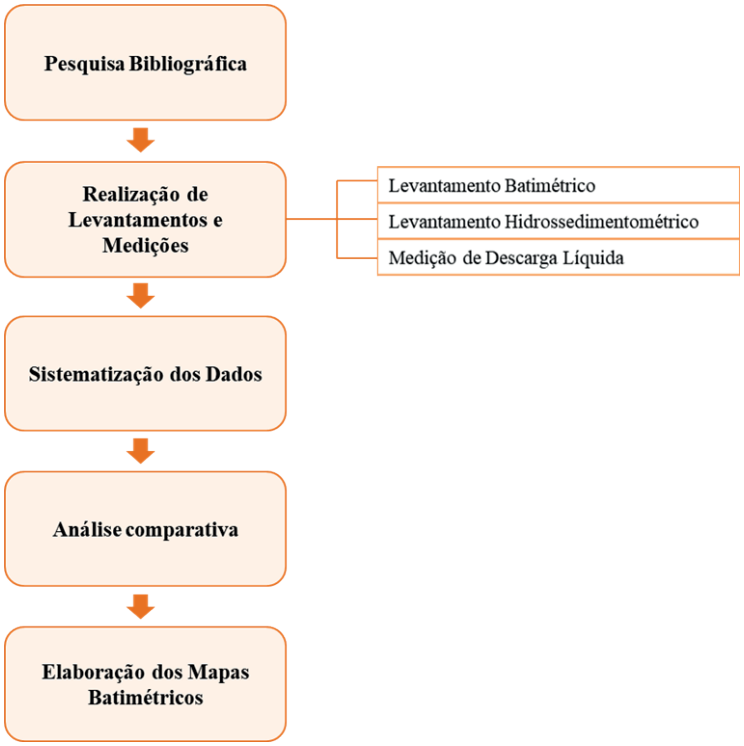
A navegação na Amazônia se destaca pela operação nos canais de forma natural, sem grandes intervenções em infraestrutura de calado. Dentre os mais importantes rios para a economia da região, o rio Tapajós tem servido de rota para o escoamento da produção agrícola advinda do Centro-Oeste brasileiro, sendo o maior potencial nacional graneleiro para o abastecimento mundial (TROLLY, 2019). Porém, com a intensificação do tráfego de embarcações, tem sido cada vez mais frequente a ocorrência de encalhes em bancos de areia, o que reduz a capacidade operacional de escoamento da produção, requerendo estudo mais aprofundado da dinâmica fluvial para vencer tais obstáculos (FERNANDES, 2010).

Por esse motivo o trabalho teve como objetivo efetuar levantamentos batimétricos ao longo do ano do rio Tapajós, no sentido de descrever a morfologia do seu leito, o percurso do assoreamento e, ainda, variáveis ligadas a fenômenos, tais como estimativas de sua capacidade volumétrica e volume total da massa d'água. Buscou-se, ainda, realizar o levantamento de imagem de satélite para verificar o impacto social e ambiental do problema.

MÉTODOS

Inicialmente foi efetuada uma pesquisa de revisão bibliográfica, a fim de fornecer uma base acerca da temática e da metodologia a ser utilizada neste estudo. As etapas para o desenvolvimento metodológico são observadas na Figura 1, a seguir.

Figura 1. Etapas da Metodologia do Estudo.



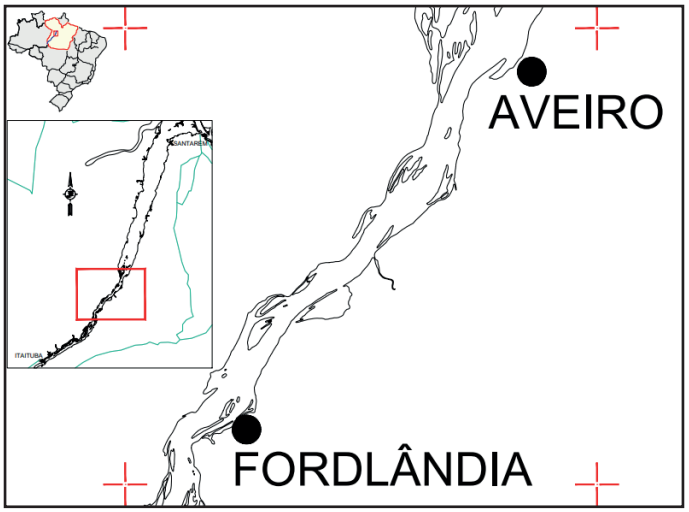
Fonte: Autores (2022).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

A área de estudo é caracterizada pelo um trecho do rio Tapajós, localizado da cidade de Aveiro/PA à localidade de Fordlândia, no mesmo município. Os levantamentos foram realizados ao longo dos anos de 2021 e 2022, de margem a margem e somente no canal de navegação, no sentido de descrever a morfologia do seu leito. A localização do trecho estudado fica entre as coordenadas geográficas 3.596131°/3.862749°S e 55.327285°/55.518600° W. A Figura 2 mostra a localização do trecho em estudo.

Os levantamentos batimétricos tiveram como objetivo verificar as profundidades registradas na carta náutica da Marinha do Brasil (Cartas Náuticas 4381B e 4382A), impressas com base de dados levantados nos anos de 1981 e 1982, assim como identificar possíveis áreas de assoreamento e/ou erosão ao longo dos anos de 40 anos (Figura 6). Os levantamentos seguiram o que preconiza a Marinha do Brasil, na NORMAM-25/DHN (REV 2), para levantamentos categoria B, ou seja, mais voltados a estudos. Foram utilizados ecobatimetros monofeixe na frequência de 200 Khz, acoplados a um sistema de posicionamento DGPS, cuja precisão na planimetria é da ordem de 0,5 metros. Utilizou-se o programa de integração utilizado em levantamentos hidrográficos Hypack e um laptop para armazenamento dos dados.

Figura 2. Localização do trecho em estudo.



Fonte: Autores (2022).

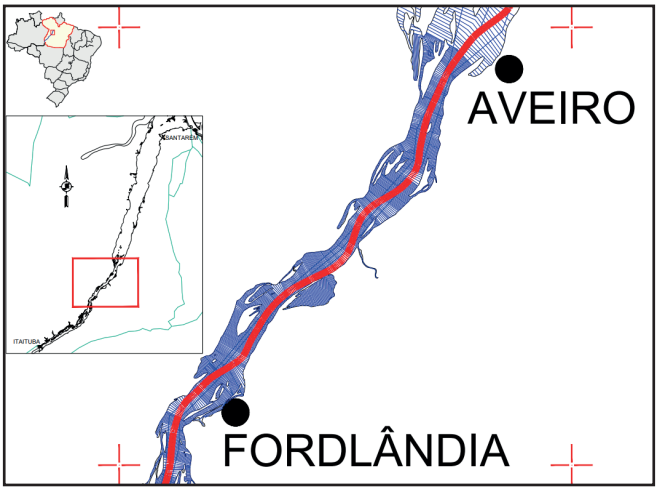
Os levantamentos hidrossedimentométricos, entre o trecho Fordlândia a Aveiro, foram realizados para medir a capacidade do rio em transportar sólidos em suspensão e de arrasto e sua descarga líquida, tanto no período de estiagem como de cheia.

Associados aos levantamentos batimétricos foram realizadas medições de descarga líquida com a utilização de um Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) em seções pré-definidas em frente às cidades de Aveiro e Fordlândia. Efetuaram-se medições de descarga sólida e coleta de sedimentos de fundo nestas mesmas seções, utilizado os seguintes equipamentos: amostrador de sedimentos em suspensão tipo AMS – 8, com saca plástica, de capacidade até aproximadamente 5,0 litros, com jogo de bicos, confeccionados em aço inox

de 1/8”, 3/16” e 1/4” e amostrador do tipo draga de raspagem (Petersen). Esses levantamentos foram realizados de acordo com o Manual Técnico para Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios, publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2014).

As coletas foram realizadas sobre linhas previamente definidas de margem a margem, além disso, estabeleceu-se um canal de navegação como mostra a Figura 3. Após isso os dados levantados em campo foram processados, em seguida realizou-se a correção das profundidades, possibilitando assim a geração dos mapas batimétricos em escalas compatíveis. A correção é um procedimento realizado para eliminar ruídos que porventura possam vir a impactar os resultados finais.

Figura 3. Canal de navegação.



Fonte: Autores (2022).

Concluídos os levantamentos, realizou-se a sistematização de dados, para posteriormente realizar a análise comparativa de tais informações com as operacionais de navegação e, por fim, a elaboração do mapa batimétrico temático.

RESULTADOS

No presente trabalho apresenta-se somente uma batimetria realizada de margem a margem e um levantamento realizado no canal. Os resultados dos mapas cartográficos obtidos nos levantamentos batimétricos são apresentados na Figura 4.

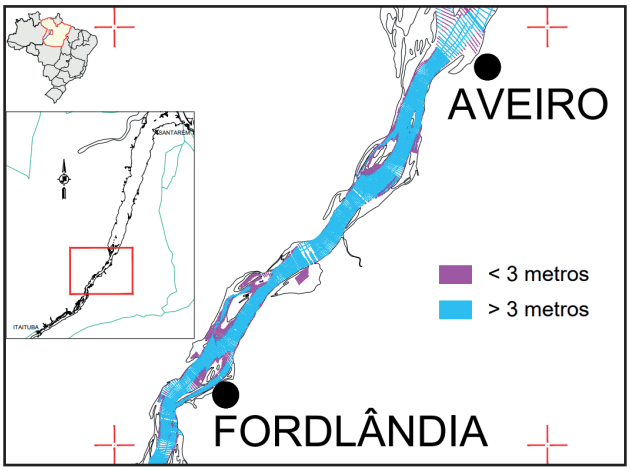
A Figura 5 mostra com mais detalhes a carta náutica (4382ª) vigente para o trecho em estudo. Vale mencionar ainda que no trecho em estudo tem-se uma fisiografia do fundo bastante definida na feição da calha do rio e seus taludes.

As comparações dos perfis, na Figura 6, tiveram como base altimétrica, o nível de redução estabelecido para a carta náutica, ou seja, o NR estabelecido pela Marinha para o local. Ambas as batimetrias estão no mesmo Datum horizontal e ainda, o nível de detalhamento

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

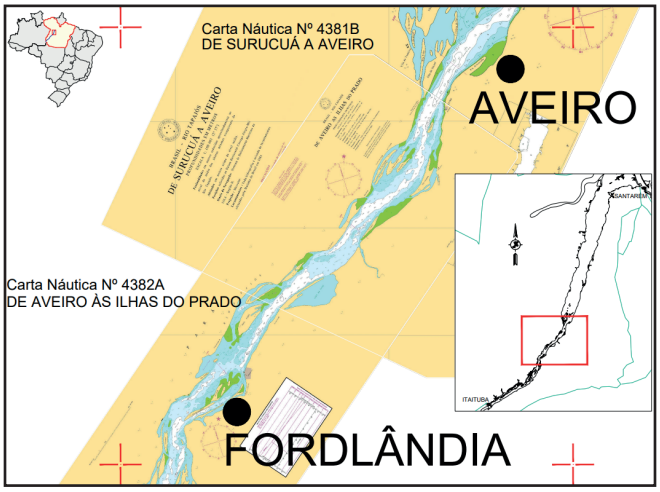
mais adensado é do levantamento atual. As seções plotadas da carta náutica foram construídas somente a partir das profundidades ali representadas.

Figura 4. Levantamento batimétrico.



Fonte: Autores (2022).

Figura 5. Levantamento batimétrico da carta náutica vigente.

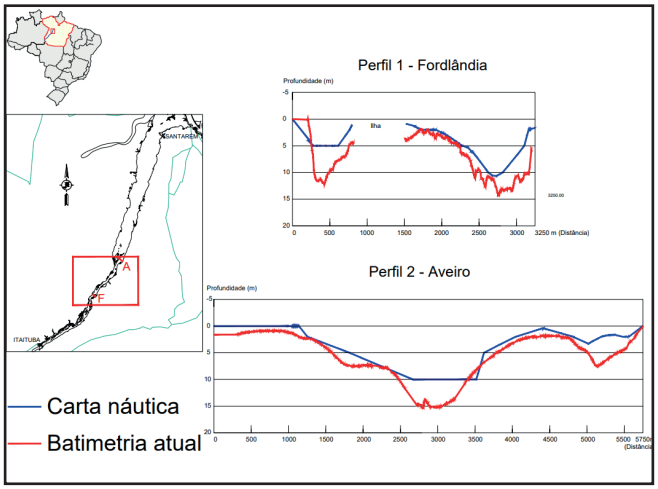


Fonte: Autores (2022).

A Figura 7 mostra a medição de descarga líquida em Aveiro, executada em dois períodos, em agosto de 2021 (primeira campanha) e outubro de 2021 (segunda campanha). As informações foram obtidas com o ADCP considerando a média vazante (agosto) e a máxima vazante (outubro).

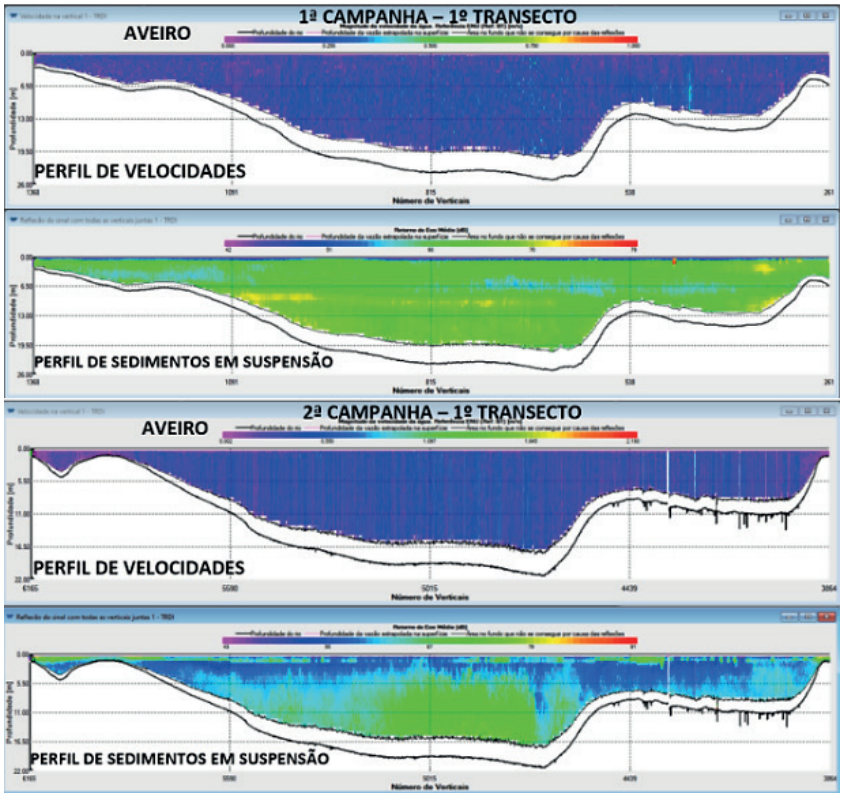
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 6. Comparação entre 2 seções obtidas da carta náutica da Marinha comparada com 2 seções obtidas de levantamento atual, para compreensão da morfologia do leito do rio, nesses anos (assoreamento/erosão).



Fonte: Autores (2022).

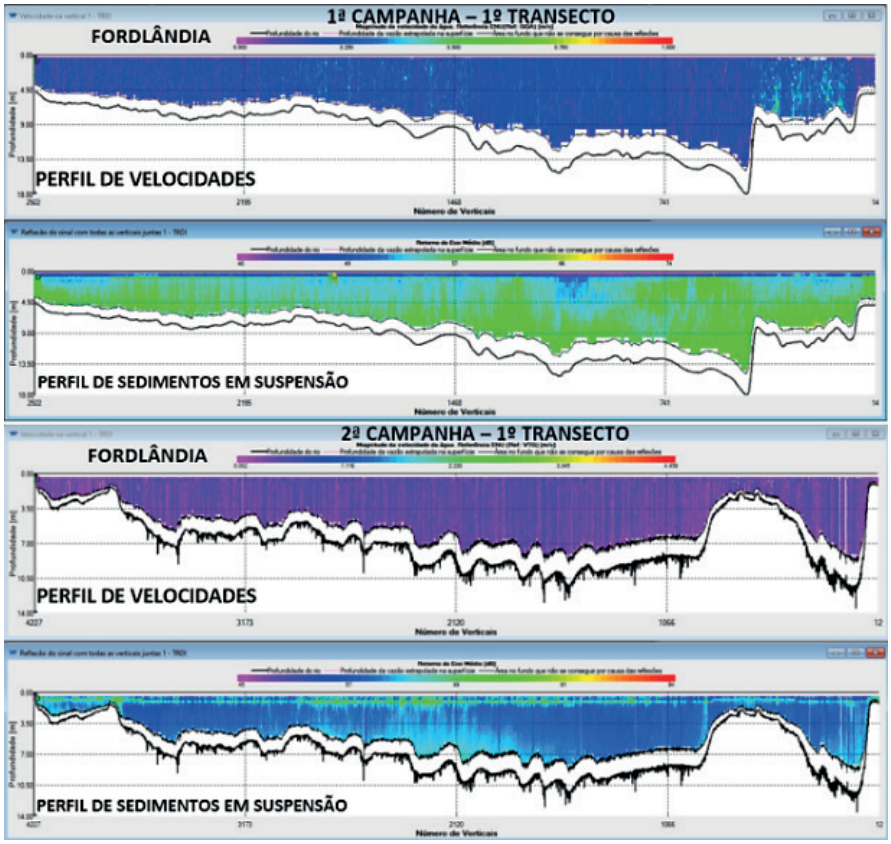
Figura 7. Perfis de velocidade e de concentração de sedimentos medidos com o ADCP, na 1ª (agosto/2021) e na 2ª (outubro/2021) campanha na seção Aveiro.



Fonte: Autores (2022).

Na Figura 8 mostra com mais detalhes a medição de descarga líquida e de concentração de sedimento executada em Fordlândia nos meses de agosto em que se tem média vazão e na máxima vazão que ocorreu em outubro. Esses resultados foram obtidos com o ADCP (somatório da velocidade do barco e da água), destaca-se que a média vazão foi denominada primeira campanha, enquanto que a alta segunda campanha.

Figura 8. Perfis de velocidade e de concentração de sedimentos medidos com o ADCP, na 1ª (agosto/2021) e na 2ª (outubro/2021) campanha na seção Fordlândia.

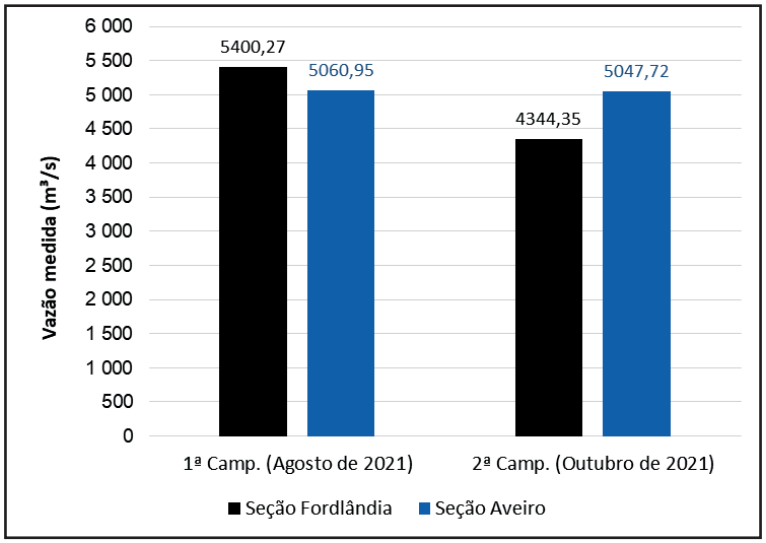


Fonte: Autores (2022).

A Figura 9, por sua vez, apresenta a comparação entre as vazões medidas nas seções Aveiro e Fordlândia na primeira e na segunda campanha na seção Aveiro e na seção Fordlândia. No que diz respeito às vazões líquidas, em ambas as seções decresceram. Na seção de Fordlândia, o decréscimo de vazão foi acentuado (1056 m³/s) entre as duas campanhas e, por outro lado, em Aveiro, de 13 m³/s. O nível d'água medido pelo sensor de pressão de Fordlândia entre agosto e outubro/2021, evidenciou maior taxa de decréscimo, em comparação aos medidos em Aveiro. Em Santarém (foz), os níveis d'água decresceram numa proporção semelhante aos de Aveiro.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 9. Comparação entre as vazões medidas nas seções Aveiro e Fordlândia, da 1ª (agosto/2021) com a 2ª (outubro/2021) campanha.



Fonte: Autores (2022).

O cálculo da descarga em suspensão foi realizado através da equação:

$$Q_{ss} = Ql \times C_{ss} \times 0{,}0864$$

Onde:

Q_{ss} – Representa a descarga sólida, em suspensão (ton·dia-1);

Ql – Descarga liquida (m3/s);

C_{ss} – Concentração média de sedimentos suspensos (mg/l).

As Figuras 10 e 11 mostram os laudos dos ensaios de suspensão.

Quanto ao transporte sedimentos em suspensão, os dados podem ser vistos abaixo, na Tabela 1.

DISCUSSÃO

De acordo com a Figura 4, neste trecho, de aproximadamente 9 km entre Fordlândia e Aveiro, encontrou-se profundidade média de 17 metros, especialmente na região determinada como canal de navegação. Aponta-se que a carta náutica vigente da Marinha do Brasil (Figura 5), mapeada há 40 anos, mostra que o rio tende a apresentar certo nível de estabilidade quanto à profundidade, com poucos trechos com profundidade inferior a 3 metros, e ao traçado do canal. Contudo, nota-se que há o assoreamento no rio.

Figura 10. Laudo de Agosto 2021.



LAFARO

INSTITUTO JOÃO NEÓRICO - IEN/FARO
LABORATÓRIO DE ÁGUAS

Boletim de Análise

Rio: Tapajos
Local: Fordlandia e Aveiros
Seção: FB1 e AV01
Técnico (a) de Laboratório: Henrique Brasil
Hiasara Cordeiro

Obs: Dada a baixa concentração de sedimentos em suspensão, não há necessidade de realização do ensaio de granulometria das amostras.

Numeração do frasco de acondicionamento: 001 e 002
Data do ensaio de suspensão: 05/10/21
Método: Filtração

Ensaio de Suspensão
Filtração de 1 litro de amostra em 0,45 µm

Ensaio de Filtração Rio Tapajós - Fordlândia				
volume reduzido - vr:				conc.
cadinho	sed+tara	tara	sedimento (g)	(mg/l)
01	0,0678	0,0646	0,0032	3,2

Ensaio de Filtração Rio Tapajós - Aveiros				
volume reduzido - vr:				conc.
cadinho	sed+tara	tara	sedimento (g)	(mg/l)
02	0,0683	0,0628	0,0055	5,5

Porto Velho Velho, 21 de Outubro de 2021

Henrique Otavio Braga Brasil
CRQ 14ª Região 14100357
FARO/UN

Leandro Soares Moreira Dill
Coord. de pós-graduação, Pesquisa e Extensão
FARO/UN

Fonte: Autores (2022).

Figura 11. Laudo de Outubro 2021.



LAFARO

INSTITUTO JOÃO NEÓRICO - IEN/FARO
LABORATÓRIO DE ÁGUAS

Rio: Tapajos
Local: Fordlandia e Aveiros
Coleta: 28/10/21 e 30/10/21
Localização: --
Transecta: --
Prof. (m) --

Numeração do frasco de acondicionamento: --
Data do ensaio: 02/12/21
Método: Filtração
Técnico (a) de Laboratório: Henrique Otavio Braga Brasil

Filtração de 1 Litro de Amostra em 0,45 µm

Ensaio de Filtração Rio Tapajós - Aveiros				
Cadinho	Sed +Tara (g)	Tara (g)	Sedimento (g)	Conc. (mg/l)
01	0,0763	0,0693	0,0070	7

Ensaio de Filtração Rio Tapajós - Fordlandia				
Cadinho	Sed +Tara (g)	Tara (g)	Sedimento (g)	Conc. (mg/l)
02	0,0754	0,0652	0,0102	10,2

Henrique Otavio Braga Brasil
CRQ 14ª Região 14100357
FARO/UN

Leandro Soares Moreira Dill
Coord. de pós-graduação, Pesquisa e Extensão
FARO/UN

Fonte: Autores (2022).

Tabela 1. Transporte de Sedimentos (Qss), nas seções Aveiro e Fordlândia.

Seções de Medição	Qss (ton/dia)	
	1ª campanha (Agosto de 2021)	2ª campanha (Outubro de 2021)
Seção Fordlândia	1493,07	3828,59
Seção Aveiro	2404,96	3052,86

Fonte: Autores (2022).

As regiões mais rasas, ou seja, com menos de 3 metros de profundidade estão situadas mais próximas das margens dos rios ou ao redor de ilhas fluviais. Tal evento pode ser

relacionado com seu uso para fins de transporte e ao comparar as cartas náuticas vigentes e os levantamentos batimétricos efetuados.

Não existem áreas críticas para a navegação entre o trecho de Aveiro e Fordlândia do rio Tapajós, mesmo no período de estiagem.

Considerando a medição de descarga líquida em Aveiro e de descarga líquida e de concentração de sedimento executada em Fordlândia, menciona-se que existem diferenças entre os períodos em que foram medidos, apresentando assim capacidade volumétrica distinta na sazonalidade.

Com relação ao sedimento em suspensão nota-se um aumento da sua concentração ao longo da coluna de água na 2ª campanha, nas duas seções. No entanto, maior concentração de Qss é observada em Fordlândia.

CONCLUSÃO

No canal de navegação do rio Tapajós, foco do presente trabalho e, entre os municípios de Aveiro e Fordlândia, observou-se locais de ocorrência de um ligeiro assoreamento, que, no entanto, não ocasionou áreas críticas para a navegação (profundidades inferiores a 3,50 m), mesmo em período de estiagem. As vazões líquidas medidas com ADCP decresceram tanto em Fordlândia quanto em Aveiro, em conformidade com a descida do rio (período de estiagem). Os dados mostram que em Aveiro a descarga líquida foi menor que em Fordlândia, como resultado do efeito maior da influência da vazão e níveis em Santarém que é regida pelo rio Amazonas. Quanto à concentração de sólidos em suspensão, percebe-se que quanto maior a vazão, menor a concentração.

De maneira geral, o trabalho atingiu aos objetivos, ao executar uma pesquisa empírica, envolvendo levantamentos batimétricos ao longo do ano do rio Tapajós, no sentido de descrever a morfologia do seu leito, o percurso do assoreamento e, ainda, variáveis ligadas a fenômenos, tais como estimativas de sua capacidade volumétrica e volume total da massa d'água.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Manual Técnico sobre Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios**. Brasília: ANA, 2014.

ANTAQ. **Boletim Aquaviário**. 2018. Disponível em: https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/boletim-aquaviario. Acesso em: 01 jun. 2022.

FERNANDES, R. D. **Formação e evolução dos bancos de areia da foz do Rio Amazonas.** 2010. 131f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

GUO, L.; VAN DER WEGEN, M.; ROELVINK, J. A.; HE, Q. The role of river flow and tidal asymmetry on 1-D estuarine morphodynamics. **JGR Earth Surface**, v. 119, n. 11, 2014.

HACKNEY, C. R. DARBY, S. E.; PARSONS, D. R.; LEYLAND, J.; AALTO, R.; NICHOLAS, A. P.; BEST, J. L. The influence of flow discharge variations on the morphodynamics of a diffluence–confluence unit on a large river. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 2, 2018.

KHOSRONEJAD, A.; FLORA, K.; KANG, S. Effect of Inlet Turbulent Boundary Conditions on Scour Predictions of Coupled LES and Morphodynamics in a Field-Scale River: Bankfull Flow Conditions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 146, n. 4, 2020.

LUAN, H. L.; DING, P. X.; WANG, Z. B.; YANG, S. L.; LU, J. Y. Morphodynamic impacts of large-scale engineering projects in the Yangtze River delta. **Coastal Engineering**, v. 141, 2018.

MAAB, A. L.; ESSER, V.; FRINGS, R. M.; LEHMKUHL, F.; SCHÜTTRUMPF, H. A decade of fluvial morphodynamics: relocation and restoration of the Inde River (North-Rhine Westphalia, Germany). **Environmental Sciences Europe**, v. 30, n. 40, 2018.

MANDLBURGER, G.; HAUER, C.; WIESER, M.; PFEIFER, N. Topo-Bathymetric LiDAR for Monitoring River Morphodynamics and Instream Habitats – A Case Study at the Pielach River. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, 2015.

MASELLI, V.; PELLEGRINI, C.; DEL BIANCO, F.; MERCORELLA, A.; NONES, M.; CROSE, L. GUERRERO, M. NITTROUER, J. A. River Morphodynamic Evolution Under Dam-Induced Backwater: An Example from the Po River (Italy). **Journal of Sedimentary Research**, v. 88, n. 10, 2018.

NICHOLAS, A. P.; ASHWORTH, P. J.; SMITH, G. H. S.; SANDBACH, S. D. Numerical simulation of bar and island morphodynamics in anabranching megarivers. **JGR Earth Surface**, v. 118, n. 4, 2013.

SANTOS, M. V.; DUARTE, M. L.; SILVA, T. A.; COTA, H. S.; VAZ, M. A. B. Morfologia fluvial e dinâmica de sedimentos: análise dos efeitos a jusante do complexo hidrelétrico do rio Madeira. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 46, 2020.

SU, M.; YAO, P.; WANG, Z. B.; ZHANG, C. K.; STIVE, M. J. F. Exploratory morphodynamic hindcast of the evolution of the abandoned Yellow River delta, 1578–1855 CE. **Marine Geology**, v. 383, n. 1, 2017.

TROLLY, T. S. **Avaliação de genotoxicidade em peixes de duas áreas portuárias do Rio Tapajós, no Oeste do Pará**. 2019. 44 f. Dissertação (Dissertação em Ciências) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2019.

VOLP, N. D.; VAN PROOIJEN, B. C.; PIETRZAK, J. D.; STELLING, G. S. A subgrid based approach for morphodynamic modelling. **Advances in Water Resources**, v. 93, 2016.

XIE, D.; PAN, C.; GAO, S.; WANG, Z. B. Morphodynamics of the Qiantang Estuary, China: Controls of river flood events and tidal bores. **Marine Geology**, v. 406, n. 1, 2018.

YEPEZ, S. P.; LARAQUE, A.; GUALTIERI, C.; CHRISTOPHOUL, F.; MARCHAN, C.; CASTELLANOS, B.; AZOCAR, J. M.; LOPEZ, J. L.; ALFONSO, J. Morphodynamic change analysis of bedforms in the Lower Orinoco River, Venezuela. IAHS, v. 377, 2018.

YUILL, B. T.; GAWEESH, A.; ALLISON, M. A.; MESELHE, E. A. Morphodynamic evolution of a lower Mississippi River channel bar after sand mining. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, n. 4, 2016.

YUILL, B. T.; KHADKA. A. K.; PEREIRA, J.; ALLISON, M. A.; MESELHE, E. A. Morphodynamics of the erosional phase of crevasse-splay evolution and implications for river sediment diversion function. **Geomorphology**, v. 259, 2016.

ZHOU, Z.; COCO, G.; JIMÉNEZ, M.; OLABARRIETA, M.; VAN DER WEGEN, M.; TOWNEND, I. Morphodynamics of river-influenced back-barrier tidal basins: The role of landscape and hydrodynamic settings. **Water Resources Research**, v. 50, n. 12, 2014.

09

Medição da elevação da superfície d'água em experimentos 2D usando análise de imagens: uma ferramenta de validação na Engenharia Naval e Oceânica

Matheus Rocha de Sousa
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Jassiel V. H. Fontes
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Irving D. Hernández
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Edgar Mendoza
Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM

Harlysson W. S. Maia
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

doi 10.37885/221111017

RESUMO

Na Engenharia Naval e Oceânica, diversos fenômenos de interação fluido-estrutura são comumente avaliados por meio de experimentos hidrodinâmicos bidimensionais simplificados. As medições obtidas por meio desses experimentos, tais como a evolução espacial e temporal da elevação da superfície d'água, são de grande importância para a validação de modelos analíticos e numéricos. Com a evolução constante dos dispositivos ópticos e a contínua diminuição do seu custo, a medição de movimento baseada na análise de imagens tem sido aplicada para quantificar o movimento da superfície d'água em experimentos, utilizando "sensores virtuais". O presente trabalho apresenta algumas das abordagens experimentais hidrodinâmicas nas quais é possível medir a elevação da superfície d'água usando técnicas baseadas no processamento e análise de imagens, explicando a diferença entre sensores de medição convencionais e virtuais. Concluiu-se que com técnicas de medição não obstrutivas é possível obter séries temporais de elevações d'água em diferentes posições, possibilitando conhecer a evolução da superfície d'água com mais detalhe do que métodos convencionais obstrutivos. Análises de possíveis erros nestas medições ainda são necessários. Atualmente, existem técnicas de processamento e análise de imagens de uso livre que podem contribuir na pesquisa científica, em diversas aplicações de validação.

Palavras-chave: Elevação d'Água, Análise por Imagens, Experimentos Hidrodinâmicos 2D, Superfície Livre, Séries Temporais

INTRODUÇÃO

Na Engenharia Naval e Oceânica são estudados vários problemas nos quais estruturas fixas e flutuantes interagem com diversos tipos de escoamento. As análises desenvolvidas para avaliar tais interações consistem na utilização de métodos analíticos, numéricos e experimentais. No entanto, o uso de dados experimentais se torna indispensável para validar as análises analíticas e numéricas (STERN *et al.*, 1999). Stern *et al.* (1999) e Babuska e Oden (2004) definem a validação como o processo de comparar resultados numéricos com dados experimentais ou obtidos a partir de observações físicas.

Na pesquisa atual, as medições de movimento de objetos e da superfície livre d'água, a partir do processamento e análise de imagens, tem ganhado grande relevância na comunidade acadêmica, tanto pela sua praticidade quanto pelos seus variados ramos de aplicação para fins de validação. Por exemplo, Gilmore *et al.* (2013) salienta a importância das medições da elevação d'água, incluindo a análise de erro nas medições, em aplicações de gestão de recursos hídricos. Tais medições são relevantes para a analisar a variação de volumes de abastecimento d'água, descargas d'água ocasionadas pelas chuvas, taxas de transporte de nutrientes; entre outras variáveis.

Partindo para a avaliação das medições da elevação da superfície d'água a partir de imagens em aplicações da Engenharia Naval o Oceânica, Hernández *et al.* (2018) propuseram uma metodologia para obter séries temporais de elevações da superfície d'água para experimentos hidrodinâmicos bidimensionais, fundamentada no uso de imagens binárias e possibilitando um código aberto no uso de tal método. Embora o método tenha limitação para identificar superfícies d'água múltiplas, como no caso de bolhas de ar misturadas no escoamento, permite a obtenção de séries temporais da altura efetiva d'água em diversas posições, em um curto período.

Posteriormente, Hernández-Fontes *et al.* (2020d) propuseram uma metodologia para identificar contornos e medir elevações da superfície d'água com múltiplos valores. Em ambos os métodos de Hernández *et al.* (2018) e Hernández-Fontes *et al.* (2020d), são usados métodos de análise de imagens binárias considerando operações lógicas. Desta forma é reduzido significativamente o tempo computacional necessário para executar as tarefas de análise de dados. Diferenciar os objetos da cena do plano de fundo por meio de operações de segmentação durante o processamento é o principal ponto na obtenção das imagens binárias. Os métodos de medição por imagens propostos foram comparados com medições obtidas por meio de sensores convencionais, discutindo limitações e vantagens.

O presente trabalho apresenta algumas abordagens recentes de experimentos hidrodinâmicos realizados em instalações bidimensionais (2D), explicando o processo de medição das elevações da superfície livre d'água por sensores convencionais e técnicas

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

baseadas em imagens. Para fins de discussão do presente trabalho, são considerados experimentos 2D aqueles comumente realizados em instalações com duas paredes paralelas restringindo o escoamento e onde a superfície livre é pouco afetada pelo movimento d'água. Alguns exemplos que podem descrever este tipo de instalações são canais hidrodinâmicos (HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2020a; SARMENTO, 1992), tuneis de cavitação (LIU; HIGUCHI; IKOHAGI, 1999), tanques retangulares de vidro ou acrílico (HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2018; KOCAMAN; OZMEN-CAGATAY, 2012; STANSBY; CHEGINI; BARNES, 1998), entre outros.

MÉTODOS

O presente trabalho apresenta alguns dos últimos avanços relacionados com a medição de elevação de água em experimentos hidrodinâmicos 2D, usando técnicas não obstrutivas baseadas no processamento e análise de imagens. São apresentados três tópicos: uma introdução das interações fluido-estrutura comuns na Engenharia Naval e Oceânica que envolvem a superfície livre d'água; uma breve revisão das aplicações em instalações experimentais bidimensionais; e uma explicação das diferenças entre os métodos convencionais e os métodos baseados em imagens para medir o movimento da superfície livre d'água. Para realizar a revisão bibliográfica foram pesquisadas diversas bases de dados de revistas científicas relacionadas com interações de fluido-estrutura, em língua inglesa, com ênfase na pesquisa experimental. Foram consultadas bases de dados de acesso restrito e de acesso livre, fazendo ênfase em publicações dos últimos dez anos. As palavras-chave para busca em inglês foram "*2D hydrodynamic experiments*", "*wave flume experiments*", "*water elevation measurements*", entre outras. Para fins ilustrativos, foram usadas, principalmente, imagens de livre acesso sob a licença CC (*Creative Commons*).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Interações fluido-estrutura na Engenharia Naval e Oceânica envolvendo a superfície livre d'água

Na vida real, os fenômenos que acontecem quando uma embarcação ou outra estrutura flutuante interage com a superfície livre d'água podem ser muito complexos. Por exemplo, a Figura 1a ilustra vários dos problemas nos quais pode estar submetida uma embarcação interagindo com a água, causando carregamentos significantes nela. Esses problemas têm sido (e ainda são) motivo de pesquisa pela comunidade científica nas últimas décadas. Evidentemente, o estudo experimental desses fenômenos requer de pesquisa que considere

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

as três dimensões do movimento. No entanto, os experimentos simplificados em 2D têm sido ferramentas muito importantes nos primeiros estágios de análise desses problemas.

Segundo a Figura 1a, toda estrutura flutuante está sujeita a diversos tipos de momentos fletores e esforços cortantes que devem ser considerados na análise estrutural e dinâmica de navios e outros sistemas navais (RAJENDRAN; FONSECA; SOARES, 2015). Além disso, movimentos significantes podem ocorrer, causando altas acelerações das embarcações. Com relação às altas acelerações, é importante mencionar que as estruturas navais devem operar de maneira segura para evitar efeitos negativos na saúde da tripulação (BOCCADAMO; ROSANO, 2019). Outros problemas relevantes são os efeitos de quebra de ondas quando elas interagem com estruturas, o que pode causar interações violentas (GRECO; BOUSCASSE; LUGNI, 2012; HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2020b, 2020c). Também, diversas cargas dinâmicas (ou seja, em movimento) podem ocorrer constantemente em estruturas e sistemas flutuantes, sendo necessário avaliar os possíveis efeitos na sua estabilidade (CARTER; RIZVI, 2021). Algumas cargas dinâmicas podem se dever ao embarque d'água no convés (*green water* ou *wave overtopping*), como mostrado por Greco *et al.* (2014), sendo um tópico de pesquisa ativa recente (AREU-RANGEL *et al.*, 2020; CHUANG; CHANG; MERCIER, 2018; FONTES *et al.*, 2021). De maneira similar, o problema de impacto do casco com as ondas (*slamming*) tem sido tópico de pesquisa recente devido aos danos estruturais que as embarcações podem ter (DRUMMEN; HOLTMANN, 2014; FALTINSEN; LANDRINI; GRECO, 2004; WANG; GUEDES SOARES, 2017). Finalmente, pode ser mencionado o problema de movimento de líquidos em tanques (*sloshing*). Muitas vezes, os movimentos da superfície livre dos líquidos dentro deles pode causar carregamentos inesperados na estrutura (CHEN; XUE, 2018).

Na vida real, os diversos problemas mencionados na Figura 1a acontecem de maneira muito complexa, sendo difícil pesquisar detalhes durante a interação de escoamentos com estruturas, seja utilizando ferramentas analíticas, numéricas ou experimentais. Para fins ilustrativos, um exemplo da complexidade do problema de embarque d'água é mostrado na Figura 1b. Na figura, é feita uma comparação de uma imagem tomada experimentalmente com um resultado obtido por meio de uma simulação de fluidodinâmica computacional (*CFD*, *Computational Fluid Dynamics*), realizada de maneira tridimensional (3D). Embora os resultados sejam bem parecidos, ainda existem comportamentos do fluido que são difíceis de reproduzir e analisar experimentalmente neste tipo de estudos 3D. Por exemplo, pode-se observar que a quebra da onda durante a interação experimental ocasiona um efeito de espalhamento das partículas d'água que não foram completamente reproduzidos pela simulação. Provavelmente os efeitos da viscosidade d'água possam ter efeito nesse comportamento, precisando de análises computacionais mais detalhadas para obter resultados

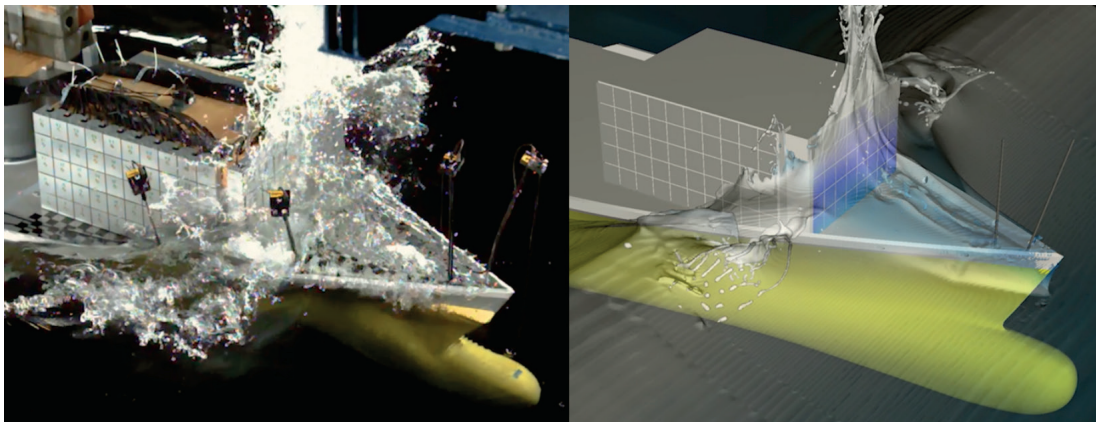
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

mais parecidos. A análise deste tipo de escoamentos requer de pesquisa sistemática e controlada para capturar detalhes da evolução da superfície d'água.

Figura 1. (a) Exemplos de interações que podem acontecer com estruturas navais e a superfície livre d'água. Imagem utilizada sob a licença *Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0* (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). (b) Exemplo de comparação de resultados numéricos com experimentais em um caso de embarque d'água em uma embarcação. Imagem utilizada sob a licença *Creative Commons CC BY 4.0* (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



(a)



(b)

Fonte: (a) Traduzido de Chryssostomidis e Liu (2011); (b) van Essen et al. (2020).

Por este motivo, diversos estudos ainda são desenvolvidos na Engenharia Naval e Oceânica, e outras áreas similares, utilizando instalações simplificadas 2D. A partir daqui, entende-se como um experimento 2D aquele no qual o escoamento é restrito por duas paredes verticais, que usualmente são feitas de acrílico ou vidro para permitir a visualização do escoamento em duas dimensões principalmente, embora possam acontecer pequenos efeitos 3D na superfície livre. Com este tipo de estudos, é possível realizar experimentos sistemáticos e controlados que permitam identificar detalhes do escoamento. Por exemplo,

com estudos mais controlados é possível aumentar a velocidade de aquisição de sensores e câmeras para capturar mais detalhes do escoamento com a capacidade padrão deles, como feito em Hernández-Fontes *et al.* (2018), Ma *et al.* (2020), Essen *et al.* (2020), entre outros.

Ensaios experimentais comuns envolvendo a superfície livre d'água

Alguns experimentos que são realizados em instalações experimentais 2D e que envolvem a propagação de escoamentos com superfície livre podem ser vistos na Figura 2. Nesses experimentos, é comum obter medições do movimento da estrutura e de variáveis hidrodinâmicas, tais como a velocidade do escoamento (FONTES *et al.*, 2022a; LEE *et al.*, 2020; SONG *et al.*, 2013) ou a elevação da superfície d'água (HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2019a). Esses dados são muito úteis para validar análises analíticas (HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2019b; ZHANG *et al.*, 2019) e numéricas (AREU-RANGEL *et al.*, 2020; RODRÍGUEZ-OCAMPO *et al.*, 2021).

A Figura 2a mostra um exemplo de ensaio para avaliar o movimento de um cilindro oscilante interagindo com ondas, projetado para o estudo de conversão da energia das ondas. Outro tipo de aplicação é visto na Figura 2b, onde um conjunto de estruturas do tipo *Cubipod®* (GÓMEZ-MARTÍN *et al.*, 2018) são utilizadas para fins de proteção costeira, visando minimizar a energia das ondas incidentes.

A Figura 2c mostra uma aplicação comum na Engenharia Civil (área de Hidrologia ou Hidráulica), na qual é comum estudar o transporte de sedimentos, considerando a propagação de ondas e correntezas, assim como a influência de estruturas submersas.

A Figura 2d mostra dois elementos necessários para estudar o problema de movimento de líquidos em tanques (vide Figura 1a). Nestes estudos, é utilizada uma mesa que se movimenta em várias direções, suportando um tanque com água. Assim, os movimentos do líquido dentro do tanque podem ser avaliados de maneira mais simplificada e controlada. Um exemplo pode ser visto em Lyu *et al.* (2017).

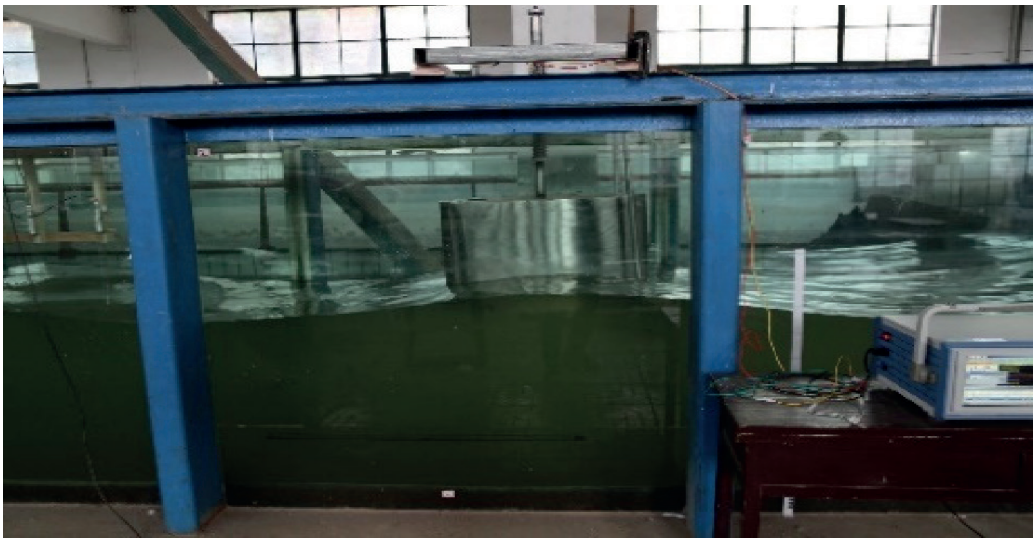
Na área naval é comum avaliar o movimento de diversas estruturas em condições de ondas regulares e mar irregular utilizando instalações 2D. Na Figura 2e pode ser visto o exemplo de um teste feito com uma seção de embarcação retangular.

Embora o uso de instalações 2D simplifique o estudo de diversos fenômenos que envolvem a propagação da superfície livre d'água, elas podem ajudar a realizar pesquisa básica de detalhe por meio de experimentos controlados, usando velocidade de captura e resolução suficientes nos sensores. Um exemplo do uso recente desta capacidade foi mostrado no laboratório de pesquisa MARIN, como mostrado na Figura 2f, onde é possível observar a configuração de um canal hidrodinâmico (instalação 2D) e um sistema de visualização de velocimetria por imagem de partículas (*PIV*, *Particle Image Velocimetry*). A pesquisa

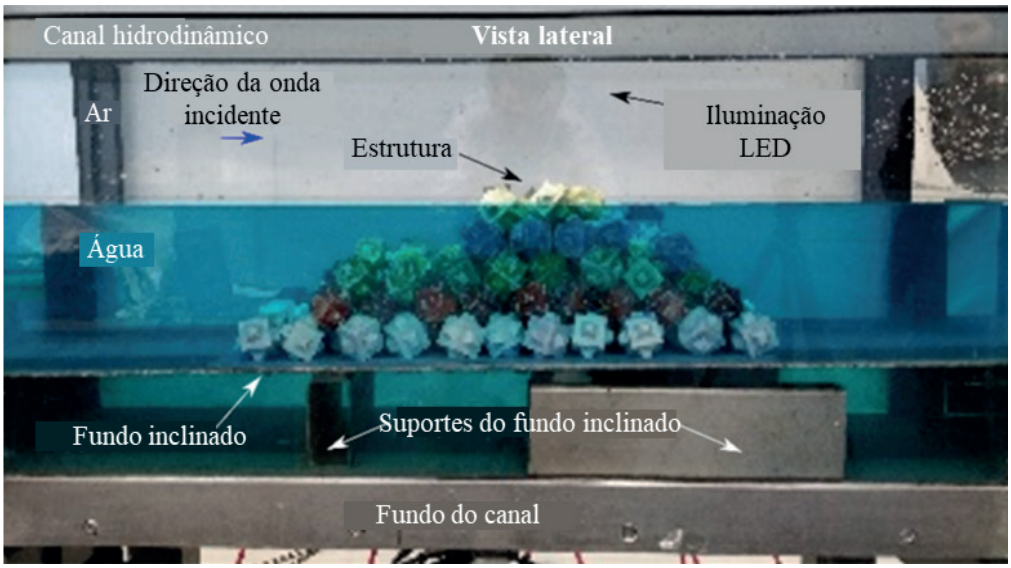
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

desenvolvida visou o estudo da física que ocorre durante a quebra de ondas, que é um dos problemas complexos listados acima na Figura 1.

Figura 2. Exemplos de diversos tipos de análises experimentais nos quais se utilizam instalações simplificadas para avaliar fenômenos relacionados com a superfície livre d'água. (a) Dispositivo de conversão de energia das ondas sendo testado com ondas regulares. (b) Estrutura de proteção costeira do tipo *Cubipod®* a ser testada com uma onda quebrando. (c) Estudo realizado para avaliar o transporte de sedimentos durante a ocorrência de ondas e correntezas. (d) Mesa excitadora de movimento em seis graus de liberdade (esquerda) e tanque simplificado (direita) para estudar o movimento de líquidos em tanques (*sloshing*). (e) Seção de embarcação simplificada (esquerda) a ser testada com ondas regulares (direita) para avaliar seus movimentos. (f) Instalação simplificada do laboratório MARIN, na Holanda, com equipamentos de medição que permitem capturar detalhes do movimento d'água (velocidade e elevação). Todas as imagens foram utilizadas sob a licença *Creative Commons CC BY 4.0* (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

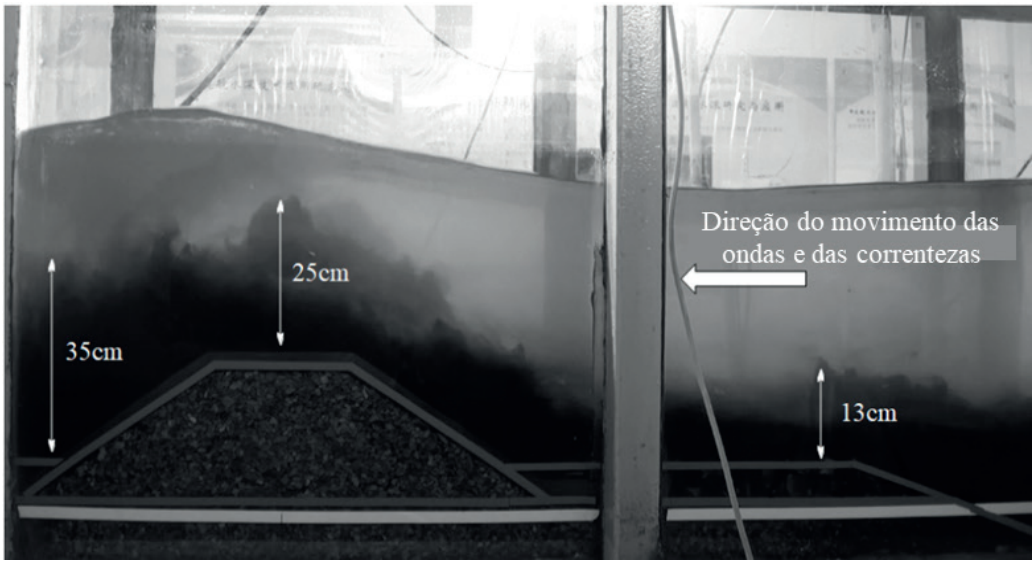


(a)

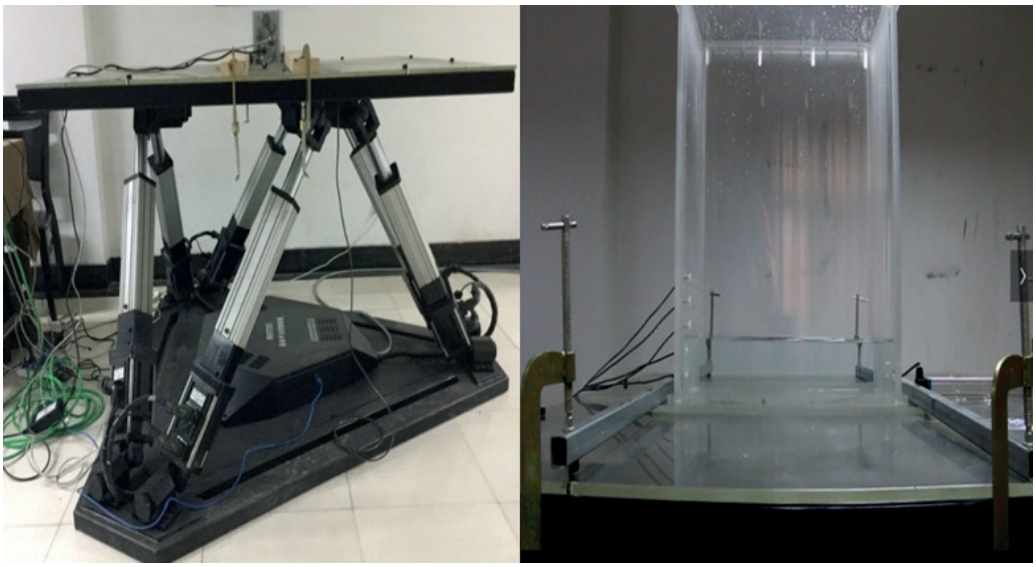


(b)

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br



(c)



(d)



(e)

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

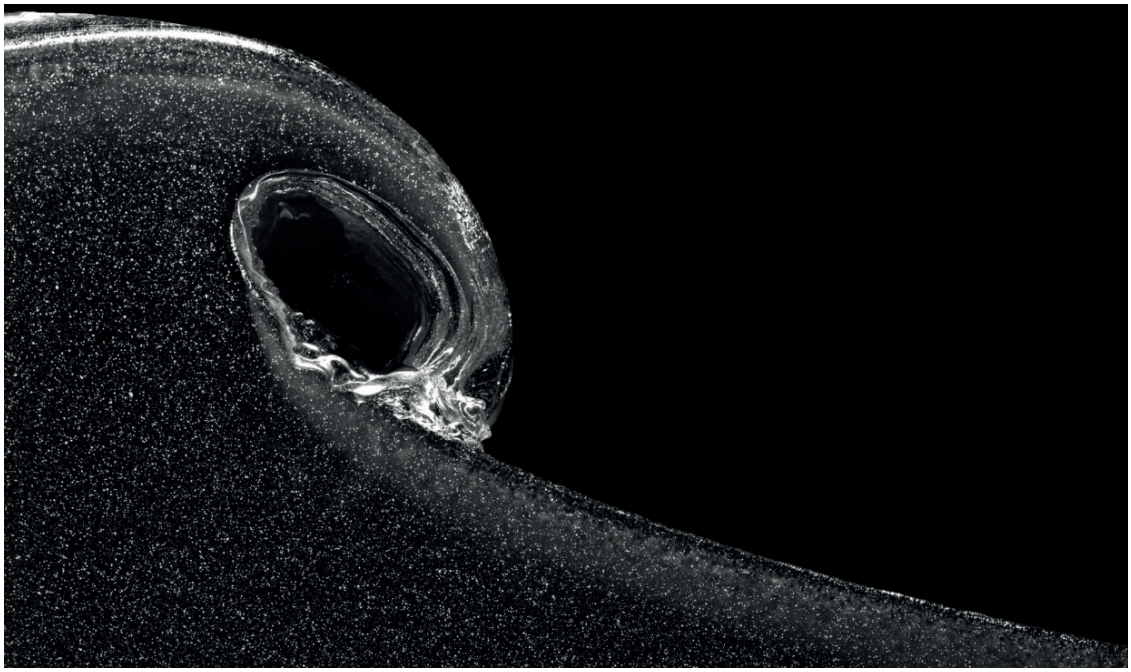


(f)

Fonte: (a) Qin et al. (2021); (b) Escudero et al. (2021) ; (c) Yan et al. (2020); (d) Chen e Xue (2018); (e) He et al. (2022); (f) van Essen et al. (2020).

Com a configuração mostrada na Figura 2f, foi possível aumentar a resolução e velocidade de aquisição da câmera do sistema PIV para capturar detalhes do escoamento, como mostrado na Figura 3. É evidente que este tipo de técnicas experimentais permite capturar detalhes do fluido que podem ser quantificados (medidos), proporcionando dados úteis para a validação de modelos analíticos ou numéricos.

Figura 3. Exemplo dos detalhes capturados durante o processo de quebra de uma onda utilizando uma câmera de alta velocidade para medições de PIV. Imagens utilizadas sob a licença *Creative Commons CC BY 4.0* (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



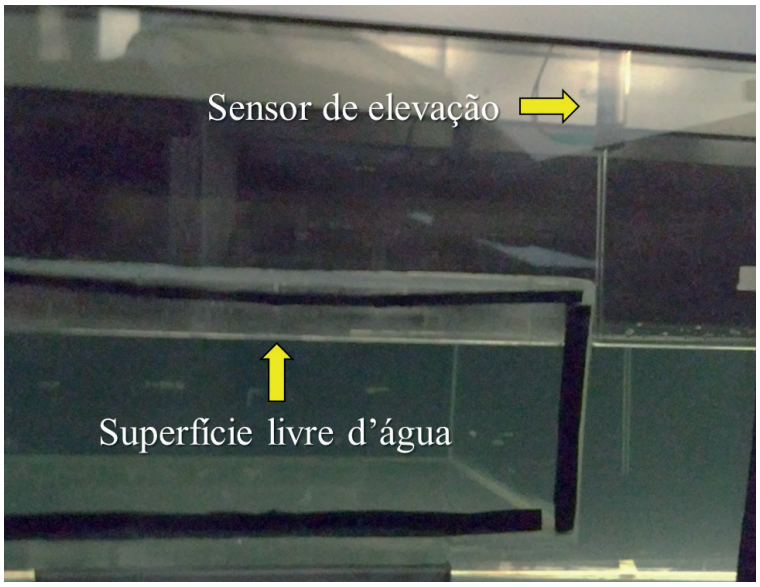
Fonte: van Essen et al. (2020).

Medição da superfície livre d'água como ferramenta de validação: "sensor convencional" e "sensor virtual"

Em diversos estudos experimentais 2D que envolvem escoamentos com superfície livre d'água, a medição da sua evolução, ou seja, a sua variação no espaço e no tempo, permite obter dados muito úteis para validar modelos analíticos e numéricos, sendo empregadas diversas técnicas experimentais de medição.

Habitualmente, a obtenção de séries temporais de elevação da superfície livre d'água em experimentos hidrodinâmicos é feita através da utilização de sensores físicos de medição, chamados neste trabalho de "sensores convencionais" (ou *wave probes* convencionais). Esses sensores são comumente construídos por sondas (geralmente arames metálicos de diferentes diâmetros), que comumente são instaladas mantendo contato com a água, operando por meio de princípios elétricos de capacitância, resistência ou condutividade. A Figura 4 mostra um exemplo de um *wave probe* convencional instalado em um canal hidrodinâmico para medir a elevação da superfície livre d'água. Pode-se conferir que o sensor é fixado na parte superior do canal e que obstrui o escoamento. O sensor mostrado não é fixado na parte inferior, estando sujeito a pequenas vibrações durante o movimento do fluido. Contudo, o uso destes sensores é propenso a alguns problemas, incluindo dificuldade em instalação, geração de cavitação, necessidade de mapeamento espacial em casos de aplicação de vários sensores, entre outros (HERNÁNDEZ *et al.*, 2018).

Figura 4. Exemplo de um sensor de elevação da superfície livre d'água convencional do tipo condutivo, instalado em uma instalação experimental 2D.



Fonte: Jassiel Fontes, 2019.

Hernández *et al.* (2018) evidencia mais detalhadamente os problemas na utilização de *wave probes* convencionais em estudos hidrodinâmicos em instalações 2D:

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

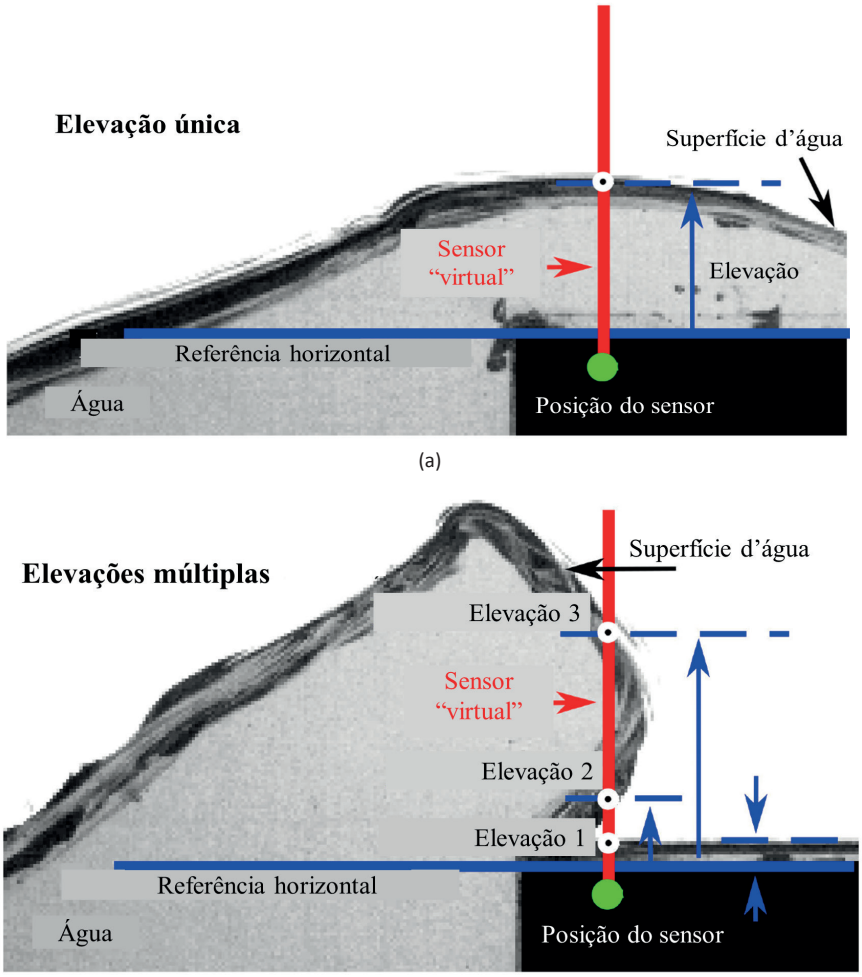
São sensores com limitação em tamanho e comprimento, podendo ser de difícil instalação em aparatos experimentais de pequeno porte. As dimensões desses equipamentos devem ser selecionadas corretamente de maneira a manter os princípios elétricos de operação e não gerar perturbações no fluxo d'água durante o experimento, incluindo cavitação (HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2019a).

Um *wave probe* convencional somente é capaz de produzir históricos de tempo da elevação da superfície livre d'água na posição onde foi instalado. Desta forma, faz-se necessário a distribuição de vários sensores obstrutivos, ao longo da região de interesse na instalação experimental, para mapear a evolução da superfície livre de maneira espacial.

Por estes empecilhos, mostra-se relevante a empregabilidade de métodos não obstrutivos, como os baseados no processamento e análise de imagens, para medir as elevações da superfície livre d'água, como alternativa ao uso de *wave probes* convencionais. O conceito de "sensor virtual", considerado como a região onde são feitas as medições do movimento nas imagens, foi, previamente apresentado por Kocaman e Ozmen-Cagatay (2012) em experimentos hidrodinâmicos (*virtual wave probes*). No presente trabalho, os sensores usados para medir a elevação d'água por médio de imagens são chamados de "sensores virtuais" (ou *wave probes* virtuais).

Com a constante evolução dos dispositivos de captação de imagem, assim com a diminuição dos seus custos, a medição da elevação da superfície livre d'água baseada em técnicas de processamento e análise de imagens, por meio de sensores virtuais, parece ter um grande potencial para se tornar uma alternativa à utilização de sensores convencionais. A captura do movimento d'água por meio de imagens e o uso de softwares específicos para o processamento e a análise delas, podem então ser aplicados no rastreamento do movimento da superfície livre (variação da elevação) com a utilização de sensores virtuais. Um *wave probe* virtual pode ser descrito como uma região definida ao longo do eixo horizontal da imagem, dentro da qual será avaliada a variação no tempo da elevação da superfície d'água. A Figura 5 ilustra a definição de um sensor (*wave probe*) virtual localizado em uma posição específica no convés de uma estrutura. Com este tipo de sensor, podem ser medidas elevações únicas e múltiplas da superfície d'água, como ilustrado nas Figuras 5a e 5b, respectivamente. Detalhes para realizar este tipo de medição, incluindo software e dados de uso livre, podem ser encontrados na literatura (FONTES *et al.*, 2021, 2022b; HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2020d).

Figura 5. Definição de um sensor (*wave probe*) virtual para medir a variação da superfície d'água. (a) Medição de elevação da superfície livre única (*SVWE, Single-Valued Water Surface measurement*). (b) Medição das elevações das superfícies d'água múltiplas na mesma posição (*MVWS, Multiple-Valued Water Surface measurements*). Imagens utilizadas sob a licença *Creative Commons CC BY 4.0* (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Fonte: Traduzido de Fontes et al. (2021).

As principais vantagens da utilização das medições de *wave probes* virtuais com relação ao uso de *wave probes* convencionais são as seguintes:

No uso de *wave probes* convencionais, é necessário realizar de maneira adequada a instalação do experimento, de forma a fixar corretamente os sensores, evitando desalinhamento e obstrução de cabos. Já no uso de sensores virtuais, a câmera não compromete o experimento pois costuma ser instalada a certa distância da parede da instalação 2D, sem obstruir o escoamento.

O *wave probe* convencional somente pode fazer a medição no local onde foi instalado. Em caso de não houver sensores físicos suficientes para medir em múltiplas posições no experimento, seria necessário realizar um experimento por vez e, em cada passo, a posição do sensor seria alterada, trazendo a dificuldade de montar e desmontar o aparato várias vezes. Além disso, seria necessário recalibrar os sensores depois de qualquer mudança. Por outro lado, no caso de *wave probes* virtuais somente seria necessário realizar o

experimento uma vez para medir em várias posições, gravando um ou vários vídeos (caso existam repetições). Dependendo da resolução dos vídeos, poderia ser medida a evolução da superfície d'água em diversos pontos próximos, na região de interesse do experimento, de maneira simultânea.

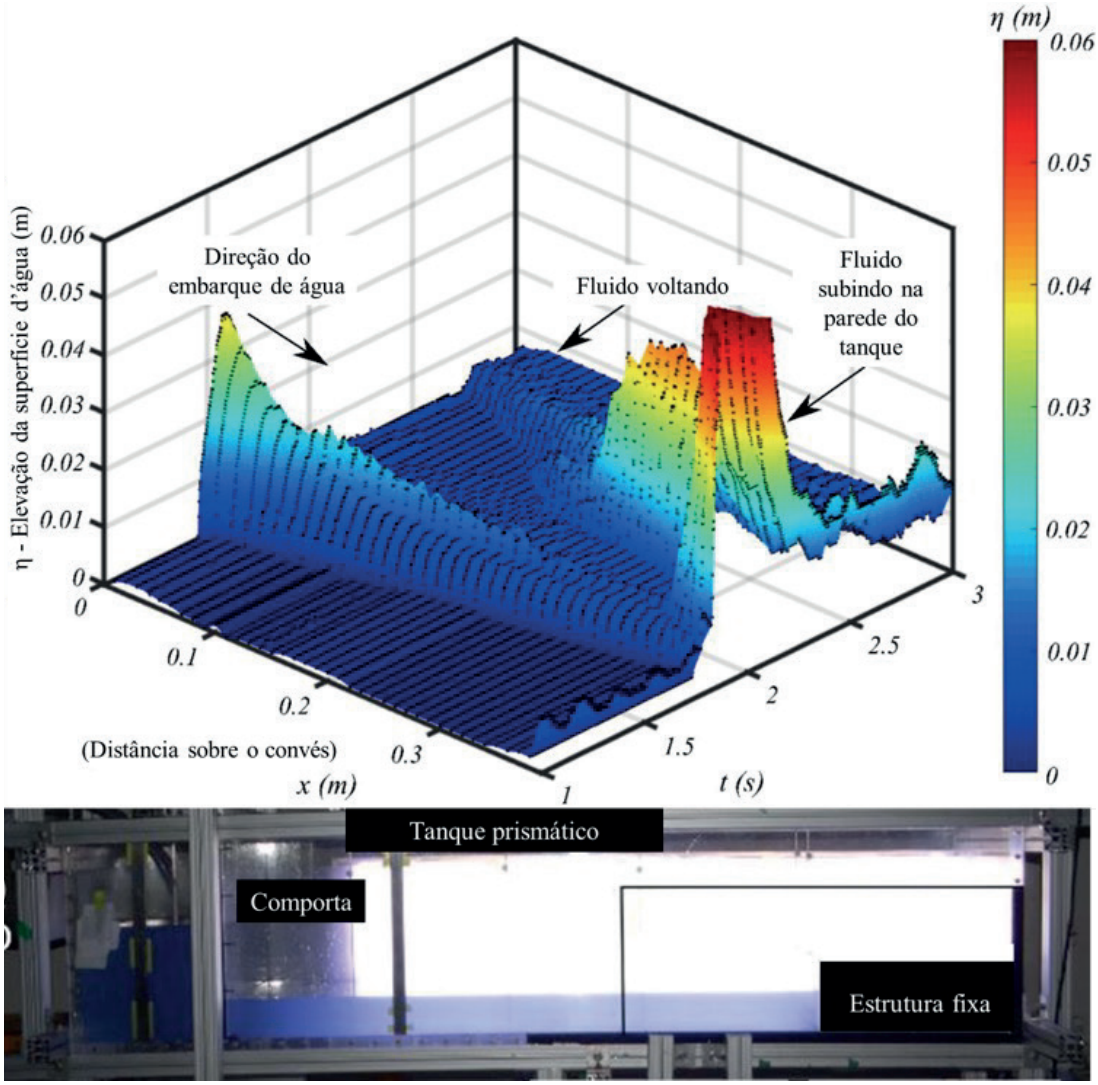
O *wave probe* convencional é um instrumento laboratorial que precisa de um sistema de aquisição de dados para ser usado, que pode ser menos acessível em comparação com as câmeras, ainda mais com o advento de *smartphones* com capacidade de gravação em alta velocidade. Com a medição por imagens, somente uma câmera seria necessária para medir a elevação d'água em 2D. Pelo menos duas câmeras seriam necessárias para uma medição 3D (CANG; HE; QIAO, 2019).

O *wave probe* convencional pode não ser adequado para o experimento por não atender ao dimensionamento requerido. Os sensores deste tipo encontrados comercialmente têm limitações tanto de seu tamanho como de seu comprimento, possuindo possíveis limitações quanto ao seu suporte. De certa forma, os sensores estarão limitados à escala do experimento que será realizado. Em contraste, as câmeras podem aumentar significativamente a área de cobertura de informações, seja com a troca de suas lentes ou até mesmo mudando o ângulo e posicionamento delas. Desta forma, em casos de medições em condições controladas como em laboratórios (ESCUDERO *et al.*, 2021), até condições mais complexas como em alto mar (ROSSI *et al.*, 2021), a utilização de câmeras conseguiria se adequar com mais coerência às necessidades.

Um exemplo das vantagens de utilizar sensores virtuais para medir elevações da superfície livre d'água em ensaios experimentais é mostrado na Figura 6. A figura mostra as medições obtidas em uma instalação bidimensional na qual foram pesquisados eventos de embarque d'água no convés de uma estrutura fixa (HERNÁNDEZ-FONTES *et al.*, 2019a). Foram considerados 33 *wave probes* virtuais distribuídos acima do convés da estrutura, sendo separados a cada 10 mm. Com as medições foi possível realizar uma visualização espacial e temporal da evolução d´água embarcada no convés. Nesse trabalho, foi utilizada a técnica de livre acesso descrita em Hernández *et al.* (2018).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

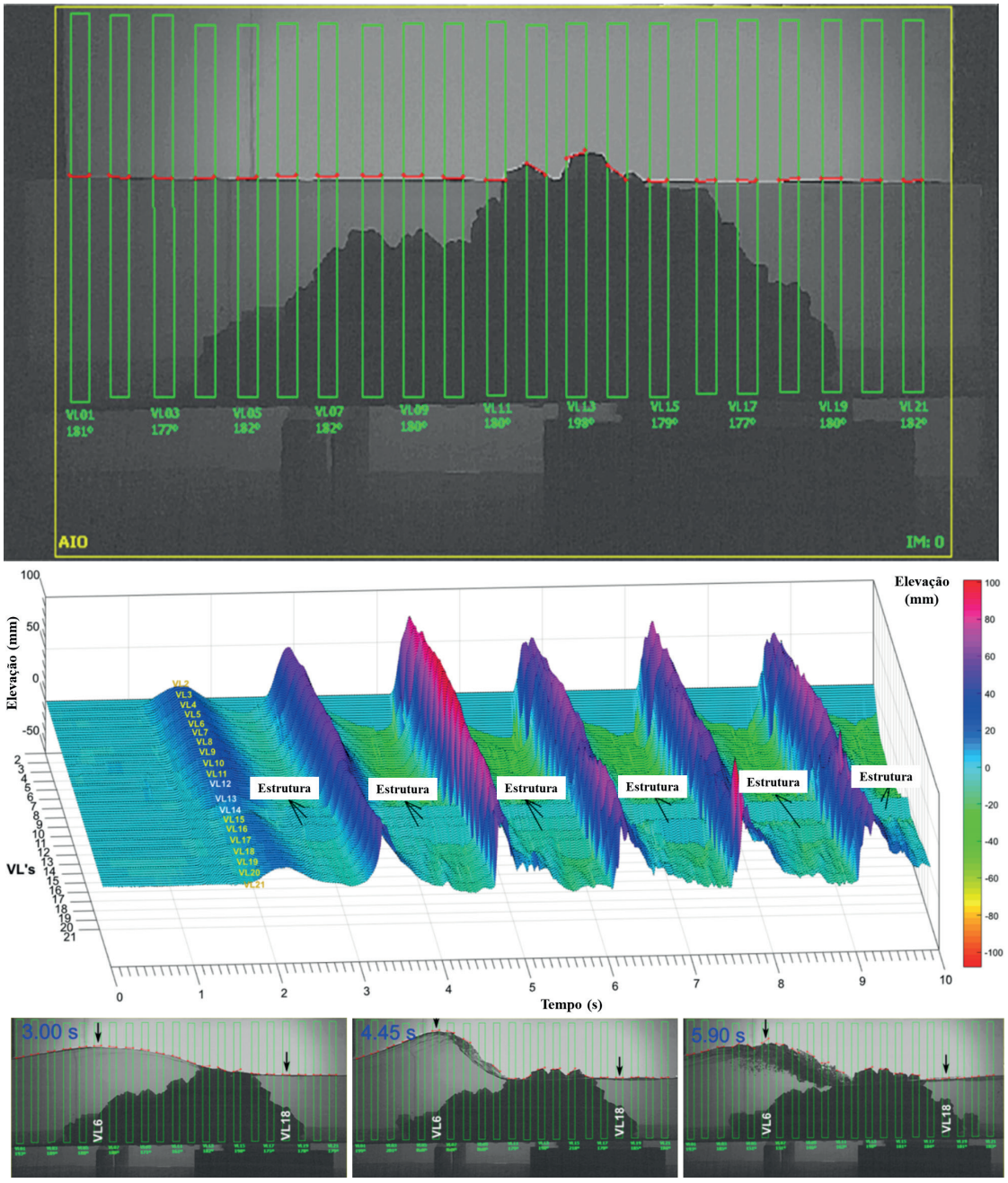
Figura 6. Visualização da distribuição espacial e temporal d'água embarcada em uma estrutura, obtida a partir de 33 *wave probes* virtuais distribuídos ao longo do convés. A parte inferior da figura mostra a instalação experimental utilizada. Imagens utilizadas sob a licença *Creative Commons CC BY 4.0* (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Fonte: Traduzido de Hernández-Fontes et al. (2019a).

A Figura 7 mostra um outro exemplo de definição de vários sensores virtuais para medir a evolução da superfície d'água em várias posições em uma instalação 2D (ESCUDERO *et al.*, 2021). Nessa imagem, os retângulos em verde representam as regiões dos sensores virtuais, dentro das quais foi quantificada a variação da superfície livre, identificada com as linhas vermelhas. Nessa abordagem, foi utilizado o software comercial *National Instruments Vision Assistant* (NI, 2014) para monitorar e salvar o movimento dos contornos identificados. Os valores médios da posição desses contornos foram considerados para o cálculo da elevação temporal. Mais detalhes podem ser consultados em Escudero *et al.* (2021).

Figura 7. Exemplo de aplicação para medir a variação da superfície livre com vários sensores virtuais. Na figura, *VL* significa "*Virtual Level*" (sensores virtuais de nível). As figuras da parte inferior mostram a evolução espacial e temporal das medições nos *VL*'s. Imagem utilizada sob a licença *Creative Commons CC BY 4.0* (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Fonte: Traduzido de Escudero et al. (2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo apresentou algumas alternativas de pesquisa experimental que envolvem o estudo do movimento da superfície livre d'água de maneira 2D, ou seja, onde o escoamento é restrito por duas superfícies paralelas e existe pouca perturbação da superfície livre. Além disso, foram explicadas as diferenças que existem entre os sensores convencionais e os sensores virtuais para medir a elevação da superfície d'água em ensaios hidrodinâmicos 2D. É importante concluir que embora o uso de medições da elevação da superfície

d'água utilizando sensores virtuais apresente diversas vantagens, ainda podem existir erros durante os processo de captura, processamento e análise de imagens (DE SANTO *et al.*, 2004; DE SANTO; LIGUORI; PIETROSANTO, 2000). Sugere-se que seja feito o estudo de possíveis fontes de erro nas medições do movimento d'água usando técnicas baseadas em imagens, de maneira que possa ser quantificado o nível de incerteza nos resultados.

Medições da evolução espacial e temporal da superfície livre d'água usando técnicas não obstrutivas, quando feitas sistematicamente, podem ser de muita utilidade na validação de resultados analíticos e numéricos em diversas aplicações da Engenharia Naval e Oceânica. Aplicações relevantes podem incluir ensaios de resistência ao avanço, movimentos de estruturas navais em ondas, desenvolvimento de dispositivos conversores de energias renováveis do oceano, estudo de interações de diversos tipos de escoamentos com estruturas, entre outras.

Agradecimentos

A pesquisa desenvolvida foi apoiada pela 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 – CT&I Áreas Prioritárias. J. V. H. F. agradece o suporte proporcionado por GPA/UEA (Portaria N° 086/2021-GR/UEA).

REFERÊNCIAS

AREU-RANGEL, O. et al. Green water loads using the wet dam-break method and SPH. **Ocean Engineering**, v. 108392, p. 1–16, 2020.

BABUSKA, I.; ODEN, J. T. Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 193, n. 36–38, p. 4057–4066, 2004.

BOCCADAMO, G.; ROSANO, G. Excessive Acceleration Criterion: Application to Naval Ships. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 7, n. 12, p. 431, 2019.

CANG, Y.; HE, H.; QIAO, Y. Measuring the wave height based on binocular cameras. **Sensors**, v. 19, n. 6, p. 1338, 2019.

CARTER, V. G.; RIZVI, M. J. Computational Analysis of Flight Deck Structural Behaviour under Variable Loadings. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 11, p. 1262, 2021.

CHEN, Y.; XUE, M.-A. Numerical simulation of liquid sloshing with different filling levels using OpenFOAM and experimental validation. **Water**, v. 10, n. 12, p. 1752, 2018.

CHRYSSOSTOMIDIS, C.; LIU, Y. **Design of Ocean Systems (2.019), Spring 2011, Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, Spring 2011.** , 2011. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/2-019-design-of-ocean-systems-spring-2011/>. Acesso em: 13 set. 2022

CHUANG, W.-L.; CHANG, K.-A.; MERCIER, R. Kinematics and dynamics of green water on a fixed platform in a large wave basin in focusing wave and random wave conditions. **Experiments in Fluids**, v. 59, n. 6, p. 100, 2018.

DE SANTO, M. et al. Standard uncertainty evaluation in image-based measurements. **Measurement**, v. 36, n. 3–4, p. 347–358, 2004.

DE SANTO, M.; LIGUORI, C.; PIETROSANTO, A. Uncertainty characterization in image--based measurements: a preliminary discussion. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, v. 49, n. 5, p. 1101–1107, 2000.

DRUMMEN, I.; HOLTMANN, M. Benchmark study of slamming and whipping. **Ocean Engineering**, v. 86, p. 3–10, 2014.

ESCUDERO, M. et al. Virtual Level Analysis Applied to Wave Flume Experiments: The Case of Waves-Cubipod Homogeneous Low-Crested Structure Interaction. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 230, 2021.

FALTINSEN, O. M.; LANDRINI, M.; GRECO, M. Slamming in marine applications. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 48, n. 3–4, p. 187–217, 2004.

FONTES, J. V. et al. On the evolution of different types of green water events. **Water**, v. 13, n. 9, p. 1148, 2021.

FONTES, J. V. et al. Flow kinematics in the generation of different types of green water events with incident wave trains. **Ocean Engineering**, v. 258, p. 111519, 2022a.

FONTES, J. V. et al. On the Evolution of Different Types of Green Water Events—Part II: Applicability of a Convolution Approach. **Water**, v. 14, n. 4, p. 510, 2022b.

GILMORE, T. E.; BIRGAND, F.; CHAPMAN, K. W. Source and magnitude of error in an inexpensive image-based water level measurement system. **Journal of hydrology**, v. 496, p. 178–186, 2013.

GÓMEZ-MARTÍN, M. E. et al. Cubipod® Armor Design in Depth-Limited Regular Wave-Breaking Conditions. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 150, 2018.

GRECO, M.; BOUSCASSE, B.; LUGNI, C. 3-D seakeeping analysis with water on deck and slamming. Part 2: Experiments and physical investigation. **Journal of fluids and structures**, v. 33, p. 148–179, 2012.

GRECO, M.; LUGNI, C.; FALTINSEN, O. M. Can the water on deck influence the parametric roll of a FPSO? A numerical and experimental investigation. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, v. 47, p. 188–201, 2014.

HE, T. et al. CFD simulation and experimental study on coupled motion response of ship with tank in beam waves. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 1, p. 113, 2022.

HERNÁNDEZ, I. et al. Water elevation measurements using binary image analysis for 2D hydrodynamic experiments. **Ocean Engineering**, v. 157, p. 325–335, 2018.

HERNÁNDEZ-FONTES et al. Green water evolution on a fixed structure induced by incoming wave trains. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, p. 1–29, 2020a.

HERNÁNDEZ-FONTES et al. Violent water-structure interaction: Overtopping features and vertical loads on a fixed structure due to broken incident flows. **Marine Structures**, v. 74, p. 102816, 2020b.

HERNÁNDEZ-FONTES et al. Patterns and vertical loads in water shipping in systematic wet dam-break experiments. **Ocean Engineering**, v. 197, p. 106891, 2020c.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. On the generation of isolated green water events using wet dam-break. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 140, n. 5, 2018.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. Green water on a fixed structure due to incident bores: guidelines and database for model validations regarding flow evolution. **Water**, v. 11, n. 12, p. 2584, 2019a.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. Analytical convolution model for shipping water evolution on a fixed structure. **Applied Ocean Research**, v. 82, p. 415–429, 2019b.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. A simplified and open-source approach for multiple-valued water surface measurements in 2D hydrodynamic experiments. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2020d.

KOCAMAN, S.; OZMEN-CAGATAY, H. The effect of lateral channel contraction on dam break flows: Laboratory experiment. **Journal of Hydrology**, v. 432, p. 145–153, 2012.

LEE, G. N. et al. Experimental study on flow kinematics and pressure distribution of green water on a rectangular structure. **Ocean Engineering**, v. 195, p. 106649, 2020.

LIU, S.; HIGUCHI, J.; IKOHAGI, T. Experimental study of cavity flow behavior on a 2-D hydrofoil. **JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering**, v. 42, n. 4, p. 641–648, 1999.

LYU, W. et al. Experimental and numerical investigation of sloshing using different free surface capturing methods. **Applied Ocean Research**, v. 68, p. 307–324, 2017.

MA, Y. et al. Experimental study of plunging solitary waves impacting a vertical slender cylinder. **Ocean Engineering**, v. 202, p. 107191, 2020.

NI. **National Instruments Vision Assistant. Version 2014.** [s.l: s.n.].

QIN, S. et al. Flume experiments on energy conversion behavior for oscillating buoy devices interacting with different wave types. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 8, p. 852, 2021.

RAJENDRAN, S.; FONSECA, N.; SOARES, C. G. Simplified body nonlinear time domain calculation of vertical ship motions and wave loads in large amplitude waves. **Ocean Engineering**, v. 107, p. 157–177, 2015.

RODRÍGUEZ-OCAMPO, P. E. et al. A CFD Numerical Study to Evaluate the Effect of Deck Roughness and Length on Shipping Water Loading. **Water**, v. 13, n. 15, p. 2063, 2021.

ROSSI, G. B. et al. Measurement of Sea Waves. **Sensors**, v. 22, n. 1, p. 78, 2021.

SARMENTO, A. Wave flume experiments on two-dimensional oscillating water column wave energy devices. **Experiments in fluids**, v. 12, n. 4, p. 286–292, 1992.

SONG, Y. K. et al. Experimental study on flow kinematics and impact pressure in liquid sloshing. **Experiments in fluids**, v. 54, n. 9, p. 1592, 2013.

STANSBY, P.; CHEGINI, A.; BARNES, T. The initial stages of dam-break flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 374, p. 407–424, 1998.

STERN, F. et al. **Verification and validation of CFD simulations**. [s.l.] IOWA INST OF HYDRAULIC RESEARCH IOWA CITY, 1999.

VAN ESSEN, S. et al. Linking experimental and numerical wave modelling. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 3, p. 198, 2020.

WANG, S.; GUEDES SOARES, C. Review of ship slamming loads and responses. **Journal of Marine Science and Application**, v. 16, n. 4, p. 427–445, 2017.

YAN, B.; ZHANG, R.; ZHANG, P. Flume Experiment on the Sediment-Retaining Effect of Submerged Breakwaters under the Combined Action of Waves and Currents. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 5, p. 340, 2020.

ZHANG, X. et al. Eliciting features of 2D greenwater overtopping of a fixed box using modified dam break models. **Applied Ocean Research**, v. 84, p. 74–91, 2019.

10

Método de otimização de rotas intermodais para o transporte da produção de soja dos Estados do Pará e do Tocantins

Vitor Hugo Pereira de Oliveira
Universidade Federal do Pará - UFPA

Maisa Sales Gama Tobias
Universidade Federal do Pará - UFPA

Marcus Pinto da Costa da Rocha
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221010614

RESUMO

A Região Norte do Brasil tem aumentado a produção de soja, entretanto, é preciso ter infraestrutura competitiva para escoar o que é produzido. Nesse contexto, o presente trabalho analisa alternativas de rotas intermodais utilizando um modelo de otimização. Assim, este estudo, contribui para o planejamento da infraestrutura e para a identificação da melhor solução para escoar a produção de soja no sentido exportação, tendo como caso as regiões situadas nos Estados do Pará e do Tocantins, próximas à hidrovia Araguaia-Tocantins. Dentro das categorias de modelos de programação linear, foram empregados os casos que são aplicados em problemas de transporte e de transbordo. Este modelo teve como objetivo minimizar os custos de transporte dos centros de produção aos portos exportadores através da infraestrutura atual e sob cenários de alternativas intermodais formadas pelos projetos da Ferrovia Paraense e da Hidrovia Araguaia-Tocantins. Os resultados mostraram que os cenários com transporte hidroviário trazem maior benefício, atingindo uma economia total de até 23%. Ademais, o complexo portuário de Vila do Conde expande sua zona de influência, obtendo, assim, um aumento de sua exportação de soja em até 650%. Além disso, as novas rotas reduzem o fluxo nas principais rodovias. Conclui-se, portanto, que as alternativas intermodais favorecem o desenvolvimento dos Estados.

Palavras-chave: Otimização, Programação Linear, Transporte Intermodal, Exportação de Soja.

INTRODUÇÃO

A Região Norte do Brasil vem se estabelecendo como uma nova fronteira agrícola para produção de grãos, o que acarreta benefícios para região, mas também em desafios para escoar a produção. Dessa forma, dentre os estados produtores de soja destaca-se o Pará, cuja produção está em ritmo acelerado de crescimento. No período de 2010 a 2017, a área plantada aumentou de 85,4 mil para 500,4 mil hectares, o que equivale a 30% do total da área de lavouras no estado no ano de 2017, conforme indica a Federação da Agricultura e Pecuária do Pará – FAEPA (2020). Ademais, o aumento da produção subiu de 243.616 toneladas, em 2010, para 1.781.672 em 2019, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2021a). Outro Estado da Região Norte que está expandindo a produção de soja é o Tocantins. Segundo dados do IBGE, de 2010 a 2019 a região aumentou sua área colhida de 352,9 mil para 905 mil hectares; além disso, houve ainda considerável aumento da sua produção, saindo de 875.428 toneladas, em 2009, para 2.615.178 toneladas em 2019.

No Brasil, entretanto, o setor ainda sofre com a falta de infraestrutura logística para transportar a produção, fator que aumenta os custos de transporte, atingindo, então, sua competitividade no cenário internacional. Dessa forma, a escassez de boas condições estruturais para transporte e armazenamento representam os principais problemas do agronegócio (KUSSANO; BATALHA, 2012). Além disso, conforme Fioroni *et al.* (2015), as plantações de soja estão localizadas majoritariamente em regiões no interior brasileiro, distantes do litoral, que resulta em grandes dificuldades para escoar a produção.

Outrossim, Halim, Kwakkel e Tavassy (2016) indicam que as melhorias nos sistemas de distribuição porto-interior podem afetar positivamente a competitividade regional, além de desempenharem um papel importante na escolha do porto dos remetentes e, portanto, no roteamento e nos volumes de mercadorias transportadas. Contudo, no Brasil, como mostrou a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2016), 42% dos grãos são transportados até os portos por rodovias, 47% por ferrovias e 11% por hidrovias. Apesar da menor participação no país, o Modal hidroviário é o preferido para escoar as mercadorias até os portos do Arco Norte, que, devido ao seu baixo custo, vem aumentando anualmente a sua participação nas rotas para escoar a produção.

No Estado do Pará, a produção de soja envolve três grandes polos: o sul do Pará, tendo Santana do Araguaia como principal município produtor; o nordeste paraense, encabeçado por Paragominas; e o polo oeste, liderado por Santarém. Especificamente a produção do Polo Sul é escoada pelo corredor rodoviário, composto pelas rodovias BR-158/BR-155/PA-150. Com esta predominância do transporte rodoviário, é comum haver conflitos em áreas como nas passagens por trechos urbanos, que aumentam o tempo das viagens, além do alto custo do modal (CRUZ, 2019).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

O transporte de soja do sul do Estado do Pará é feito por caminhões graneleiros, que possuem capacidade de carga líquida de 50 toneladas por uma extensão de mais de 1.300 km, até chegar à zona portuária em Vila do Conde, no Município de Barcarena, do Estado do Pará. Já no Estado do Tocantins, a produção de soja está distribuída por todas as suas regiões, possuindo os principais corredores para escoar a produção, estes formados pelas rodovias Belém-Brasília e BR-226, bem como com a opção intermodal pela Ferrovia Norte-Sul, utilizando os pontos de transbordo localizados nos municípios de Porto Nacional – TO, Palmeirante – TO e Porto Franco – MA.

No entanto, como possibilidade de alternativa modal para o Estado do Pará e para o Estado do Tocantins, apresentam-se duas novas opções de transporte intermodal: o modal hidroviário e o modal ferroviário. A primeira alternativa é composta pela hidrovia Araguaia-Tocantins, que é apontada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT como tendo capacidade para ser uma das principais vias de transporte do corredor Centro-Norte brasileiro, com potencial para ser uma via navegável substancial no País (DNIT, 2021). A segunda opção é formada pelo projeto da Ferrovia Paraense S.A. que, segundo a Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Mineração e Energia – SEDEME (2017), poderá ter uma extensão de 1.319 km, ligando o sul do Pará ao complexo portuário de Vila do Conde.

Conforme descrito ao longo deste tópico, os Estados do Pará e do Tocantins precisam solucionar questões relacionadas a sua infraestrutura para o escoamento de produção de soja. Com isso, considerando o que foi apresentado e a fim de colaborar com a resolução da problemática exposta, este artigo tem o propósito de analisar e identificar alternativas intermodais para o transporte de grãos de soja, em municípios dos Estados do Pará e do Tocantins, especificamente, a partir da minimização dos custos operacionais, para apoio ao planejamento em investimentos em transportes.

Assim, também se verifica que, na literatura acadêmica, algumas pesquisas fazem uso de métodos de otimização linear para a análise de soluções de problemas relacionados ao transporte de produtos do agronegócio. Dentre esses estudos estão os de Oliveira (2021) e de Oliveira *et al.* (2021a), que utilizam a programação linear para analisar mudanças na infraestrutura de transportes para escoar a produção de soja dos Estados do Pará e do Tocantins. Ainda, Souza *et al.* (2020) otimizou rotas para a exportação da produção de soja do Mato Grosso e analisou os impactos socioambientais gerados pela implantação de novas rotas intermodais.

Ademais, para analisar o impacto dos investimentos em infraestrutura portuária brasileira nos fluxos da rede de transporte de fertilizantes, o estudo de Simões *et al.* (2018) utiliza um modelo de programação linear baseado no problema de transporte. Outro estudo é o

de Lin *et al.* (2019), que utiliza programação linear para avaliar o fluxo da cadeia de abastecimento de alimentos entre os condados dos EUA. Por fim, Oliveira *et al.* (2021b) fez uso da programação linear para analisar os impactos no transporte de soja do Estado do Pará gerados pela implantação de uma nova rota hidroviária na região.

Dessa forma, este trabalho contribui com informações que servirão como diretrizes em decisões relacionadas ao transporte de grãos de soja para exportação dos municípios que estão próximos dos rios Araguaia e Tocantins, analisando, então, as alternativas intermodais formadas pela Ferrovia Paraense e pela Hidrovia planejada. Assim, serão avaliados os resultados da otimização, em diferentes cenários propostos. Adotar-se-á, então, as classes de problema de programação linear, sendo estes o problema de transporte e o problema de transbordo, ambos englobados em problemas de rede, de forma a modelar os custos, considerando as rotas atuais e propondo os novos modais como alternativa, sendo, nesse caso, as novas rotas pela Hidrovia Araguaia-Tocantins e pela Ferrovia Paraense (FPA). Por fim, será analisada a mudança na rede de transporte entre os cenários avaliados, Sendo utilizado para os cálculos do modelo o *software General Algebraic Modelling System* – GAMS (2021) como ferramenta computacional.

Contextualização do estudo

Conforme descreve a Confederação Nacional do Transporte – CNT (2021), uma parte da produção de soja é destinada ao mercado interno, sendo enviada por transporte rodoviário primeiro para armazéns ou indústrias de processamento, e posteriormente para o consumidor final; a outra parte é direcionado aos portos de exportação via rodovias, ferrovias e hidrovias. Uma inconveniência do modal rodoviário, como explica Kussano (2010), é que o fluxo de caminhões acentuado, junto ao baixo estado de conservação das rodovias, faz com que cada safra nas estradas tenha altos índices de perda de grãos durante a viagem até o destino final.

Como explicita a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2017), a competitividade das *commodities* agrícolas de exportação estaria bastante atrelada aos custos de transporte nos corredores multimodais, sendo que, no caso dos grãos, os gastos com transporte são relevantes para a competividade do produto em função do seu baixo valor agregado. Com isso, conforme adverte, a alternativa do sistema norte requer investimentos urgentes em infraestrutura, dado que a maior atratividade pelas *commodities* agrícolas vai depender de novos e eficazes corredores de transporte para proporcionar a otimização dos custos. Ademais, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA (2020), tem-se a necessidade de atender a demanda por infraestrutura no Arco Norte para que se

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

possa escoar a produção, cada vez maior, dos Estados do Mato Grosso, Pará, Maranhão, Tocantins e Bahia.

Descrição da área

A região do Estado do Pará, que compõe o estudo deste trabalho, teve, em 2019, um total de 181,673 mil hectares de área plantada, o que corresponde a 31,5% do total de sua área plantada, e a quantidade de soja produzida nos municípios foi de 563.442 toneladas (IBGE, 2021a). Já a região do Estado do Tocantins teve, em 2019, de acordo com o IBGE, uma quantidade de soja produzida nos municípios de 2.388.032 toneladas.

No Pará, segundo o DNIT (2018), entre os municípios do sul do Estado do Pará e os portos de Barcarena – PA, a ligação rodoviária pode atingir uma extensão de mais de 1.000 km entre rodovias federais e estaduais. Além disso, de acordo com a malha rodoviária do Estado do Tocantins, apresentada pelo mapa da Agência Tocantinense de Transportes e Obras – AGETO (2020), a Br-153 é a principal rodovia que cruza o Estado de norte a sul desde a divisa com o Estado de Goiás até a divisa com o Estado do Pará, e quando o sentido ao porto de Itaqui faz-se o desvio para a Br-226.

Ademais, o Estado do Tocantins também conta com a opção intermodal pela Ferrovia Norte-Sul, atualmente controlada pela VLI Logística; esta possui a extensão total de 720 km de linha férrea entre Açailândia (MA) e Porto Nacional (TO). A partir de Açailândia, a ferrovia se conecta à Estrada de Ferro Carajás, permitindo acesso ao complexo portuário de Itaqui. Assim, a produção de grãos do Tocantins é escoada pela ferrovia através de três pontos para transbordo, que estão localizados nos municípios de Porto Nacional – TO, Palmeirante – TO e Porto Franco – MA (SUDAM, 2016; AGETO, 2020; VLI, 2021a).

Rotas intermodais propostas

Como opção de transporte aquaviário, há planejamento e projetos governamentais para a hidrovia Araguaia-Tocantins. Dentre estes está o Plano Nacional de Integração Hidroviária, elaborado pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ (2013), que prevê o melhoramento das condições de navegação da hidrovia. O referido relatório apontou que seriam viáveis obras de infraestrutura para promover um significativo fluxo potencial de carga na hidrovia.

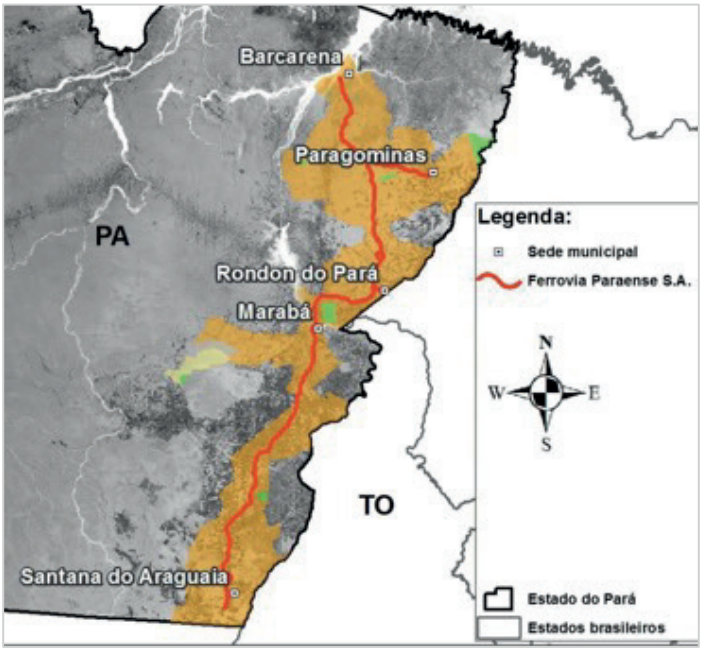
Adicionalmente, existe o projeto de derrocamento do Pedral do Lourenço, que são obras de derrocamento e dragagem entre Marabá – PA e Baião – PA, que visam viabilizar a navegação durante o ano todo no trecho, de acordo com o Programa de Parcerias de Investimento (BRASIL, 2020). Outrossim, segundo o DNIT (2021), a hidrovia tem o potencial navegável de aproximadamente 3.000 km. O trecho aquaviário Tocantins-Araguaia tem

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

capacidade para comboios de 108 metros de comprimento, 16 metros de boca e calado de 1,5 metro. O trecho de 43 km, que fica entre a Ilha da Bogéa e Santa Terezinha do Tauri, comporta comboios de 150 metros de comprimento e 32 metros de largura, com calado mínimo de 2,1 metros.

Por outro lado, consta-se o projeto da Ferrovia Paraense S.A, que propõe a implantação de uma ferrovia no Estado do Pará com extensão total de 1.319 km. Como descreve a SEDEME (2017), a ferrovia terá como ponto inicial a região do complexo portuário de Vila do Conde, no município de Barcarena. Na **Figura 1** tem-se o traçado da ferrovia formado pela Linha Troncal, bem como os ramais projetados.

Figura 1. Ferrovia Paraense.



Fonte: Extraído da SEDEME (2017).

Dessa forma, como pontos de transbordo de graneis agrícolas planejados para os primeiros oito anos de operação, haverá estações de transbordo nos municípios de Marabá e a 25 km ao sul da cidade de Santana do Araguaia. Assim, percorrerá uma distância por ferrovia total de 596 km de Barcarena até Marabá; em sequência, previsto para a segunda etapa, no quinto ano de implantação, abranger-se-á ainda a ligação de 560 km de Marabá até Santana do Araguaia.

ESTUDO DE CASO

Em 2019, a soja exportada, tendo o Pará como origem, foi de 1.508.827,76 toneladas de grãos, o que equivale a 85% da produção de 2019. Em 2020, 2.226.511,63 toneladas foram exportadas, que equivale a 25% a mais da produção de 2019. Já a exportação que teve o

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Tocantins como origem foi de 2.213.290,72 toneladas em 2019 e 2.553.876,22 toneladas em 2020, o que equivale a 85% e 98% da produção de 2019, respectivamente[1].

A região que compõe este estudo teve cerca de 1.014,8 mil hectares de área colhida de soja em 2019, o que correspondeu à soma de 31,5% e 92% do total de área cultivada com soja no Estado do Pará e do Tocantins (IBGE, 2021a), sendo que a quantidade total dessa produção dos municípios foi de 2.951.474 toneladas. Os dados de produção levantados para este estudo foram coletados do IBGE e são referentes ao ano de 2019. Entretanto, é provável que, em 2021, as exportações da produção de soja dos Estados mencionados superem a quantidade produzida em 2019.

Logo, com base no crescimento da produção e das exportações de soja, considerou-se, neste trabalho, que toda a produção anual de 2019 dos municípios como sendo destinada à exportação, com os dados de produção de cada município retirados do levantamento realizado pelo IBGE (2021a), a cidade sede municipal foi considerada para ponto de origem do transporte.

Para o modo ferroviário, os valores considerados serão os praticados pela concessionária da Ferrovia Norte-Sul, a empresa VLI (2021b). Conforme divulgado por esta, em 2018 os valores praticados na ferrovia foram de 0,0758 R$/T.km mais uma parcela fixa de R$ 24,17 por tonelada, considera-se com transbordo, o valor também será considerado tanto para Ferrovia Norte-Sul quanto para Ferrovia Paraense.

Para o frete rodoviário, os valores foram calculados com base na formulação matemática da tabela de preços mínimos do transporte rodoviário de cargas, estipulada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT (2018). Os fretes foram calculados para caminhões nove eixos, tendo peso total de 74 toneladas e carga líquida de 50 toneladas. Ademais, como os valores econômicos de transporte ferroviário e hidroviário são referentes aos praticados no ano de 2018, de forma a manter todos os valores econômicos obtidos para um mesmo ano, a tabela de frete utilizada é a formulada e praticada neste mesmo ano.

Os valores para transbordo do modal rodoviário para o modal hidroviário (Rodo-Hidro) utilizados neste trabalho foram obtidos de duas referências. A primeira delas é o trabalho de Cruz (2019), que obteve o valor praticado pelo mercado no ano de 2018, sendo de R$ 25,00 por tonelada, a tarifa praticada pela empresa Hidrovias do Brasil. A segunda referência é a tarifa média padrão de transbordo fornecida e utilizada pela empresa Unitapajós (2021), na Estação de Transbordo de Cargas de Miriituba, no município de Itaituba – PA, sendo aplicado

1 Os dados foram divulgados pela COMEX STAT (2021), sistema governamental que divulga dados do comércio exterior brasileiro baseado na declaração dos exportadores.

o mesmo valor – R$ 25,00 por tonelada. Portanto, o valor considerado para o transbordo intermodal Rodo-Hidro será de R$ 25,00 por tonelada.

Os custos de transporte do modal hidroviário foram obtidos através da ferramenta Simulador de Custo de Transporte, desenvolvida e disponibilizada pela Empresa de Planejamento e Logística S.A. – EPL, havendo está sido elaborada para servir de suporte para a elaboração do Plano Nacional de Logística (EPL, 2021a). Os valores disponíveis são referentes ao custo médio para o transporte hidroviário de granel sólido agrícola no ano de 2018. Assim, a EPL (2021b) considera três tipos de custos hidroviários, e estes são divididos para navegação em vias com baixa, média e alta restrição. Desta forma, os parâmetros de escolha do tipo de via levam em consideração as limitações da hidrovia.

Alguns cenários foram considerados para análise neste trabalho, considerando os dados da produção de soja do ano de 2019. Além de se embasar na infraestrutura atual, que é composta bem como pela a opção de rota pela Ferrovia Norte-Sul – FNS, com três estações para transbordo. Posteriormente, também adicionadas as rotas propostas, formadas pela Ferrovia Paraense e pela hidrovia Araguaia-Tocantins, consideradas como alternativas para escoar a produção, resultando, assim, em cinco cenários para 2019.

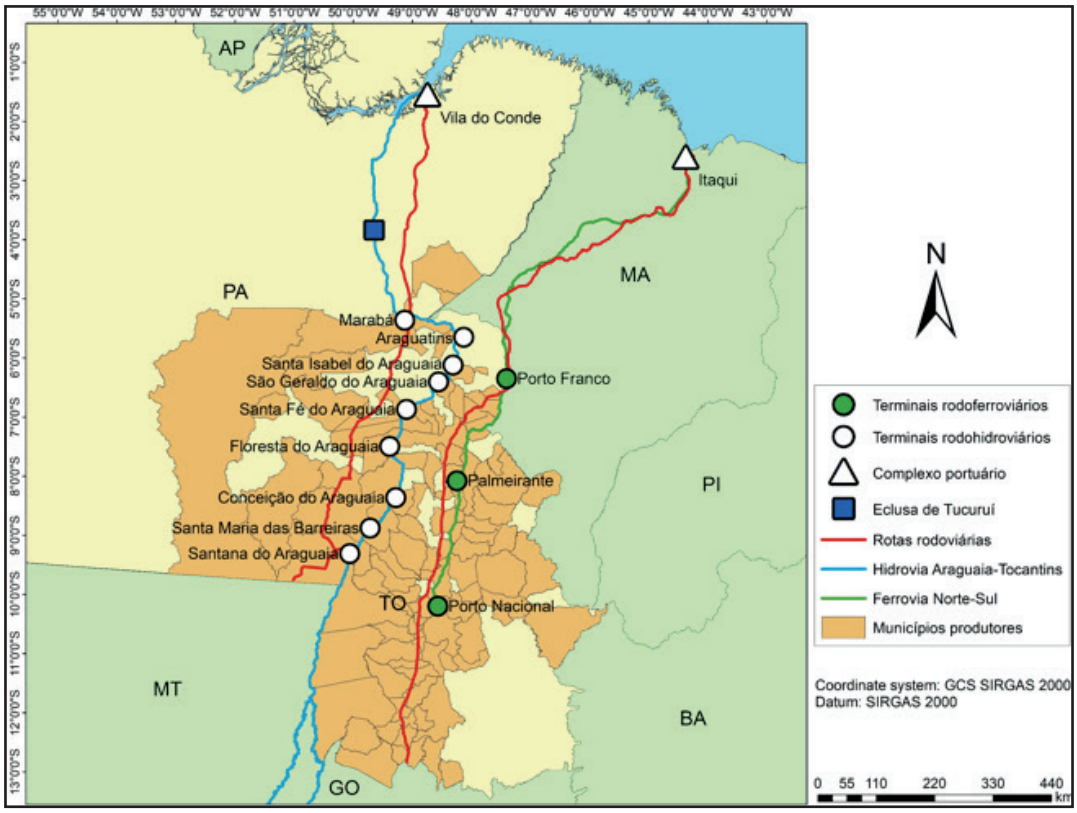
Assim, no cenário base 2019.1 considerou-se apenas as rotas utilizadas pelo modal rodoviário e pela Ferrovia Norte-Sul. Em seguida, no cenário 2019.2, além das rotas preexistentes, inclui-se a alternativa intermodal pelo projeto da Ferrovia Paraense S.A., com os locais planejados para o transbordo de soja, localizados nos municípios de Marabá – PA e Santana do Araguaia – PA.

Para o escoamento da produção de soja dos municípios, foram estipuladas diversas alternativas de locais para o transbordo de carga ao longo da hidrovia. O propósito desta distribuição de opções pela via é fornecer várias possibilidades de pontos de transbordo para compor as rotas de escoamento. Os locais dos terminais intermodais propostos foram estabelecidos de acordo com a sua infraestrutura logística existente e a qualidade dos acessos; então, estão nas proximidades de travessias por balsa entre os dois estados, de pontes e de municípios e distritos.

Como critério para manter o terminal de transbordo, buscou-se os valores de movimentação que foram divulgados pelo anuário estatístico da ANTAQ (2021) para as menores movimentações de soja embarcadas para navegação interior no ano de 2020, considerando a movimentação de carga no terminal, exclusivamente para a navegação interior. Assim, observou-se que a ETC – Terminal Hidroviário de Porto Murtinho, movimentou 52.932 toneladas de soja no ano de 2020. Então, considerou-se adotar o terminal com esta movimentação mínima para o modelo. A **Figura 2** mostra os principais corredores rodoviários utilizados

para escoar a produção da região, bem como os principais rios que compõem a hidrovia discutida, além do trajeto e das estações da Ferrovia Norte-Sul.

Figura 2. Terminais hidroviários, Ferrovia Norte-Sul e principais rodovias para escoar a produção.



Fonte: Oliveira, 2021.

De acordo com o detalhamento da rota por navegação interior descrita pela ANTAQ (2013) e conforme os exemplos citados pela EPL (2021c), este trabalho considerou a hipótese da hidrovia ter média restrição ou que uma parte dela tenha alta restrição. Com isso, para o cenário 2019.3, é incluída, como alternativa intermodal proposta, a hidrovia com média restrição navegável apenas até o distrito de Santa Isabel – PA. No cenário 2019.4, além das opções que compõem os outros cenários, foi acrescentada a alternativa pela navegação interior, com média restrição na hidrovia até a divisa do Pará com o Mato Grosso. Além dessas possibilidades, para a elaboração do cenário 2019.5 admitiu-se a hipótese que a montante de Marabá, a hidrovia, terá alta restrição. Ademais, além das opções de transporte pela intermodalidade até o porto, para todos os cenários tem-se a opção de seguir apenas pelo modal rodoviário.

Modelo de otimização

A rede de transporte para o fluxo de escoamento de soja – sentido exportação – terá origem nos municípios produtores (centros de produção), poderá passar ou não por pontos intermediários de transbordo nos terminais intermodais propostos e ponto final no porto de

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

exportação, tendo alternativas modais para ligar os nós da rede logística. Conforme descrevem Kazemi e Szmerekovs (2015), a armazenagem nos locais de transbordo é feita em curto período; a operação tem o objetivo de transferir a carga para outro modal, dessa forma, os locais de transbordo são definidos como pontos de estoque zero.

O modelo foi elaborado com base na técnica de otimização, utilizando a programação linear como ferramenta; dessa forma, aplicou-se os conceitos de programação linear fundamentando-se no problema de transporte e no problema de transbordo (ARENALES *et al.*, 2011; FÁVERO; BELFIORE, 2013; HILLER; LIEBERMAN, 2006). O modelo de otimização linear terá o objetivo de minimizar o custo global de transporte, portanto, será composto pelos custos de transporte no modal rodoviário até o porto exportador ou até o terminal intermodal, pelos custos de transbordo intermodal e pelos custos no modal hidroviário e ferroviário realizados do terminal até o porto. Abaixo (Eq. 1), está a função objetivo Z:

$$\mathrm{Z} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} SMP_{ij} * DMP_{ij} * CR_{ij} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} SMT_{ik} * DMT_{ik} * CT_{ik} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} SMT_{ik} * TR_{k} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J} ST_{kj} * DT_{kj} * CI_{kj} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{J}} SMP_{\mathrm{ij}} + \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{K}} \mathrm{SMT_{ik}} = \mathrm{PRO}_i, \qquad \text{para todo I} \quad (2)$$

$$\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{I}} SMP_{\mathrm{ij}} + \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{K}} \mathrm{ST_{kj}} = \mathrm{EXP}_j, \qquad \text{para todo J} \quad (3)$$

$$\sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{K}} \mathrm{SMT_{ik}} - \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{K}} \mathrm{ST_{kj}} = 0, \qquad \text{para todo K} \quad (4)$$

Onde:

i : Municípios produtores de grãos de soja, $i \in l$;

j : Porto de exportação de grãos de soja, $j \in J$;

k : Terminais de transbordo intermodal de grãos de soja, $k \in K$;

l : Conjunto associado às origens (municípios produtores);

J : Conjunto associado aos portos de exportação;

K : Conjunto associado aos terminais de transbordo intermodal;

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

CR_{ij} : Custo de transporte rodoviário em reais por tonelada, com origem no município produtor i e com destino ao porto exportador j;

CT_{ik} : Custo de transporte rodoviário em reais por tonelada, com origem no município produtor i e com destino ao terminal de transbordo intermodal k;

CI_{kj} : Custo de transporte em reais por tonelada, com origem no terminal de transbordo intermodal k e com destino ao porto exportador j;

DMP_{ij} : Distância em quilômetros entre o município produtor i e o porto exportador j;

DMT_{ik} : Distância em quilômetros entre o município produtor i e o terminal de transbordo intermodal k;

DT_{kj} : Distância em quilômetros entre o terminal de transbordo intermodal k e o porto exportador j;

EXP_{j} : Exportação total de grãos do porto exportador j em toneladas por ano;

PRO_{i} : Produção total de grãos de soja destinados à exportação dos municípios produtores i em toneladas por ano;

SMP_{ij} : Fluxo de grãos em toneladas no modal rodoviário, com origem no município produtor i e com destino ao porto exportador j;

SMT_{ik} : Fluxo de grãos em toneladas no modal rodoviário, com origem no município produtor i e com destino ao terminal de transbordo intermodal k;

ST_{kj} : Fluxo de grãos em toneladas, com origem no terminal de transbordo intermodal k e com destino ao porto exportador j;

TR_{k} : Custo para operação de transbordo no terminal intermodal rodo-hidro k em reais por tonelada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão os resultados da modelagem desenvolvida. Vale ressaltar que os dados monetários foram atualizados conforme o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA (IBGE, 2021b), cujo acumulado para correção foi de 13% para o ano de 2021. Na formação da rede de transporte, no cenário que faz uso do modal hidroviário, foram determinados os terminais hidroviários que melhor contribuem para o escoamento da produção agrícola, considerando o critério de movimentação anual mínima. No processo de otimização, admitiu-se que a oferta de terminais hidroviários disponíveis é alterada até que todos os terminais rodo-hidro disponíveis alcancem a movimentação mínima com o menor custo total, sendo esses terminais hidroviários determinados como resultado da otimização do custo total, obtendo-se a melhor configuração de rotas. Para verificação dos resultados obtidos após a redução dos terminais hidroviários, o modelo é novamente otimizado; com os valores se mantendo, pode-se deduzir, então, como resultado satisfatório. Dessa forma,

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

a seguir estão apresentados os resultados e discutidos por Estado e, na sequência, para toda a rede de transporte e por tipo de cenário.

Para escoar 563.442 toneladas de soja do Estado do Pará, o cenário que fez uso da intermodalidade apresentou um resultado com menor valor final. Neste panorama de transporte hidroviário de média restrição até Santana do Araguaia, obteve-se a redução de 42% em relação aos custos do cenário-base 2019.1, como mostra a **Tabela 1.** Além disso, a economia total foi de R$ 39.050.236,81 para escoar a produção de soja do Estado.

Tabela 1. Resultado monetário e redução do custo para escoar a produção de soja por Estado.

Cenário	Estado do Pará	Redução	Estado do Tocantins	Redução
2019.1	R$ 92.181.787,12		R$ 406.703.841,57	
2019.2	R$ 82.837.810,82	10%	R$ 403.810.420,20	0,71%
2019.3	R$ 78.297.166,85	15%	R$ 394.771.683,51	2,93%
2019.4	R$ 53.131.550,31	42%	R$ 330.915.595,51	18,63%
2019.5	R$ 65.002.868,99	29%	R$ 382.650.807,97	5,91%

Como resultado, no cenário 2019.1, a produção de soja do Pará foi escoada tanto pelo modal rodoviário quanto através da Ferrovia Norte-Sul. Desse modo, 30,4% da produção foi escoada pela ferrovia. Já em 2019.2, apenas um município enviou por rodovia, os outros centros de produção optaram pelo transporte intermodal. Em seguida, no cenário 2019.3, quando adicionada a alternativa hidroviária até o terminal de Santa Isabel, passa a se escoar 66% da produção pelos terminais hidroviários. Ademais, os resultados de 2019.4 e 2019.5 demonstraram que a composição da rede de transporte consistiu, na maior parte, por modo hidroviário, com complementação do modo rodoviário, sem utilizar o modal ferroviário.

Os centros de produção que apresentaram menor diferença de custo do frete na configuração de rotas com melhor desempenho geral, o cenário 2019.4, em relação ao cenário-base 2019.1. Foram Tucumã, com 20,08%; São Felix do Xingu, com 18,9%; e de 11% em Rondon do Pará. Todavia, Rondon do Pará tem a segunda menor distância rodoviária até o porto no cenário 2019.1, sendo que Tucumã e São Felix do Xingu estão longe da margem da hidrovia. As maiores diferenças entre os valores de frete nos diferentes cenários ocorreram em Santana do Araguaia e Santa Maria das Barreiras, com diminuições de 49% e 51% nos custos de transporte, respectivamente. Os dois municípios têm predominância do modo hidroviário no cenário 2019.4, e estão próximos da hidrovia, bem como são os centros de produção mais distantes do porto.

Ainda no Estado do Pará, o custo total em relação à movimentação de soja no cenário 2019.1, ou seja, o valor para o transporte de uma tonelada de soja, resultou em 163,60 R$/t. No cenário 2019.2 foi de 147,02 R$/t, em 2019.3 o valor de 138,96 R$/t, em 2019.4 foi de 94,30 R$/t e em 2019.5 de 115,37 R$/t. Ademais, levando em consideração os valores de cada rota, o frete médio dos municípios para escoar a soja até o porto no cenário 2019.1

resultou em 142,89 R$/t; no cenário 2019.2 em 134,78 R$/t; em 2019.3 resultou em 115,97 R$/t; em 2019.4 resultou em 98,96 R$/t, e no cenário 2019.5, a média foi de 108,34 R$/t. Portanto, o cenário 2019.4 se apresentou com os menores valores.

Para o Estado do Tocantins, no cenário 2019.1 apenas um município não escoa produção de soja pelo modal ferroviário através da Ferrovia Norte-Sul. Em seguida, 10,3% da produção passa a ser escoada pela Ferrovia Paraense em 2019.2. Posteriormente, em 2019.3, cerca de 34,1% da soja passa a ser escoada pelos terminais hidroviários. Já o cenário 2019.4, toda a produção passa a ser escoada pela hidrovia, com isso, a maior parcela dos custos é formada pela soma das despesas de transbordo intermodal rodo-hidro mais as do transporte hidroviário. Neste cenário, a Ferrovia Paraense deixa de ser opção para escoar a produção do Estado do Tocantins. Em 2019.5, os custos se elevam em relação ao cenário de 2019.4 e se transporta 41,3% da soja pela FNS.

Dentre os municípios a maior diferença entre os valores para escoar da soja no Estado do Tocantins ocorreu em Caseara, com a diminuição de 53,9% nos custos de transporte. Dessa forma, o município tem predominância do modal hidroviário no cenário 2019.4, e está próximo ao terminal hidroviário de Santana do Araguaia.

Ainda no Estado do Tocantins, o custo total em relação à movimentação de soja no cenário 2019.1, ou seja, o valor para o transporte de uma tonelada desse produto resultou em 170,04 R$/t. No cenário 2019.2, esse custo foi de 169,10 R$/t, em 2019.3 resultou em 165,31 R$/t; já em 2019.4 foi de 138,57 R$/t, e no cenário 2019.5 de 160,24 R$/t. Além disso, levando em consideração os valores de cada rota, o custo médio dos municípios para transportar a soja até o porto, no cenário 2019.1, resultou em 162,31 R$/t; em 2019.2 foi de 161,85 R$/t; no cenário 2019.3 o valor de 152,38 R$/t; já em 2019.4 foi de 128,95 R$/t, e em 2019.5, a média foi de 151,37 R$/t. Portanto, o cenário 2019.4 apresentou resultados com os menores valores.

Área total

Em relação aos resultados totais dos cenários para toda a região geográfica abordada neste trabalho, o cenário que fez uso da intermodalidade com a hidrovia apresentou um resultado com menor custo de frete. Com isso, o cenário 2019.4, com transporte hidroviário considerado com média restrição até a divisa Pará - Mato Grosso, apresentou uma redução de 23% em relação aos custos do cenário 2019.1, obtendo-se, então, uma economia total de R$ 114.838.482,87 no valor total de custo para escoar a produção de soja. A **Tabela 2** apresenta a movimentação nos terminais.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Tabela 2. Envio de soja (em toneladas) para estações de transbordo.

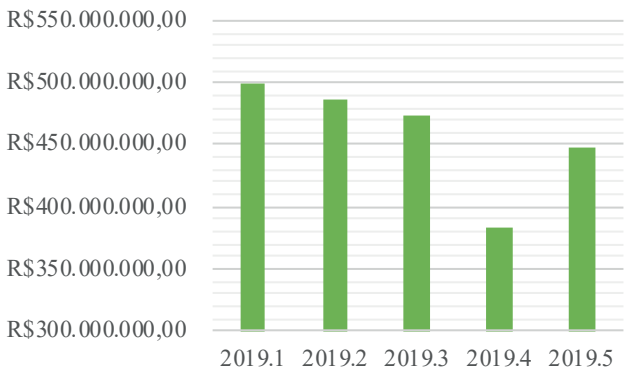
Terminal	2019.1	2019.2	2019.3	2019.4	2019.5
H* - Marabá			429.705,00	123.280,00	165.240,00
H - Santa Isabel			756.421,00	317.849,00	60.948,00
H - Santa Fé do A.				63.135,00	
H - Floresta do A.					76.267,00
H - Conceição do A.				440.441,00	316.638,00
H - Santa Maria das Barreiras				325.868,00	308.815,00
H - Santana do A.				1.680.901,00	1.037.228,00
F** - Marabá		96.923,00			
F - Santana do A.		598.881,00	379.281,00		
F - Porto Franco	388.254,00	388.254,00	377.955,00		262.140,00
F - Palmeirante	679.163,50	356.249,00			56.958,00
F - Porto Nacional	1.490.797,58	1.406.167,00	1.386.067,00		667.240,00

* Terminal Hidroviário
** Terminal Ferroviário

O segundo cenário com maior redução foi 2019.5, que considerou a hipótese de parte da hidrovia ter alta restrição, obtendo uma economia de R$ 51.231.951,73, o que representa uma redução de 10,3% em relação a 2019.1. Ademais, o cenário 2019.2, que apresenta apenas a alternativa ferroviária, ainda obteve economia de R$ 12.237.397,67.

Além disso, analisando o custo total por tonelada de soja transportada, observa-se que, no cenário 2019.1, o valor para o transporte de uma tonelada de soja resultou em 169,03 R$/t, enquanto em 2019.2 foi de 164,88 R$/t, em 2019.3 o valor de 160,28 R$/t, de 130,12 R$/t no cenário 2019.4 e de 151,67 R$/t em 2019.5. A Figura 3 apresenta os resultados gerados pelo modelo, referentes ao custo total da rede de transporte, resultantes em cada cenário desta pesquisa.

Figura 3. Resultado monetário em cada cenário – 2019.



Pela Tabela 3 verifica-se o redirecionamento das exportações de soja para Vila do Conde. Assim, devido à inclusão das alternativas intermodais, a maior parte da soja passa a ser exportada pelo Estado do Pará. Com isso, quando modificada a infraestrutura, tem-se a expansão da área de influência do complexo portuário de Vila do Conde, com um amento da quantidade de soja exportada em até 650,51%.

Tabela 3. Exportação de soja por complexo portuário.

	Vila do Conde		Itaqui	
Cenário	**Toneladas**	**%**	**Toneladas**	**%**
2019.1	393.260,00	13,3	2.558.214,00	86,7
2019.2	800.804,00	27,1	2.150.670,00	72,9
2019.3	1.565.407,00	53,0	1.386.067,00	47,0
2019.4	2.951.474,00	100,0		0,00
2019.5	1.965.136,00	66,6	986.338,00	33,4

CONCLUSÃO

O modelo de programação linear então proposto possibilitou chegar a resultados satisfatórios e que permitem analisar as alternativas modais de transporte para o escoamento de grãos de soja da região. Assim, na produção do Estado do Pará, no cenário-base de 2019.1, cerca de 30% da soja foi escoada pela Ferrovia Norte-Sul, demonstrando a baixa área de influência do complexo portuário de Vila do Conde, para parte dos municípios localizados no próprio Estado do porto.

Entretanto, no primeiro cenário, com a nova alternativa intermodal, o projeto da Ferrovia Paraense – FPA, 98,32% da produção do Estado do Pará passou a ser exportada pelo porto da região, além de obter redução de 10,1% no frete por tonelada movimentada no Estado. No cenário 2019.3, a redução foi menor em relação a 2019.2, indicando certa competividade entre o transporte pela hidrovia e pela FPA nos terminais localizados na cidade de Marabá, apesar de que a opção hidroviária se mostrou como melhor rota. Em seguida, o cenário 2019.4 apresentou-se como o mais benéfico para os municípios do Estado, com economia de 42%. Já o cenário 2019.5 mostrou-se menos competitivo que o 2019.4. Todavia, é o segundo cenário com maior economia, em relação a 2019.1. Portanto, conclui-se que a hidrovia trará maiores benefícios para o Estado do Pará.

Outrossim, o Estado do Tocantins obteve as melhores economias nos cenários 2019.4 e 2019.5, com 18,6% e 5,9% de redução em relação ao cenário-base 2019.1. Com isso, evidencia-se que a maior parte dos municípios da região apresentaram bons resultados econômicos quando utilizada a hidrovia. Além disso, no cenário 2019.3, o terminal hidroviário de Santa Isabel é o que mais recebeu soja para escoar a produção do Estado, então, observa-se que uma alternativa intermodal começa a ser consideravelmente benéfica para a região a partir de Santa Isabel. Ademais, no cenário 2019.5, mesmo o Terminal da FPA de Santana do Araguaia sendo competitivo, a preferência foi pelo terminal hidroviário do município. Portanto, a hidrovia se mostrou a mais benéfica em Tocantins, tanto até Santa Isabel quanto até Santana do Araguaia, mesmo quando se tem alta restrição na hidrovia.

Entre a FNS, FPA e a Hidrovia, os menores fretes por tonelada transportada referem-se ao modal aquaviário. No entanto, quanto menor a distância percorrida na hidrovia, maior

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

peso tem o custo de transbordo Rodo-Hidro, chegando a compor 49% no cenário 2019.3. Outro aspecto importante é que os municípios distantes dos portos e próximos à hidrovia obtiveram maior economia, como é o caso de Santana do Araguaia – PA e Caseara – TO. Logo, a distribuição dos terminais intermodais ao longo da hidrovia proporcionará o melhor arranjo de rotas. Desse modo, conclui-se a necessidade de implantar terminais hidroviários de baixo custo de transbordo e que possam operar com menor movimentação anual, a fim de aumentar a oferta de terminais na hidrovia para que os municípios tenham em suas proximidades algum ponto de transbordo rodo-hidro, que contribuirá com menores custos para escoar a produção, e assim, tornando a região mais competitiva.

Ainda conforme os resultados obtidos, se implantada a hidrovia, o complexo portuário de Vila de Conde poderá ter aumento da exportação de soja em até 650%. Ademais, as alternativas intermodais propostas – a Ferrovia Paraense e a Hidrovia Araguaia-Tocantins – apresentam participação de 53% no cenário 2019.3 até a Hidrovia atingir 100% do total de soja transportada em 2019.4. Entretanto, a FNS só não detém parte da movimentação no cenário 2019.4, quando se considera média restrição para o custo hidroviário. Logo, para o Estado do Pará, as alternativas modais, além de oferecerem maior economia, também direcionaram as exportações para o complexo portuário de Vila do Conde, o que deverá trazer benefícios econômicos, como investimentos no complexo portuário.

Outrossim, as diferenças entre os cenários sinalizam que as localidades que ainda não dispõem de uma alternativa intermodal são as que obterão maior benefício. Portanto, conclui-se que, a montante de Marabá, deve-se dar preferência de implantação ao rio Araguaia, pois ele traria maiores ganhos competitivos na sua região de influência, do que em relação ao rio Tocantins, nos municípios próximos dele – onde já se tem a opção pela FNS. Além disso, avaliando as diferenças entre os resultados com média restrição na hidrovia e aqueles com parte dela com alta restrição, entende-se a necessidade de se implantar todas as obras previstas a fim de minimizar as restrições à navegação na hidrovia.

Por fim, considerando os resultados dos cenários para escoar a produção de soja dos Estados do Pará e do Tocantins, se não for implantada nenhuma alternativa intermodal, a tendência será o aumento de gastos com transporte ao longo dos anos. Concluindo, os resultados indicaram que a hidrovia é a melhor opção, bem como diminui o fluxo de caminhões no corredor rodoviário, além de contribuir com o desenvolvimento regional.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

REFERÊNCIAS

AGETO – AGÊNCIA TOCANTINENSE DE TRANSPORTES E OBRAS. **Mapa Rodoviário 2020**. 2020. Disponível em: https://www.to.gov.br/seinf/mapas-rodoviarios/28sxwjwwyhse. Acesso em: 07 abr. 2021.

ANTAQ. **Relatório Executivo**: bacia do Tocantins-Araguaia. [*S. l.*]: ANTAQ, 2013. Disponível em: http://web.antaq.gov.br/portalv3/PNIH/BaciaTocantinsAraguaia.pdf. Acesso em: 04 mar. 2021.

ANTAQ. **Estatísticos Aquaviário**. Disponível em: http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/. Acesso em: 20 mar. 2021.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRES. **Resolução nº 5.835, de 20 de novembro de 2018.** Altera o Anexo II da Resolução ANTT nº 5.820, de 30 de maio de 2018, em razão o disposto no §3º do art. 5º da Lei nº 13.703, de 8 de agosto de 2018.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. e YANASSE H**. Pesquisa Operacional:** para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

BRASIL. **Apoio ao licenciamento ambiental do Pedral do Lourenço: dragagem e derrocamento da via navegável do rio Tocantins. Dragagem e Derrocamento da Via Navegável do Rio Tocantins**. Disponível em: https://www.ppi.gov.br/apoio-ao-licenciamento-ambiental-do-pedral-do-lourenco-dragagem-e-derrocamento-da-via-navegavel-do-rio-tocantins. Acesso em: 07 dez. 2020.

CNA. **Panorama do Agro**. 2020. Disponível em: https://www.cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro. Acesso em: 05 fev. 2021.

CNT. **CNT apresenta perspectivas para o futuro da logística brasileira na Intermodal**. Disponível em: https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-apresenta-perspectivas-futuro-logistica-brasileira-intermodal. Acesso em: 16 fev. 2021.

COMEX STAT. **Exportações e Importações Geral**. Disponível em: http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral. Acesso em: 05 maio 2021.

CONAB. **Estimativa do escoamento das exportações do complexo soja e milho pelos portos nacionais**: safra 2016/2017. Brasília: Conab, v. 6, 2017.

CRUZ, R. N. **Utilização do método híbrido AHP-TOPSIS para a escolha modal do escoamento da produção de soja do polo Paragominas/pa**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Hidrovias – Tocantins/Araguaia**. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/

DNIT. **Mapas multimodais – PA**. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/sistema-nacional-deviacao/sistema-nacional-de-viacao?b_start:int=20. Acesso em 15 fev. 2021

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Caminhos da safra da produção e exportação de grãos 2015/16**. 2016. Disponível em: https://www.embrapa.br/macrologistica/caminhos-da-safra. Acesso em: 15 fev. 2021.

EPL. **Plano Nacional de Logística**. [2021a]. Disponível em: https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl. Acesso em: 16 fev. 2021.

EPL. **Simulador de Custo de Transporte**. [2021b]. Disponível em: https://www.epl.gov.br/ Acesso em: 03 mar. 2021.

EPL. **Manual:** metodologia de custos de transporte. Metodologia de Custos de Transporte. [2021c]. Disponível em: https://www.epl.gov.br/manual-metodologia-de-custos-de-transporte. Acesso em: 07 fev. 2021.

FAEPA – FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO PARÁ. **Agronegócio Paraense**. Disponível em: http://sistemafaepa.com.br/faepa/agronegocio-paraense/. Acesso em: dez. 2020.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

FIORONI, M. M.; FRANZESE, L. A. G.; SANTANA, I. R. de; LELIS, P. E. P.; SILVA, C. B. da; TELLES, G. D.; QUINTÁNS, J. A. S.; MAEDA, F. K. e VARANI, R. From farm to port: simulation of the grain logistics in Brazil. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE (WSC), 2015, Huntington Beach. **Proceedings [...].** Huntington Beach: Winter Simulation Conference (Wsc), 2015. p. 1936-1947.

GAMS. **GAMS**. Disponível em: https://www.gams.com/. Acesso em: fev. 2021.

HALIM, R. A.; KWAKKEL, R. A. e TAVASSZY, L. A. A strategic model of port-hinterland freight distribution networks. **Transportation Research Part e**: Logistics and Transportation Review, [*s. l.*], v. 95, p. 368-384, nov. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.014.

HILLER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal: Produção Agrícola - Lavoura temporária - Soja (em grão) - 2019**. [2021a]. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. Acesso em: maio. 2021.

IBGE. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**. [2021b]. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=o-que-e. Acesso em: jun. 2021.

KAZEMI, Y.; SZMEREKOVSKY, J. Modeling downstream petroleum supply chain: the importance of multi-mode transportation to strategic planning. **Transportation Research Part e**: Logistics and Transportation Review, [*s. l.*], v. 83, p. 111-125, nov., 2015. Elsevier BV.

KUSSANO, M. R. **Proposta de modelo de estrutura do custo logístico do escoamento da soja brasileira para o mercado externo: o caso do Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

KUSSANO, M. R.; BATALHA, M. O. **Custos logísticos agroindustriais: avaliação do escoamento da soja em grão do Mato Grosso para o mercado externo**. Revista Gestão & Produção. São Carlos, v. 19, n. 3, p. 619-632, 2012.

LIN, X.; RUESS, P. J.; MARSTON, L.; KONAR, M. Food flows between counties in the United States. **Environmental Research Letters**, [*s. l.*], v. 14, n. 8, p. 084011, 26 jul. 2019. IOP Publishing.

OLIVEIRA, V. H. P. de. **Análise de alternativas intermodais para escoar a produção de soja dos Estados do Pará e Tocantins**. 2021. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

OLIVEIRA, V. H. P. de; TOBIAS, M. S. G.; ROCHA, M. P. da C. da; FARIAS, V. J. da C.; SOUZA, M. M. de. Optimization method for the analysis of intermodal alternatives to transport soybean production in the states of Pará and Tocantins, Brazil. [2021a]. **International Journal of Development Research**. v. 11, p. 51912-51918, nov. 2021.

OLIVEIRA, V. H. P. de *et al*. Optimization method applied to decision-making on intermodal alternative for soybean outflow in the State of Pará-Brazil. [2021b]. **International Journal For Innovation Education And Research**, [*s. l.*], v. 9, n. 7, p. 124-140, 1 jul. 2021. http://dx.doi.org/10.31686/ijier.vol9.iss7.3103.

SEDEME - SECRETÁRIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, MINERAÇÃO E ENERGIA. **Estudo de Impacto Ambiental**: Ferrovia Paraense S.A. Belém: Sedeme, 2017. 1 v.

SIMÕES, D. da C.; CAIXETA-FILHO, J. V.; PALEKAR, U. S. Fertilizer distribution flows and logistic costs in Brazil: changes and benefits arising from investments in port terminals. **International Food And Agribusiness Management Review**, [*s. l.*], v. 21, n. 3, p. 407-422, 20 mar. 2018. Wageningen Academic Publishers.

SOUZA, M. M.; ROCHA, M. P. C.; FARIAS, V. J. C.; TAVARES, H. R. Optimization of soybean outflow routes from Mato Grosso, Brazil. **International Journal for Innovation Education and Research**, [*s. l.*], v. 8, p.176-191, 2020.

SUDAM – SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA (org.). **Microeixos do transporte de cargas dos Estados de Roraima e Tocantins**: relatório executivo. Belém: Sudam, 2016.

UNITAPAJÓS. **Nossa Atuação**. Valores máximos de referência de tarifa de serviço. Disponível em: https://www.unitapajos.com.br/page/atuacao#atuacao-tres. Acesso em: 03 jun. 2021.

VLI. **Ferrovia Norte Sul - FNS**. [2021a]. Disponível em: https://www.vli-logistica.com.br/conheca-a-vli/ferrovias/ferrovia-norte-sul-fns/. Acesso em: 07 jun. 2021.

VLI. **Tarifa praticada**. [2021b]. Disponível em: https://www.vli-logistica.com.br/conheca-a-vli/tarifa-praticada/. Acesso em: 07 jun. 2021.

11

Modelagem e simulação de eventos discretos: um estudo de caso da logística do transporte da soja na hidrovia do rio Madeira

Carolina Costa Ramos
Universidade Federal do Pará - UFPA

Kadu Naoki Ishikawa
Universidade Federal do Pará - UFPA

Ana Clara Souza Sabino
Universidade Federal do Pará - UFPA

Gustavo do Nascimento Tocantins
Universidade Federal do Pará - UFPA

Marcus Pinto da Costa da Rocha
Universidade Federal do Pará - UFPA

Valcir Jõao da Cunha Farias
Universidade Federal do Pará - UFPA

André Vinicius da Costa Araújo
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221111027

RESUMO

O Brasil apresentou um crescimento significativo ao longo dos anos no mercado internacional do agronegócio, sendo o maior produtor mundial de soja, com uma produção de 135,4 milhões de toneladas na safra 2020/21. No entanto, a logística ainda é um obstáculo para a competitividade do país no mercado mundial, resultando em elevados custos de produção e transporte. A demanda pela utilização da hidrovia do rio Madeira vem crescendo ao longo dos anos, se tornando um dos principais eixos logísticos do norte do país. Por meio de modelagem e simulação de eventos discretos será realizada uma análise operacional do transporte de soja adaptado às características de transporte fluvial na hidrovia do rio Madeira, identificando os principais fatores críticos da logística fluvial, que permitam a compreensão do processo e buscando a maximização do transporte. A simulação discreta é normalmente utilizada para avaliar e/ou analisar o desempenho dos sistemas de produção ou de serviços, principalmente aqueles mais complexos, onde vários eventos, dependentes entre si, ocorrem ao mesmo tempo. Os dados de entrada no modelo serão coletados e tratados estatisticamente, antes de serem implementados no modelo computacional. O *Software ProModel* será utilizado na construção desse modelo, devido a interface gráfica e a possibilidade de construção de modelos estocásticos baseados em Simulação de Eventos Discretos (SED). Para a construção do modelo computacional, será definida e implementada uma série de parâmetros, dentre eles: número de comboios, tipo de embarcação, carga transportada, rotas de transporte e outros. E por meio da comparação de cenários, seja possível um dimensionamento mais adequado, dentro das especificações existentes no sistema real, obtendo-se uma maior racionalização dos recursos disponíveis. O modelo permitirá a representação de diferentes cenários devido a abrangência do sistema utilizado.

Palavras-chave: Soja, Transporte Fluvial, SED, Cenários.

INTRODUÇÃO

O Brasil apresentou um crescimento significativo ao longo dos anos no mercado internacional do agronegócio, sendo o maior produtor mundial de soja, com uma produção de 135,4 milhões de toneladas na safra 2020/21. No entanto, a logística ainda é um obstáculo para a competitividade do país no mercado mundial, resultando em elevados custos de produção e transporte (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2022). Essa deficiência logística é resultado de diferentes de fatores, como o excesso de burocracia, falta de infraestrutura dos portos, ausência de terminais intermodais, más condições das estradas e linhas ferroviárias com bitolas diferentes e com extensão limitada. As barreiras encontradas nesse processo, podem ser reduzidas pela adequação dos modais de transporte, desde que estrategicamente planejada (ASSIS, C.P.; COSTA, L.D.V.; HIRASSAKA, S.A., 2019; GONÇALVES, *et al.*, 2021). Como uma solução viável e competitiva aos sojicultores de parte do Mato Grosso, maior região produtora do grão no país, a utilização do modal hidroviário é uma alternativa de integração do transporte na cadeia de distribuição.

A demanda pela utilização da hidrovia do rio Madeira vem crescendo ao longo dos anos, se tornando um dos principais eixos logísticos do norte do país. Esse processo teve início com a implantação da nova fronteira agrícola de soja e milho na região Centro-Oeste do Brasil, integrando a região aos grandes portos ao longo do rio Amazonas, por onde essas cargas podem ser exportadas. A carga a granel, proveniente das plantações de Mato Grosso e do sul de Rondônia, é transportada pela BR-364, em caminhões até Porto Velho, onde os comboios graneleiros são carregados seguindo viagem para o terminal de Itacoatiara/AM ou Santarém/PA.

Dentre os tipos de mercadorias transportadas pela hidrovia do rio Madeira, além da produção agrícola de grãos sólidos, tem os derivados líquidos de petróleo (gasolina, OD e GLP) e etanol. E as cargas gerais, transportadas por meio de balsas designadas como “rô-rô caboclo”, denominação regional dada à operação “roll-on-roll-off”, cuja estrutura é feita com chatas de convés corrido onde é realizado o transporte de carretas semirreboque do tipo baú e pessoas (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2021; SANTOS, 2019). Em 2020 a movimentação de cargas na hidrovia representou 9,9 milhões de toneladas (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, 2020).

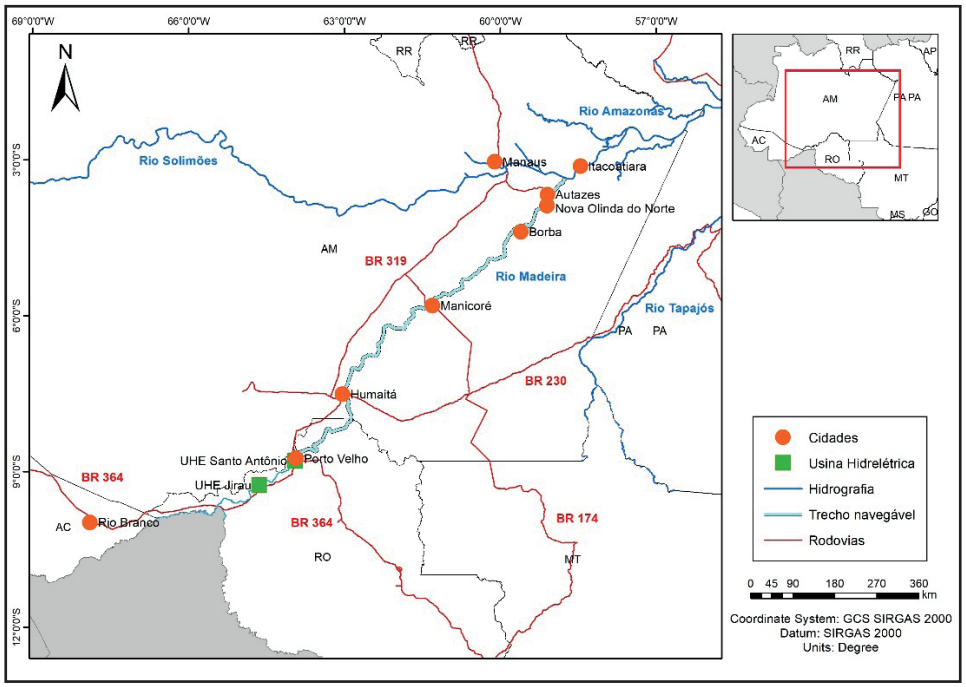
Com base nessas considerações, objetivo desse trabalho é realizar uma análise operacional do transporte de soja por meio de modelagem e simulação. Esse modelo será adaptado às características de transporte fluvial na hidrovia do rio Madeira, identificando os principais fatores críticos da logística fluvial, que permitam a compreensão do processo e buscando a maximização do transporte.

DETALHAMENTO DO CASO

Área de estudo

O rio Madeira é um dos principais afluentes da margem direita da hidrovia do rio Amazonas, representando a segunda hidrovia mais importante da região norte. Segundo o DNIT (2021) a hidrovia do rio Madeira apresenta uma extensão navegável de 1.060 km, entre Porto Velho e a foz, localizada no município de Itacoatiara (AM). Essa extensão está distribuída em aproximadamente 180 km dentro dos limites do estado de Rondônia e 876 km no estado do Amazonas. O rio é navegável durante todo o ano, permitindo o tráfego de comboios de barcaças de carga com até 18 mil toneladas (DNIT, 2021). O ciclo sazonal das águas é caracterizado por períodos de estiagem, ou de águas baixas, de julho a outubro, e o período de cheias ou de águas altas, que vai de fevereiro a maio (LOPES, 2018). Durante o período de cheias, o rio Madeira sofre influência do rio Amazonas, ocasionando em grandes áreas de inundação e elevadas profundidades, alagando os afloramentos rochosos e ilhas que afloram na estiagem nos trechos mais a jusante do rio. No período seco surgem obstáculos, como bancos de areia, afloramentos rochosos e corredeiras em alguns trechos da extensão do rio, que apesar de não interromperem a navegação, aumentam o tempo de viagem e os riscos para a navegação (DNIT, 2021). Devido a dinâmica hidrológica do rio a capacidade de carregamento das embarcações é afetada. Esse processo pode resultar em reduções gerais da tonelagem de mais de 70% em comparação com as operações normais (CREECH *et al.*, 2021).

Figura 1. Mapa Trecho navegável do rio Madeira



Fonte: Autor

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Simulação de eventos discretos

Nos sistemas de eventos discretos, as mudanças de estado ocorrem em pontos específicos no tempo. O objetivo de um modelo de simulação de eventos discretos é reproduzir as atividades das entidades que compõem um sistema e, a partir daí, conhecer o comportamento e desempenho do sistema. Então, simulação de eventos discretos é aquela em que a mudança de estado da entidade (caraterizada por variáveis) acontece instantaneamente e é determinada pelos valores de suas variáveis ao passar por um evento (HILLIER E LIEBERMAN, 2013; SOARES, 2018).

A simulação discreta é normalmente utilizada para avaliar e/ou analisar o desempenho dos sistemas de produção ou de serviços, principalmente aqueles mais complexos, onde vários eventos, dependentes entre si, ocorrem ao mesmo tempo. Chwif e Medina (2014) descrevem a simulação de eventos discretos como aquela em que as mudanças no estado das variáveis ocorrem em pontos discretos do tempo, por meio da ocorrência de um evento (SOARES, 2018).

Poucos sistemas, na prática, são totalmente contínuos ou discretos. Desse modo, é comum considerar, durante a modelagem, o modo predominante de ocorrência dos eventos do sistema em questão (SAKURADA e MIYAKE, 2009; SOARES, 2018).

Os softwares comerciais mais conhecidos nessa área são o ARENA© e o PROMODEL© que possuem versões educacionais gratuitas.

Aplicação da simulação de eventos discretos

A simulação é a representação virtual de um sistema da vida real por meio de um modelo, tornando possível sua análise, sem a necessidade de construí-lo na efetivamente. Chwif e Medina (2014) afirmam que a simulação de eventos discretos é utilizada para modelar sistemas que mudam o seu estado em momentos discretos no tempo, a partir da ocorrência dos eventos.

A implementação de simulações no planejamento de sistemas logísticos é em decorrência da complexidade das operações. Não apenas pela interação entre suas etapas, mas também pelas restrições de execução e operacionalidade. O modelo computacional permite o ajuste de parâmetros, para que o modelo seja avaliado em diferentes cenários, permitindo soluções reais para o problema.

Os dados de entrada no modelo serão coletados e tratados estatisticamente, antes de serem implementados no modelo computacional. O *Software ProModel* será utilizado na construção desse modelo, devido a interface gráfica e a possibilidade de construção de modelos estocásticos baseados em Simulação de Eventos Discretos (SED). Para a construção

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

do modelo computacional, será definida e implementada uma série de parâmetros, dentre eles: número de comboios, tipo de embarcação, carga transportada, rotas de transporte e outros. Segundo Sargent (2011) é necessário assegurar que o software e as especificações para a programação e execução do modelo conceitual estejam corretos e para a validação é necessário que o modelo tenha um alcance satisfatório de precisão, compatível com o modelo pretendido. Com o modelo verificado e validado, pode-se obter os parâmetros de saída do modelo, ou seja, aquelas medidas de desempenho que servirão para as análises dos cenários propostos, bem como para ajustes e sugestões ao modelo.

DISCUSSÃO

Um fator relevante nas projeções de cenários é a necessidade de investimentos em setores de transportes multimodais, sobretudo para os trechos de longas distâncias e os custos adicionais poderão ser discutidos posteriormente com os resultados, bem como a capacidade da hidrovia inserida nos cenários. A partir da análise conjunta dos cenários e projeções obtidas será possível buscar alternativas mais efetivas para a redução de custos e melhoramento da logística da soja.

As principais regiões produtoras de soja no Brasil são: Região Centro-Oeste, Sul e MATOPIBA, que juntas correspondem a 90% da produção da soja. A partir do custo médio por tonelada transportada, que é aproximadamente R$170,00/tonelada transportada, da origem até o destino, podemos inferir cenários que podem representar as possíveis reduções ou acréscimos no sistema representado, servindo de base para tomadas de decisão quanto a alocação e utilização de determinadas rotas (SALIN, 2017).

A análise sistêmica do processo de logística de transporte da soja brasileira, o que a pesquisa propõe, busca a redução de custos, otimização de processos e melhoria do desempenho do sistema real. Com posse dessas informações as empresas relacionadas ao setor poderão tomar decisões integradas com esses fatores para possibilitar a ampliação da capacidade dos navios e redução de filas e gargalos nos portos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa contribui com o conhecimento científico na utilização da SED como ferramenta de análise de decisão voltada ao ambiente estratégico. Dentre os resultados esperados, pretende-se obter um modelo baseado em simulações a eventos discretos, que represente uma análise dos elementos mais relevantes para o problema, e adaptá-lo às variadas condições operacionais, como ferramenta para auxiliar decisões relacionadas a estratégia logística do transporte de cargas destinado à exportação e assim potencializar

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

os investimentos em infraestrutura na região. E por meio da comparação de cenários, seja possível um dimensionamento mais adequado, dentro das especificações existentes no sistema real, obtendo-se uma maior racionalização dos recursos disponíveis. O modelo permitirá a representação de diferentes cenários devido a abrangência do sistema utilizado. Pretende-se correlacionar o modelo gerado a fatores ambientais e climáticos, uma vez que há uma crescente preocupação com os impactos das mudanças climáticas em diferentes setores da economia.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO (ANTAQ). Anuário Estatístico 2020. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2020. Disponível em: http://anuario.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/opendoc.htm?document=painel%5Cantaq%20-%20anu%C3%A1rio%202014%20-%20v0.9.3.qvw&lang=pt BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true. Acesso em: 20 Jan. 2022.

ASSIS, C.P.; COSTA, L.D.V.; HIRASSAKA, S.A. Infraestrutura logística brasileira de transporte e o impacto na escoação de grãos exportados pelo Brasil. Revista Caribeña de Ciencias Sociales, Out, 2019.

CHWIF, L.; MEDINA, A.C. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos, Teoria & publicações. 4. ed. São Paulo: Ed Campus-Elsevier, 2014.

CREECH, C. T., AMORIM, R. S., LAUTH, T. J., OSÓRIO, A. L. N. A. Development of a Sustainable Waterway Masterplan on an Amazon Megariver: The Madeira River, Brazil. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, USA, v. 147, n. 5, p. 502-1007, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Inicia novo ciclo de dragagem no Rio Madeira. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-novo-ciclo-de-dragagem-no-rio-madeira. Acesso em: 20 Jan. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Soja em números (safra 2020/21). Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 20 Jan. 2012.

MONTEIRO, M. G.; BRISOLA, M. V.; LEITÃO, F. O.; SILVA, W. H. da. Limitações e Problemas no Transporte Da Soja No Brasil. Limitations and problems in soy transport in Brazil. Informe GEPEC, [S.l], v.25, n.1, p. 261–283, 2021. Disponível em: https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/25650. Acesso em: 23 jan. 2022.

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: Cadernos De Arquitetura E Urbanismo, n.22, p.143–158, 2018. Disponível em: https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/25676. Acesso em: 23 Jan. 2022.

SALIN, D. Brazil Soybean Transportation Indicator Reports. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service. Março, 2017. Web.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: Winter Simulation Conference, 7., 2011, Phoenix. Anais.... Phoenix, AZ, USA p. 12-24.

SANTOS, A. J. dos. Transporte fluvial de carga de grãos do baixo madeira ao baixo amazonas. 2019. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2019.

12

Modelagem hidrodinâmica de trecho do Rio Madeira para avaliação de vetores de velocidade e escoamento

Lúcio Carlos Pinheiro Campos Filho
Universidade Federal do Pará - UFPA

Nelio Moura de Figueiredo
Universidade Federal do Pará - UFPA

Igor Henrique Coelho Alves
Universidade Federal do Pará - UFPA

10.37885/221110929

RESUMO

A Amazônia possui naturalmente uma vasta malha hidroviária com rios que possibilitam o transporte e a circulação de pessoas e mercadorias por toda a região. Além dessa vocação natural, a região amazônica é de imprescindível importância na movimentação de grãos pelo corredor logístico do Arco Norte, justificando a necessidade de estudos hidrodinâmicos em bacias hidrográficas da Amazônia. Este artigo, tendo por objetivo aferir parâmetros a serem utilizados na adoção de critérios normativos dimensionais, apresenta uma modelagem hidrodinâmica no rio Madeira, no trecho entre Porto Velho e Cujubim, com intuito de verificar comportamentos hidrodinâmicos e de aferir vetores de velocidade e padrões de para diferentes condições hidro climáticas em diversos períodos.

Palavras-chave: Modelagem Hidrodinâmica; Modelo Digital de Elevação; HEC-RAS.

INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento do volume de carga transportada no modal aquaviário, a navegação interior assume papel de destaque na busca de uma economia de escala no sistema de transporte, logo, o porte das embarcações que operam nas vias navegáveis interiores vem aumentando e, consequentemente, a eficiência nas operações portuárias e as adequações necessárias à via aumentam proporcionalmente (AHADI, 2018; SEGOVIA, 2019). No Brasil, estas vias navegáveis interiores estão sendo cada vez mais demandadas em decorrência, principalmente, do maior custo-benefício do transporte aquaviário em comparação aos outros modais de transportes (VIDAN, 2010). Entretanto, a segurança da navegação destas vias não se desenvolve na mesma velocidade (RUGGERI, 2018 & WATAI, 2018). Em virtude disso, como o volume de investimentos para implementação de infraestrutura necessárias em vias navegáveis interiores não acompanha o aumento de carga operadas nos portos brasileiros, a navegação interior vem se tornando um gargalo ao sistema logístico (PIANC, 2014; WANG, 2017; LIANG, 2019), necessitando cada vez mais de projetos, pesquisas e medidas a serem implementadas de modo a aprimorar as condições de navegação destas vias navegáveis interiores.

As condições de navegação em vias navegáveis interiores são função, quase que sempre, das dimensões do comboio e das características do canal de navegação, como profundidade, largura, posição de bancos de areia e de variáveis hidrológicas (ABRAHAM, 2010 & PAULAUSKAS, 2012). O emprego de ferramentas que auxiliam na análise dessas condições de navegação mostra um valor agregado considerável sobre os possíveis impactos econômicos, sociais e ambientais (TROJANOWSKI e IWAN, 2014). Para uma navegação economicamente sustentável na Amazônia, o conhecimento da flutuabilidade de níveis de água (NELIO & BLANCO, 2016) e das características hidrodinâmicas dos rios (HOLANDA *et al*., 2017), são de grande importância na análise de condições de navegabilidade de embarcações amazônicas.

Nesse sentido, destaca-se o uso da modelagem hidrodinâmica como ferramenta essencial para simular vetores de velocidade e escoamento, bem como o nível da água para previsão de inundações e avaliação de riscos de navegação (JIANG *et al*., 2019). Este tipo de análise depende diretamente da calibração do modelo hidráulico, que se baseia nos dados batimétricos pesquisados (por exemplo, elevação do leito do rio e geometria do canal) para geração do Modelo Digital de Elevação (DEM) (SCHNEIDER *et al*., 2017; JIANG *et al*., 2019).

Fazendo uso de Modelos Digitais de Elevação, evidenciam-se diversos estudos na literatura que realizaram modelagens hidrodinâmicas para avaliação de condições de navegação, avaliação de riscos e enchentes, como em Szypuła (2017), Alcaras; Parente e Vallario (2019), Gautam; Dahal e Bhattarai (2019).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Evidenciam-se outros estudos no mesmo sentido, como em Ramly e Tahir (2016) simularam a ocorrência de inundações no alto Klang, com DEM processado no ambiente ArcGIS. Pavlova (2017) analisou os métodos de interpolação mais utilizados para criação de modelos digitais de elevação. šamanović; Medak e Gajski (2017) apresentam as diferenças na aplicação de dois métodos de cálculo do DEM. O'loughlin *et al.* (2016) desenvolveram o primeiro Modelo Digital de Elevação (Bare-Earth) Digital (MDE) baseado na Missão de Topografia de Radar de Transporte (SRTM) para todas as massas de terra entre 60N e 54S.

Modelos hidrodinâmicos descrevem simulações físicas ou matemáticas que servem para a conversão de uma entrada (geométrica, condições de contorno) em saídas como vazões, vetores de velocidade, níveis d'água e pressões (LIU *et al.*, 2012), podendo gerar ser modelos diretos, semidiretos ou indiretos (NOVAK *et al.*, 2010).

De Paiva *et al.* (2013) realizou a modelagem hidrodinâmica da bacia do rio Amazonas a partir de um modelo MGB-IPH. Tendo como resultados que as águas superficiais governam a maioria das alterações no armazenamento terrestre de água da Amazônia (56%). Iosub *et al.* (2015) analisaram a metodologia de mapeamento de áreas propensas a inundações no setor médio e baixo do rio Pluton, que é um afluente do rio Ozana, em seu setor superior. Moya Quirogaa *et al.* (2016) utilizaram o HEC-RAS-v5 para simular o evento de inundação de fevereiro de 2014 na Amazônia boliviana. O estudo mostrou a aplicabilidade e o valor das capacidades 2D do HEC-RAS para estudos de inundações.

Pampaniya e Tiwari (2017) analisaram o melhor modelo de infiltração no solo entre os métodos de infiltração disponíveis no modelo HEC-HMS para uma bacia hidrográfica agrícola dominada a montante da barragem de Hadaf. Fleischmann; Paiva e Collischonn (2019) ao analisarem modelos hidrodinâmicos-hidrológicos baseados no MGB e no HEC-RAS em escalas locais, regionais e globais, para investigação dos diferentes fatores que influenciam na melhoria das estimativas dos parâmetros destes modelos.

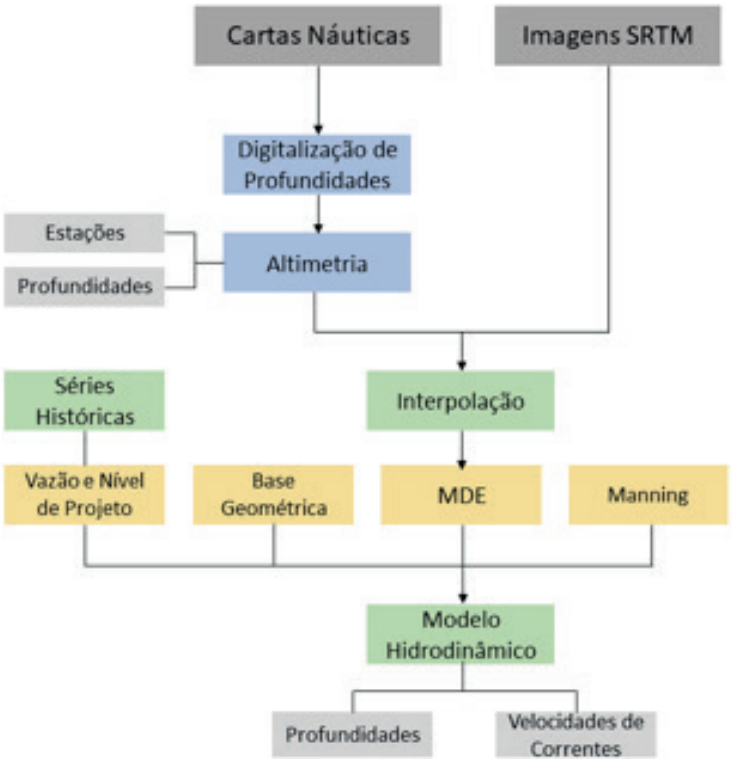
Desse modo, a partir das bibliografias apresentadas, observa-se que a modelagem hidrodinâmica se trata de uma ferramenta potencialmente utilizável para auxílio nas condições de navegação de vias navegáveis interiores. Nesse sentido, destaca-se como aplicação importante a utilização de saídas de dados de vetores de velocidade e escoamento para verificação de regiões passíveis de erosão ou deposição de sedimentos, sendo estes fenômenos grandes impactantes na navegação fluvial, por alterarem a lâmina d'água disponível.

MÉTODO

Apresenta-se o detalhamento metodológico adotado na modelagem hidrodinâmica que serviu de base à aferição e otimização de parâmetros empregados na seleção de critérios

normativos necessários ao dimensionamento de canais de navegação interior, conforme por ser observado no fluxograma da Figura 1.

Figura 1. Fluxograma Metodológico



Fonte: Autores (2022).

Como podemos observar no fluxograma, a pesquisa inicia-se com a aquisição dos dados das cartas náuticas e das imagens SRTM, e com o tratamento desses dados construímos o modelo digital de elevação. A partir do MDE, da vazão e dos níveis d'água (determinados através das séries históricas) criamos o modelo hidrodinâmico, o qual é calibrado e validado pelo coeficiente de manning. Por fim, com o modelo hidrodinâmico pronto, encontramos as profundidades e as velocidades das correntes.

Aquisição e tratamento dos dados

Cálculos estatísticos do ano seco

A ocorrência de níveis de água está sempre associada a uma determinada probabilidade de ocorrência. Assim sendo, obras hidroviárias devem sempre ser dimensionadas para condições operacionais e altimétricas que atendam a padrões de probabilidade e de recorrência previamente definidos.

A ocorrência de uma dada vazão ou nível de água está sempre associada a uma determinada probabilidade de ocorrência. Assim sendo, obras hidráulicas devem sempre

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

ser dimensionadas para condições operacionais e altimétricas que atendam a padrões de probabilidade e de recorrência previamente definidos.

Para iniciar a análise das distribuições de probabilidades é importante definir alguns conceitos como o de período de retorno, que é o intervalo médio de tempo, em anos, que decorre entre duas ocorrências iguais e subsequentes. Corresponde ao número médio de anos necessários para que um acontecimento ocorra em um ano qualquer desses anos. É igual ao inverso da probabilidade anual de ocorrência desse acontecimento, conforme Equação (1).

$$T_r = \frac{1}{P} \tag{1}$$

Em que, T_r é o período de retorno e P é a probabilidade de ocorrência de um determinado evento hidrológico.

Tendo por base as séries de longo período utilizadas, a simulação dos níveis de água, associada à distribuições de probabilidades e a períodos de retorno, foi realizada em função da média aritmética e do desvio padrão da série e da variável reduzida que depende da distribuição de probabilidade e do período de retorno. A Equação (2) mostra a expressão utilizada na estimativa dos níveis de água, para um dado período de retorno Tr.

$$\hat{Y} = \overline{Y} \pm Z.S \tag{2}$$

Em que: $\hat{Y}$ é o valor estimado da variável hidrológica associado a um dado período de retorno; $\overline{Y}$ é a média aritmética da série de longo período da variável hidrológica; S é o desvio padrão da série de longo período da variável hidrológica; e Z é a variável reduzida que depende da distribuição de probabilidade, da probabilidade de excedência e do período de retorno.

Os cálculos estatísticos dos anos secos foram realizados no Excel, para uma distribuição de probabilidades de extremos Tipo I (Gumbel), neste caso foram utilizadas três situações de ano-seco de 50%,75% e 90%, e escolhido o período de retorno de 10 anos Equação 3.

$$C = \mu - \sigma z \tag{3}$$

Onde C, é a cota para determinada condição de ano seco, μ é a média da amostra para a porcentagem de ano-seco que se deseja encontrar, σ é o desvio padrão da amostra referente a porcentagem de ano-seco que se deseja encontrar e z é a variável reduzida neste caso utilizada a de Gumbel para um período de retorno de 10 anos Tabela 1.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Tabela 1. Cálculo dos níveis d'água para as condições de ano seco estipuladas

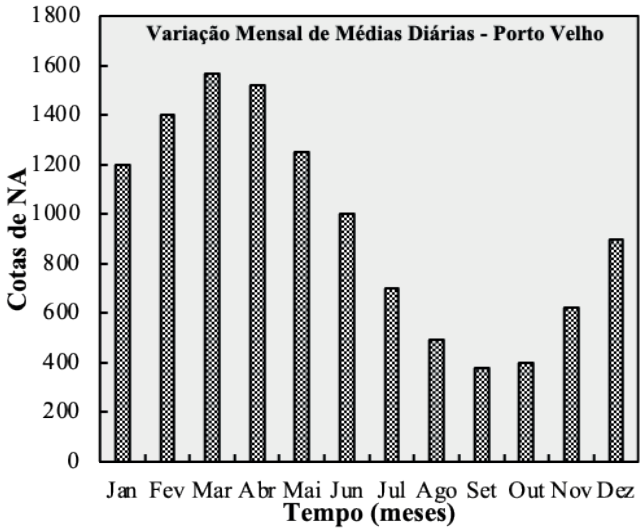
Estação	Ano Seco	Média (μ)	DP (σ)	Z (TR=10 anos)	Cotas	Elevação
Porto Velho	50	954,00	147,2	1,30	762,08	5062,0
	75	551,00	126,0	1,30	386,73	4686,7
	90	399,78	111,7	1,30	254,17	4554,2
Humaitá	50	1664,3	122,5	1,30	1504,5	3969,5
	75	1234,6	106,0	1,30	1096,4	3561,4
	90	1087,3	972,2	1,30	960,49	3425,5

Fonte: Autores (2022).

Dados Hidrológicos

Os dados hidrológicos utilizados foram provenientes das estações fluviométricas Porto Velho e Humaitá, mantidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os dados diários de nível de água e de vazão, foram obtidos para o período de 1968 até 2019, conforme podem ser observados nas Figuras 2 e 3. A Figura 2 evidencia a variação mensal das médias diárias dos níveis d'água na estação Porto velho e a Figura 3 em Humaitá.

Figura 2. Variação mensal das médias das cotas dos níveis d'água na estação Porto Velho (15400000).

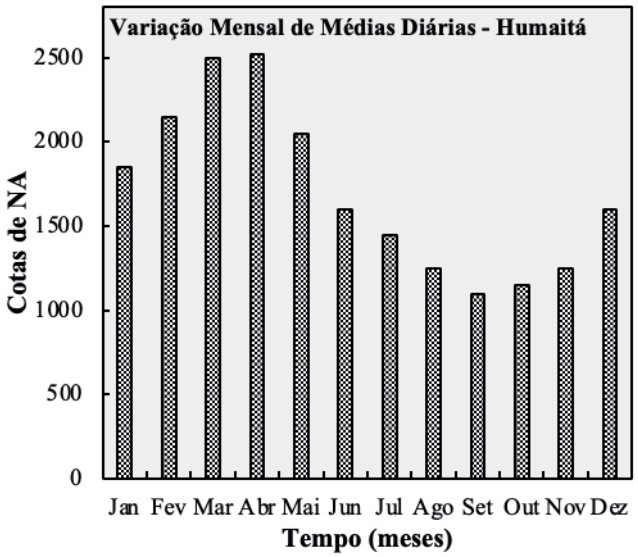


Fonte: Autores (2022).

A Figura 3 evidencia a variação mensal das médias diárias das cotas dos níveis d'água na estação Porto Velho.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 3. Variação mensal das médias das cotas dos níveis d'água na estação Humaitá (15630000)



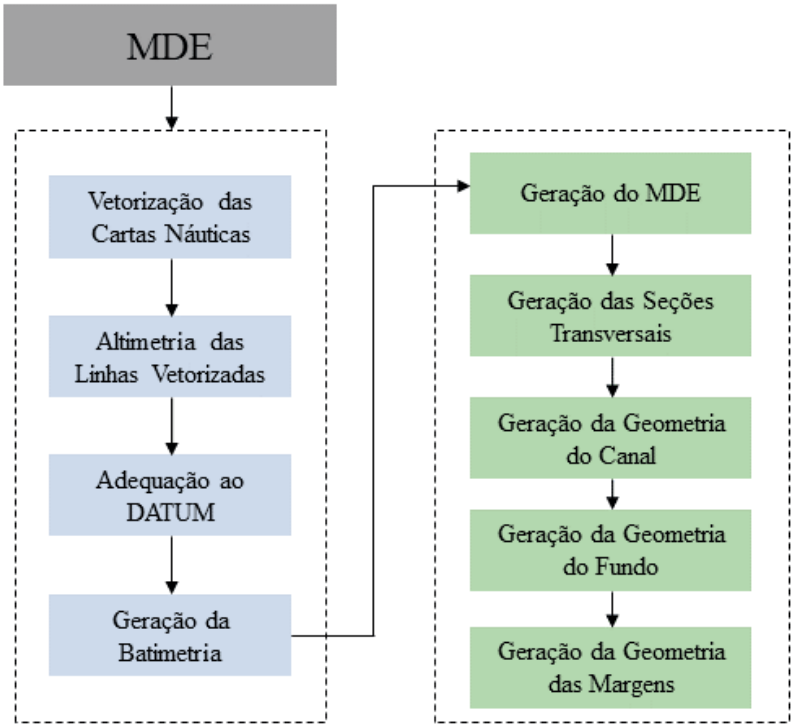
Fonte: Autores (2022).

Os valores das cotas dos níveis d'água em Humaitá são mais elevados dos que são encontrados em Porto Velho, esta diferença é corrigida através do cálculo da elevação ortométrica do nível de redução associado a cada régua.

Dados do Modelo digital de elevação

O MDE foi desenvolvido utilizando a interpolação das imagens SRTM e das profundidades das cartas náuticas. Como o software de modelagem hidrodinâmica utilizado (HAC-RAS), trabalha com sistema de coordenadas UTM com o Datum WGS-84, é necessário converter os dados obtidos das cartas náuticas para o sistema de coordenadas utilizado. Como forma de evidenciar as etapas para geração do Modelo Digital de Elevação, tem-se o fluxograma da Figura 4 ilustrando as etapas principais da geração das bases geométricas.

Figura 4. Fluxograma da geração das bases geométricas



Fonte: Autores (2022).

Base cartográfica, vazões e níveis d'água

O desenvolvimento do MDE foi elaborado a partir da construção da base cartográfica utilizando as imagens raster das cartas náuticas e SRTM. Depois desse procedimento é realizado a digitalização dos vetores linhas e vetores pontos das cartas náuticas, obtidas no site do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Nas cartas náuticas obtemos os dados de profundidade e estes foram vetorizadas utilizando o software ARCGIS, a partir da ferramenta ARCSCAN. As profundidades estão associadas ao nível de redução calculado para as cotas de níveis d'água da estação fluviométrica a qual a carta está referenciada. Como as cartas não são referenciadas a nenhum datum, é necessário determinar a altimetria do nível de redução (NR) utilizando a referência de nível (RN) obtida na ficha descritiva F-43.

A altitude ortométrica referenciada o NR é necessário, portanto, podemos calcula-la através da conversão das altitudes elipsoidais, encontrada na ferramenta MAPGEO do IBGE, pela Equação 4.

$$\boldsymbol{H = h - N} \tag{4}$$

Em que: H é a altitude ortométrica; h é a altitude geométrica ou elipsoidal; e N é a ondulação geoidal.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

A atribuição das altitudes ortométricas aos pontos de profundidade das cartas náuticas vetorizadas e disponibilizadas pela Marinha do Brasil devem ser realizadas através das relações demonstradas nas Equações 5 e 6.

$$H_{NR} = RN_1 - NR_1 \quad (5)$$

$$H_{CN} = H_{NR} - P_{cn} \quad (6)$$

Em que H_{NR} é a elevação ortométrica do nível de redução; RN_1 é a referência de nível local (associada a ficha descritiva); NR_1 é a profundidade do nível de redução da carta náutica; H_{CN} é a elevação ortométrica dos pontos na carta náutica; e H_{cn} é a profundidade na carta nática.

Após esse cálculo houve a verificação da relação com a referência de nível, e posteriormente a interpolação das elevações utilizando o método IDW para assim terminar o modelo digital de elevação do rio.

Integração dos dados das cartas náuticas com os das imagens SRTM

Este é um processo complexo na modelagem hidrodinâmica do rio uma vez que é utilizado duas fontes de dados com características diferentes (carta náutica e imagem SRTM). Assim há a integração entre a batimetria e a topografia do canal e com a inserção das seções transversais, encontramos do modelo digital de elevação para cada seção, para o talvegue, margens e flowpaths.

Geração do Modelo Digital de Elevação

Para a geração do modelo digital de elevação foram utilizadas imagens raster das cartas náuticas e SRTM, as cartas náuticas n° 4752 e 4753 primeiramente foram digitalizadas para a extração de suas linhas e pontos, depois foi inserido o valor correspondente a cada profundidade, e após estes pontos e linhas foram corrigidos com os valores referentes ao nível de redução obtido das fichas descritivas F-43. Por fim, foi calculada a elevação ortométrica a partir dos valores obtidos para o zero das réguas em (PCE, 2015), conforme evidencia a Tabela 2.

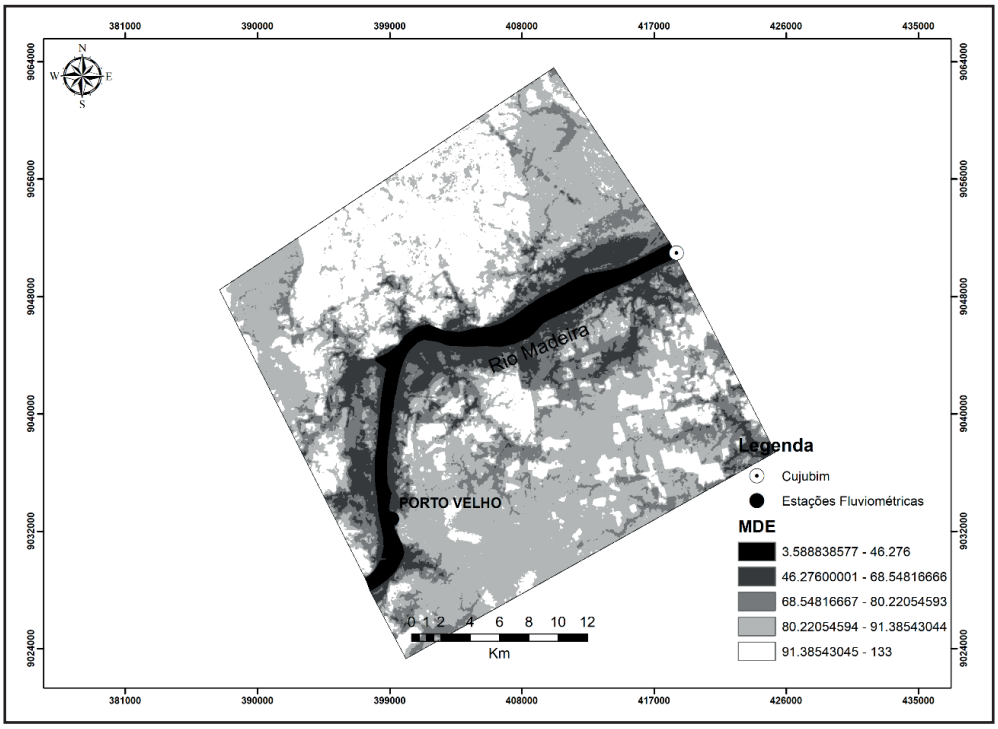
Tabela 2. Elevação ortométrica do zero das réguas,

Estação	Elevação ortométrica do zero da Régua
Porto Velho	43
Humaitá	24,65

Fonte: Adaptado de PCE Projetos E Consultorias De Engenharia (2015)

As imagens SRTM foram obtidas do USGS com resolução de 30m, estes dados foram interpolados com os provenientes das cartas náuticas gerando o modelo digital de elevação do rio Madeira no trecho entre Porto Velho e Cujubim, neste local as elevações do fundo do rio variam entre 3,58m e 46,2m (Figura 5).

Figura 5. Mapa do modelo de elevação digital do Rio Madeira no trecho entre Porto Velho e Cujubim.



Fonte: Autores (2022).

Modelagem e simulação hidrodinâmica

Todas as simulações hidrodinâmicas foram realizadas utilizando o modelo HEC-RAS, o qual permite simulações para condições de fluxo permanente e transiente, os resultados são determinados com base na resolução da equação de Saint-Venant 2D, vários são os trabalhos que empregam as simulações do HEC-RAS (GICHAMO *et al.*, 2012; SAKSENA; MERWADE, 2015; TSCHIEDEL; DE PAIVA, 2018).

HEC-RAS

O Sistema de Análise de Rio dos Engenheiros do Exército dos EUA (HEC-HAS) é um software que permite executar modelagem hidrodinâmica unidimensional de fluxo permanente; cálculos hidrodinâmicos unidimensional e bidimensionais de fluxo transiente de rios; modelagem do transporte de sedimentos no leito instável de fluxo quase transiente e totalmente transiente; análise de temperatura da água; e modelagem generalizada da qualidade da água (destino e transporte dos nutrientes). Ele foi desenvolvido no *Hydrologic*

Engineering Center (HEC), a qual é uma divisão do *Institute for Water Resourses* (IWR), do corpo de engenheiros do Exército dos EUA (HEC-RAS, 2016).

As seções transversais utilizadas no HEC-RAS foram desenvolvidas a partir da extração das elevações do modelo digital de elevação. Estas seções transversais são importantes nas simulações, pois elas servem para prover o comprimento dos trechos a jusante, a localização das margens e os valores do coeficiente de manning.

Neste estudo, o trecho do rio estudado foi dividido em duas seções transversais, uma a montante (índice 1) e uma a jusante (índice 2), para o cálculo dos níveis d'água. Este cálculo foi realizado pelo método interativo a partir da equação da energia de Bernoulli, como mostra a Equação 7.

$$\boldsymbol{y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_L} \quad (7)$$

Onde: y_1 e y_2 são as profundidades da superfície d'água nas seções transversais (m); z_1 e z_2 são as altitudes relacionada ao datum horizontal (m); α_1 e α_2 são os coeficientes de não uniformidade do perfil da velocidade (admensional), V_1 e V_2 são as velocidades médias na seção (m/s); g é a aceleração gravitacional (m/s²); e h_L é declividade da linha de energia, representada pelas perdas por atrito (m).

A declividade da linha de energia é encontrada entre duas seções transversais, resultante da força de atrito entre o fluido, paredes do canal e as variações na geometria do canal, sendo calculada pela Equação 8.

$$\boldsymbol{h_L = LS_f + C\left|\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}\right|} \quad (8)$$

Onde: L é a distância distribuída entre as seções transversais (m); S_f representa as perdas por atrito entre as duas seções transversais (m/m); e C é o coeficiente de expansão ou contração (adimensional).

Determinação do coeficiente de rugosidade de manning

Há algumas maneiras de determinar o coeficiente de manning, sendo a principal é através da análise da granulometria dos sedimentos de fundo e margens do rio ou do canal. Outra maneira é utilizando manuais com tabelas de valores de diferentes tipos de coberturas de solo e comparando as imagens do local com as imagens encontradas na literatura. Contudo, neste trabalho o coeficiente de manning foi determinado mediante a consulta de tabelas encontradas na literatura em conjunto com a comparação dos tipos de solos e

rochas presentes na área da pesquisa em (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1968), conforme evidenciado na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes de Manning

Material		Typical Manning Coefficients
Concrete		0,012
Gravel Bottom with Sides	Concrete	0,02
	Montared Stone	0,023
	Riprap	0,033
Natural Stream Channels	Clean, Straight Stream	0,03
	Clean, Winding Stream	0,04
	Winding with Weads and Pools	0,05
	With Heavy Brush and Timber	0,1
Flood Plains	Pastura	0,035
	Field Crops	0,04
	Light Brushand Weeds	0,05
	Dense Brush	0,07
	Dense Trees	0,1

Fonte: Chow et al. (1988)

Neste estudo foram realizadas 3 simulações com dados medidos de vazão e elevação ortométrica de níveis d'água para calibração do modelo, o coeficiente de *manning* foi inserido a partir de um processo de verificação calibração, ficando com valor de 0.02.

Condições de contorno

Um elemento fundamental para que o modelo hidrodinâmico funcione deforma adequada, são as condições de contorno ou de fronteira. Nelas podem ser impostos valores das propriedades de entrada ou saída de acordo com a tipologia da fronteira. Estes são inseridos após a elaboração da base cartográfica a qual é construída com os elementos geométricos e dos dados de vazão. Neste trabalho, as condições de contorno utilizadas e seus respectivos pontos de controle são a montante do trecho, a altitude ortométrica do nível d'água e a estação fluviométrica; e a jusante do trecho temos a estimativa da altitude ortométrica do nível d'água.

Estimativa dos níveis d'água a jusante

Como mencionado anteriormente, os valores da elevação ortométrica do nível d'água são uma das condições de contorno utilizadas no modelo hidrodinâmico. Para encontrá-la é necessário primeiramente calcular a cota média diária mensal em cada estação, depois esta cota é relacionada a altimetria do zero da régua local, previamente calculada através das Equações 9 e 10. Assim utilizamos a Equação 9 que segue.

$$s = \frac{dy_1}{dx} \quad (9)$$

Onde: S é a declividade; dy_1 é a variação da altimetria entre as duas estações; dx é a variação da distância entre as duas estações.

Após cálculo da declividade é calculado o valor da elevação do nível d'água a jusante.

$$El_{Av} = El_{It} - dy2 \quad (10)$$

Onde El_{Ay} é a elevação do nível d'água de interesse; El_{It} é a elevação do nível d'água a montante; e dy_2 é a variação das elevações entre os dois pontos calculados pela equação.

■ ÁREA DE ESTUDO

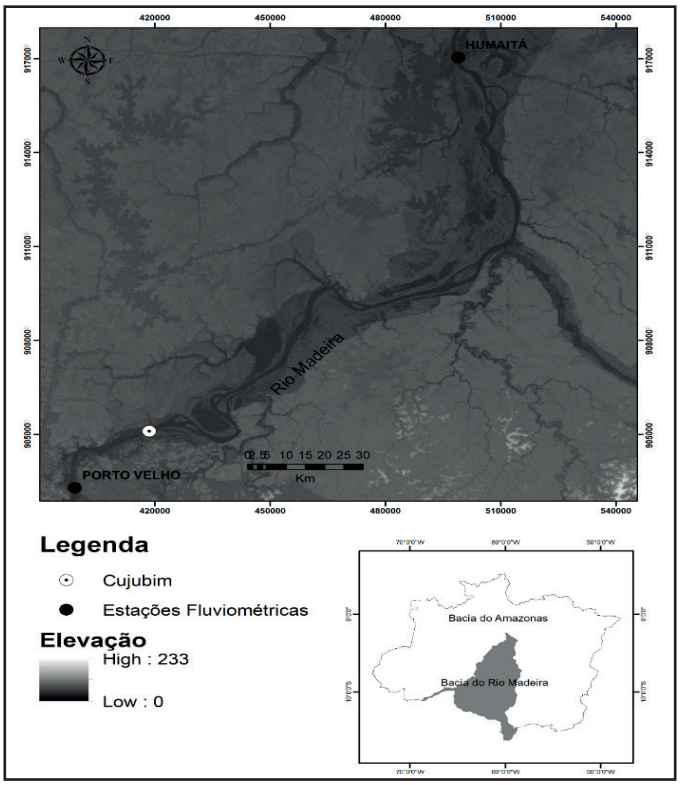
O rio Madeira é um dos principais afluentes da margem direita do rio Amazonas, com uma extensão total de cerca de 1.420 km, equivalente a 20% da bacia do Amazonas, e está entre os dez maiores rios do mundo, sendo classificado como um mega rio, drenando uma área de aproximadamente 1,4 milhões de km2 e tem uma vazão média anual de 32.000 m3/s (BRÊDA *et al.*, 2019).

É formado pela confluência dos rios Mamoré e Beni, junto à cidade de Nova Mamoré (RO), banha os estados de Rondônia (RO), Amazonas (AM) e Mato Grosso (MT) e faz divisa com a Bolívia. O rio Madeira recebe este nome, pois, no período de chuvas seu nível sobe e inunda grandes porções da planície florestal, trazendo troncos e restos de madeira da floresta, sendo esses um fator dificultador a navegação (MT, 2013).

Segundo DNIT, a Hidrovia do rio Madeira possui uma extensão navegável em boas condições, entre Porto Velho (RO) e sua foz, na margem direita do rio Amazonas (imediações da cidade de Itacoatiara - AM), não possuindo problemas com trechos sinuosos, uma vez que os índices de sinuosidade ao longo de seu traçado não ultrapassam valores de 1,3 sem afunilamentos bruscos. Neste estudo será analisado um trecho de aproximadamente 37 km entre Porto Velho e Cujubim (Figura 6), com a utilização dos dados de cotas de nível d'água, vazões e curvas chave das estações fluviométricas de Porto Velho e Humaitá, que apresentam descarga média de 30.000m³/s e média de largura de aproximadamente 1.2km, com média de declividade de 3cm/km.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 6. Mapa de localização da área de estudo com as estações fluviométricas utilizadas.



Fonte: Autores (2022).

É classificado como rio de águas brancas rico em material solido dissolvido e em suspensão. Entretanto, durante o período de seca do rio, entre julho e novembro, há surgimento de obstáculos a navegação, como banco de areia, pedrais e corredeiras, os quais não interrompem a navegação, mas aumentam o tempo e o risco da viagem. Durante o período de cheia, entre fevereiro e maio, esses obstáculos são cobertos devido as inundações da região, contudo ocorre o fenômeno conhecido como terras caídas que gera a movimentação de um elevado volume de sedimentos para o leito do rio, causando obstáculos a navegação devido a formação de outros bancos de areias. Atualmente os obstáculos mais relevantes à navegação no Rio Madeira é a inexistência de eclusas nas UHEs Santo Antônio e Jirau.

RESULTADOS

Foram realizadas 6 simulações hidrodinâmicas no rio Madeira, para calibração com a utilização dos dados do Levantamento topobatimétrico do Rio Madeira integrante dos Estudos de Impacto ambiental da Usina hidrelétrica Santo Antônio Instalada no rio. A Tabela 4 apresenta os dados das elevações ortométricas das calibrações com os valores medidos no levantamento topobatimétrico na data de 20/06/2014 e registrados no banco de dados *hidroweb* da ANA, com os níveis d'água calculados a partir das declividades do nível d'água

(Tabela 4), além dos valores das vazões medidas nos dias para os quais foram realizadas a simulações.

Tabela 4. Dados utilizados nos cálculos do nível d´água para calibração no trecho analisado.

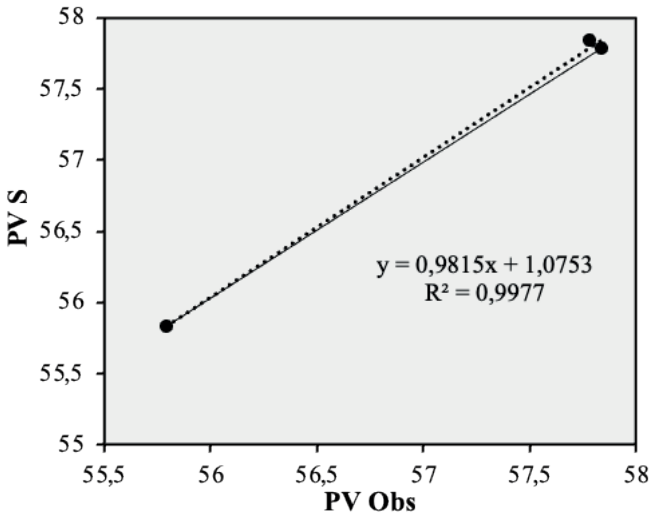
Datas	Vazão (m³/s)	PV Obs	H obs	DC-Pv	DT	Cj	PV S	E%
27/06/14	24435	55,79	45,17	32700	251900	54	55,83	0,07
20/06/14	30988	57,84				56,16	57,79	0,09
16/06/14	30786	57,78	46,05	32700	251900	56	57,84	0,10

Fonte: Autores (2022).

Em que: PV é Elevação ortométrica do nível d'água observada em Porto Velho; H é a Elevação Ortométrica do nível d'água observada em Humaitá; DC-PV é Distância entre Porto Velho e Cujubim; DT é a Distância entre Porto Velho e Humaitá; Cj é a Elevação Ortométrica do nível d'água observada (20/06/2014) e estimada em Cujubim; PV S é a Elevação ortométrica simulada do nível d'água em Porto Velho

O ajuste dos dados de elevação dos níveis d'água simulados com os observados foi quase perfeito com R² de 0.9977 (Figura 7) e o erro relativo foi abaixo de 1%.

Figura 7. Ajuste entre os dados simulados e observados na calibração do modelo hidrodinâmico



A Tabela 5 apresenta os dados das validações do modelo hidrodinâmico de previsão de níveis d'água no rio Madeira no trecho entre Porto velho e Cujubim e a Figura 8 traz o ajuste entre os dados medidos e simulados. As vazões utilizadas foram obtidas através da utilização da curva chave disponível no Hidroweb que apesenta a seguinte equação de potência Equação 11.

$$Q(H) = 135.6583 * \left(\left(\left(\frac{H}{100} \right) - (-3.13) \right)^{1.895} \right) \quad (11)$$

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

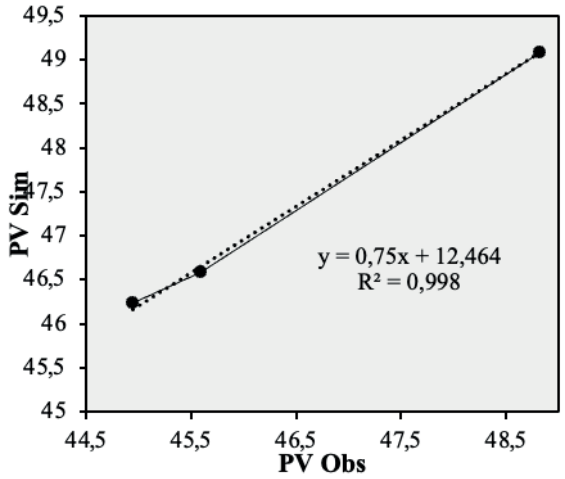
Onde o H é o valor da cota a qual deseja-se encontrar a vazão Q.

Tabela 5. Dados utilizados nos cálculos do nível d´água para validação no trecho analisado

	Vazão (m^3/s)	PV Obs	H obs	DC-Pv	DT	Cj	PV S	E%
Validação	2947,1	44,9	34,4	32700	251900	43,56	46,23	2,87
	3705,8	45,6	35,7	32700	251900	44,30	46,58	2,17
	8950	48,8	41,0	32700	251900	47,8	49,09	0,55

Fonte: Autores (2022)

Figura 8. Ajuste entre as elevações observadas e simuladas na etapa de validação.



Fonte: Autores (2022).

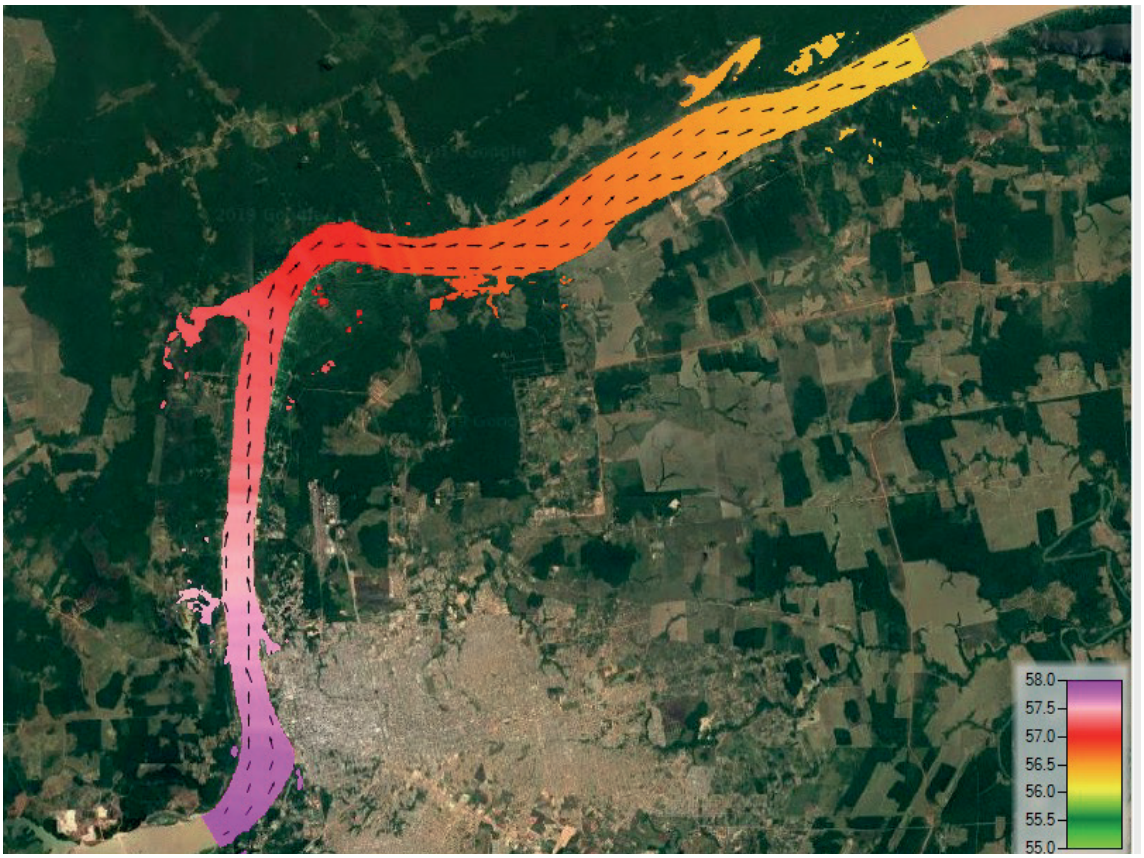
Perfis de Velocidades

No que tange às velocidades encontradas na calha do Rio Madeira durante as simulações com as condições de contorno especificas que compõe o modelo, estas variaram de 0 a 3.81m/s, observa-se que estas velocidades propiciam a formação de diferentes ambientes relacionados a erosão e deposição devido a variação do gradiente de velocidade.

As direções preferencias do escoamento podem ser observadas na Figura 9, que mostra os vetores de velocidade, neste caso, os comprimentos dos vetores são proporcionais as magnitudes das velocidades.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 9. Vetores de velocidade do escoamento.



Fonte: Autores (2022).

DISCUSSÃO

Devido à geometria do estuário do Amazonas e a fatores hidrodinâmicos, a enorme quantidade de sedimentos carreada pelo rio converge para a foz onde encontra a condição ideal para deposição levando à formação de bancos, que representam verdadeiros obstáculos à navegação nessa região estuarina de grande relevância comercial. Além disso, às incertezas acerca de sua mobilidade constituem um desafio para a manutenção de cartas náuticas atualizadas, o que representa um risco potencial para o encalhe de navios na região.

No que diz respeito a metodologia para realização deste estudo, foi tomado como ponto de partida, as cartas náuticas e o modelo digital de elevação SRTM, disponibilizados de forma gratuita na internet, a determinação das condições de contorno a partir das series temporais de cotas e vazão do HidroWeb.

Os primeiros resultados das simulações dizem respeito a variação do nível d'água que apresentam valores vaiando entre 56 a 43m. A simulação do padrão de escoamento para detecção de possíveis área de erosão e deposição, revela que as profundidades variam de 3.81 a 0 m/s, o que resulta em pelo menos três áreas com características de deposição apresentando gradientes baixos de velocidade e outras duas áreas com características de erosão com elevados valores de velocidade.

A modelagem hidrodinâmica apresentada neste trabalho pode ser utilizada em primeiro plano como ferramenta de engenharia hidráulica para contenção de erosão nas margens e identificação de área propicias a deposição que pode ser posteriormente dragada.

REFERÊNCIAS

ALCARAS, E.; PARENTE, C.; VALLARIO, A. Comparison of different interpolation methods for DEM production. **International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering**, v. 8, n. 4, p. 1654–1659, 2019.

BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D.; BRAVO, J. M.; PASSAIA, O. A.; MOREIRA, D. M. **Assimilation of Satellite Altimetry Data for Effective River Bathymetry**. [s.l: s.n.]v. 557441–7463 p.

CHOW, V. Te; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied hydrology. **Journal of Hydrology**, {McGraw}-Hill series in water resources and environmental engineering. v. 6, n. 2, p. 224–225, 1968.

DE PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; BULHÕES MENDES, C. A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226–1243, 2013.

FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.; COLLISCHONN, W. Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. **Journal of Hydrology X**, v. 3, p. 100027, 2019.

GAUTAM, S.; DAHAL, V.; BHATTARAI, R. Impacts of Dem Source, Resolution and Area Threshold Values on SWAT Generated Stream Network and Streamflow in Two Distinct Nepalese Catchments. **Environmental Processes**, v. 6, n. 3, p. 597–617, 2019.

GICHAMO, T. Z.; POPESCU, I.; JONOSKI, A.; SOLOMATINE, D. River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling. **Environmental Modelling and Software**, v. 31, p. 37–46, 2012.

HEC-RAS. Hydraulic Reference Manual Version 5.0. n. February, p. 547, 2016.

IOSUB, M.; MINEA, I.; HAPCIUC, O.; ROMANESCU, G. H. The Use of HEC-RAS Modelling in Flood Risk Analysis. **Air & Water Components of the Environment / Aerul si Apa Componente ale Mediului**, n. October, p. 315–322, 2015.

LATRUBESSE, E. M. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. **Geomorphology**, v. 101, n. 1–2, p. 130–145, 2008.

LIU, S.; SHAO, Y.; YANG, C.; LIN, Z.; LI, M. Improved regional hydrologic modelling by assimilation of streamflow data intoaregional hydrologic model. **Environmental Modelling and Software**, v. 31, p. 141–149, 2012.

MOYA QUIROGAA, V.; KUREA, S.; UDOA, K.; MANOA, & A. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February. **RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua**, v. 3, n. 1, p. 25–33, 2016.

MT. Plano Hidroviário Estratégico: Relatório do Plano 2013. **Ministério dos Transportes**, p. 184, 2013.

NOVAK, P.; GUINOT, V.; JEFFREY, A.; REEVE, D. **Hydraulic modelling – an introduction: principles, methods and applications**. [s.l.] Spon Press, 2010. v. 1614 p.

O'LOUGHLIN, F. E.; PAIVA, R. C. D.; DURAND, M.; ALSDORF, D. E.; BATES, P. D. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 49–59, 2016.

PAMPANIYA, N. K. K.; TIWARI, M. K. Rainfall Runoff modeling using Remote Sensing, GIS and HEC-HMS Model. **Journal of Water Resources and Pollution Studies**, v. 2, n. 2, p. 1–8, 2017.

PAVLOVA, A. I. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models. **Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing**, v. 53, n. 2, p. 171–177, 2017.

PCE PROJETOS E CONSULTORIAS DE ENGENHARIA. **LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO DO RIO MADEIRA PARA ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DO LEITO A JUSANTE DA UHE SANTO ANTÔNIO**. [s.l: s.n.].

RAMLY, S.; TAHIR, W. Application of HEC-GeoHMS and HEC-HMS as Rainfall–Runoff Model for Flood Simulation. *Em*: **ISFRAM 2015**. [s.l: s.n.]p. 181–192.

SAKSENA, S.; MERWADE, V. Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 180–194, 2015.

ŠAMANOVIĆ, S.; MEDAK, D.; GAJSKI, D. Comparison of interpolation methods and image correlation in the collection of data for digital elevation model. **Tehnicki vjesnik - Technical Gazette**, v. 24, n. Supplement 2, p. 419–425, 2017.

SZYPUŁA, B. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods. **Landform Analysis**, v. 32, n. Wise 2011, p. 45–58, 2017.

TSCHIEDEL, A. da F.; DE PAIVA, R. C. D. Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. **Revista Brasileira de Recursos Hidricos**, v. 23, p. 1–17, 2018.

13

Modelo de análise de estabilidade de sistemas flutuantes com cargas não usuais: Um Estudo de Caso na Região Amazônica

Vânia Figueredo Coelho Guedes
Universidade Federal do Pará - UFPA

Nelio Moura de Figueiredo
Universidade Federal do Pará - UFPA

Yuri Victor Remígio Guedes
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221211123

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo definir um método para a criação de um plano de carregamento de uma balsa no transporte em navegação interior de dois equipamentos de alto índice de carga concentrada, equipamentos não usuais, destinados a uma Usina Hidrelétrica. Assim, estudou-se o processo de carregamento e lastreamento de uma embarcação para que a entrada e saída dos equipamentos, transportados em linha de eixo, não desestabilizassem a balsa durante o processo. Para isso, utilizou-se como metodologia a união do conhecimento em arquitetura naval com o auxílio de programas de computador para que se pudesse analisar a melhor alternativa para a movimentação de cargas não usuais mantendo a estabilidade e integridade estrutural durante o procedimento, com vistas a assegurar condições mínimas de estabilidade, governo, manobra, carga e descarga.

Palavras-chave: Arquitetura Naval, Estabilidade de Sistemas Flutuantes, Navegação Interior.

INTRODUÇÃO

Os mares e oceanos existentes no planeta Terra são de fundamental importância para o desenvolvimento da humanidade já que compõem 70% da superfície terrestre. As pessoas vêm evoluindo desde que começaram a explorar este ambiente que tem capacidade estrondosa de gerar alimentos, dispor de recursos naturais e produzir energia, além de promover a união das nações na distribuição dos seus produtos e serviços através do transporte marítimo, turismo e lazer (PENA, 2014).

Existem ocasiões em que a travessia dos navios por extensos oceanos pode se tornar bastante perigosa devido a força das ondas e dos ventos em alto mar. Alguns mares são mais turbulentos que outros e por essa razão os navios devem ser projetados e construídos para enfrentar quaisquer situações de risco.

Sendo assim, deve-se estabelecer critérios de avaliações para que esses meios de transporte sejam bem estudados, projetados e avaliados por engenheiros navais para que o navio não venha a sofrer avarias e prejudicar a viagem, as cargas, a tripulação e/ou passageiros. Observa-se, assim, a necessidade de especificações sobre estudos que trabalham no comportamento dos navios quando imersos no fluido estejam eles vazios ou carregados.

Portanto, este trabalho pretende contribuir para aperfeiçoar o conhecimento sobre arquitetura naval na navegação interior através de um exemplo apresentado em um estudo de caso realizado em uma balsa de aço que carregará dois equipamentos de grande porte para serem instalados em uma usina hidroelétrica que foi construída no município de Altamira, região sudoeste do Estado do Pará.

Esses equipamentos chegaram até Belém, capital do Estado do Pará, transportados por grandes navios. Isso geralmente ocorre em razão da falta de portos com infraestrutura portuária em condições adequadas para fazer o desembarque desses volumes, e também pelo fato de que, em algumas situações, os rios não possuem a profundidade suficiente para permitir a navegação dessas embarcações em algumas épocas do ano. Portanto, tornou-se necessário que se deslocassem as peças do navio para balsas de menor calado (altura da região submersa do casco), com grande capacidade de carga, que são bastante utilizadas na região.

O transporte de equipamentos utilizados na construção e operação de hidrelétricas tem aumentado devido investimentos em novas usinas que aproveitam o potencial hídrico dos rios da região. A amazônia tem grandes chances de receber novas usinas hidrelétricas e, para isso, a estrutura e estabilidade da frota regional deve estar preparada para que não haja qualquer empecilho que venha prejudicar o transporte. Por isso, estudos relacionados deverão ser realizados e/ou aperfeiçoados.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Nota-se, portanto, que este estudo possui relevância acadêmica e científica devido a possibilidade de assegurar a utilidade do trabalho aos demais alunos e profissionais da área, de mostrar um tema que contribui cumulativamente com o conhecimento científico já existente e pelo ineditismo vivente no estudo superando, assim, possíveis lacunas presentes sobre o tema. Outro fator relevante é o aspecto econômico uma vez que o estudo propicia a identificação de oportunidades para melhor aproveitamento da frota atual, minimizando, assim, a necessidade de mais investimentos.

O objetivo deste trabalho é definir o plano de carregamento de uma balsa no transporte de dois equipamentos de alto índice de carga concentrada destinados a uma Usina Hidrelétrica.

Neste trabalho, optou-se por um estudo qualitativo-descritivo com abordagem fundamentada em um estudo de caso.

Existem infinitas interpretações sobre o que define pesquisa qualitativa e, presentemente, tem-se a definição “abordagem qualitativa” como a mais adequada neste contexto (OLIVEIRA, 2007, p. 37).

Dessa maneira, a pesquisa ou abordagem qualitativa tem por definição como sendo um procedimento de cogitação e análise de uma situação da realidade através de um emprego de técnica ou método para que se obtenha melhor abrangência e compreensão do objeto da pesquisa. Esse processo pode ser realizado por meio de observação, entrevistas, questionários e/ou análise de dados aplicados ao estudo em questão e são representados de forma descritiva como resultado, onde todos os fatos e fenômenos são significativos e devem ser observados com bastante prudência (GODOY, 1995).

A utilização da pesquisa qualitativa tem como objetivo, “reduzir a distância entre teoria e os dados, entre o contexto e a ação, usando a lógica da análise fenomenológica, isto é, da compreensão dos fenômenos pela sua descrição e interpretação” (TEIXEIRA, 2011, p. 137).

Em complemento à pesquisa qualitativa o presente estudo tem características descritivas que são definidas por Oliveira (2007, p. 114) onde o estudo descritivo “permite a explicação das relações de causa e efeito dos fenômenos, ou seja, analisar o papel das variáveis que influenciam ou causam o aparecimento dos fenômenos”.

Este estudo é qualitativo-descritivo utiliza uma abordagem de estudo de caso que se trata de uma abordagem metodológica de investigação notadamente apropriada quando procura-se compreender acontecimentos e contextos complexos, nos quais encontram-se envolvidos múltiplos fatores. Esta abordagem se adequa à investigação em educação, a partir do momento em que o investigador é confrontado com situações complexas, de tal maneira que isso dificulta a identificação das variáveis consideradas importantes e procura encontrar interações entre fatores relevantes próprios da situação, quando o objetivo é descrever ou analisar o fenômeno em questão, de uma forma profunda e global, e/ou quando

o investigador pretende abranger a dinâmica do fenômeno, do programa ou do processo. Portanto, o estudo de caso é definido com base nas características do fenômeno em estudo e com base num conjunto de características associadas ao procedimento de recolhimento dos dados e às estratégias de análise dos mesmos (YIN, 1994).

Pelo exposto anteriormente, conclui-se que a pesquisa qualitativa-descritiva com abordagem de estudo de caso foi a mais apropriada para se entender e analisar os procedimentos de carregamento e estabilidade da balsa no carregamento das peças, garantindo que o estudo seja realizado de forma satisfatória tornando o transporte dos equipamentos adequado na navegação interior, com o mínimo de risco possível.

REFERENCIAL TEÓRICO

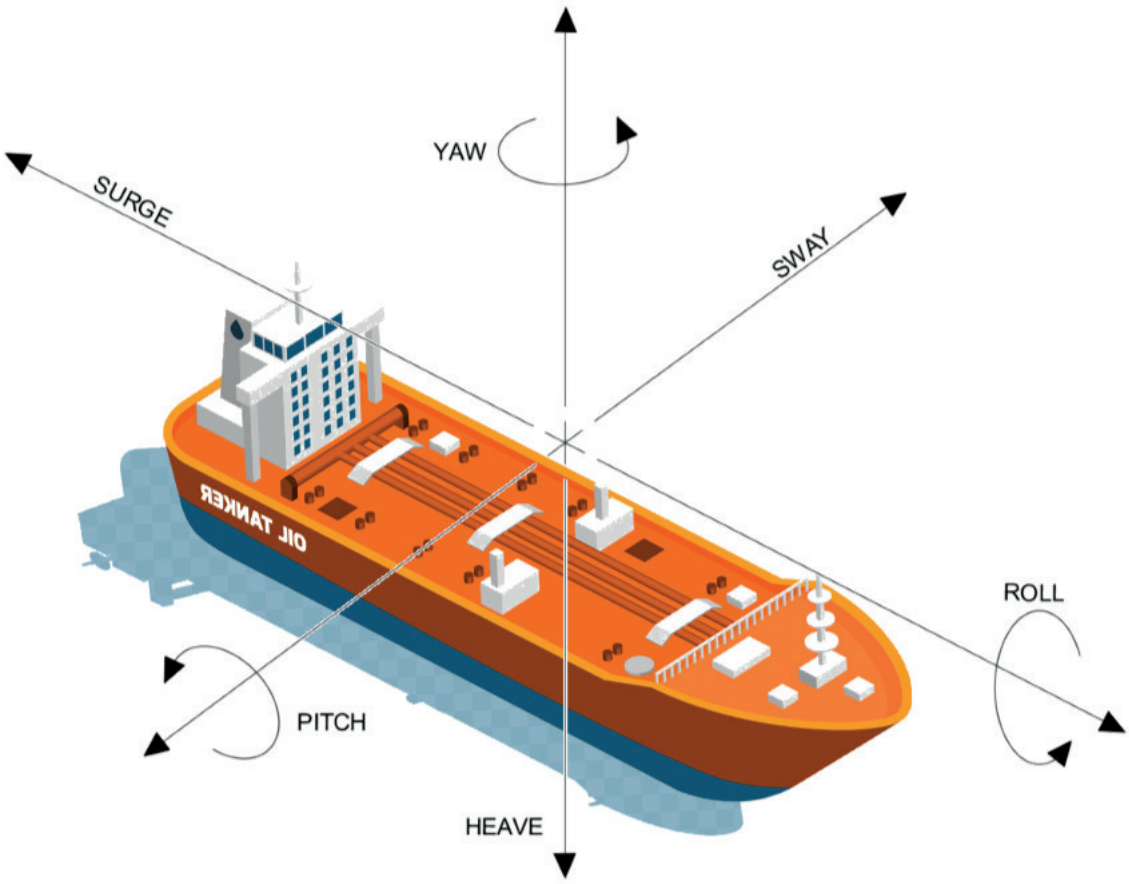
Segundo Martins (2010), um corpo rígido flutuando livremente sobre a superfície de um fluido tem seis graus de liberdade – três de translação e três de rotação. Para uma perturbação no estado de equilíbrio, a arquitetura naval refere-se aos movimentos nos seis graus de liberdade como apresentado na Figura 1:

– Movimento de translação a vante e a ré (SURGE).
– Movimento de translação transversal (SWAY).
– Movimento de translação no eixo vertical (HEAVE).
– Movimento de rotação em torno da linha de centro Proa-Popa (ROLL).
– Movimento de rotação em torno do eixo transversal (PITCH).
– Movimento de rotação em torno do eixo vertical (YAW).

Os termos *heel* e *trim* são utilizados em situações estáticas ou quase-estáticas. *Roll* e *pitch*, são termos utilizados em condição de movimento ou dinâmica, as quais estão submetidas as condições de mar.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 1. Movimentos de um navio.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao sofrer uma perturbação em seu estado de equilíbrio o corpo pode se comportar de maneira estável, neutra ou de equilíbrio instável se, após removido a causa da perturbação o corpo retornar a sua posição original, permanecer como está ou continuar se afastando de sua atitude original respectivamente. Correspondentemente é dito de estabilidade positiva, neutra ou negativa.

Um corpo livremente flutuando na superfície de um fluido deve estar estável em *heave* desde que a força de flutuação seja igual ao seu peso e nas condições anteriormente citadas, e também estará em estabilidade neutra para *sway*, *surge* e *yaw*. A arquitetura naval está diretamente ligada a corpos flutuando na água, entretanto o resultado é aplicável para outros tipos de fluidos (KHURANA, 1998).

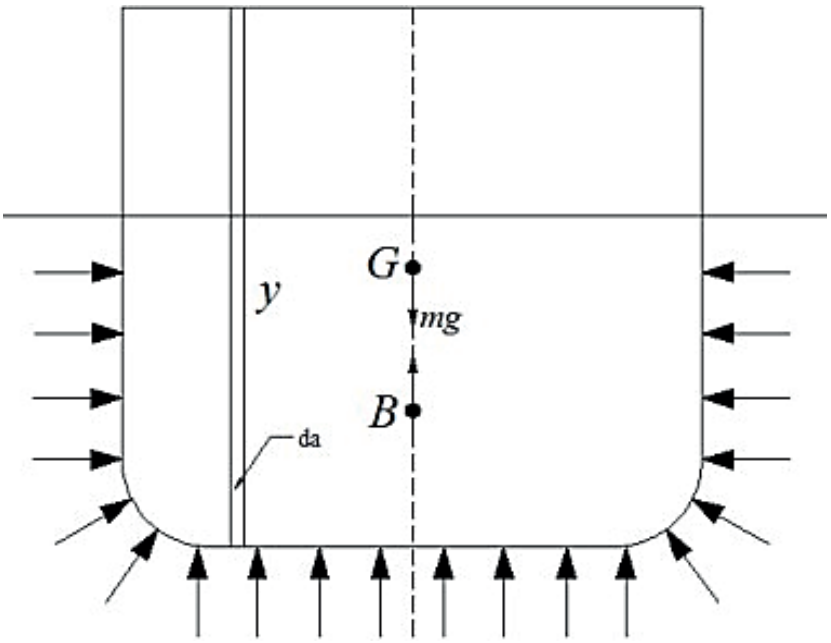
Um corpo flutuando livremente em água parada, experimenta uma força verticalmente para baixo devido a ação da gravidade (g). Se o corpo tem uma massa m, esta força será mg e é conhecida como peso. Desde que o corpo esteja em equilíbrio, então há uma força de mesma intensidade e na mesma linha de ação do peso mas agindo em sentido oposto ao mesmo. Esta força oposta é gerada pelas pressões hidrostáticas que agem no corpo (Figura 2).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

A soma das componentes verticais deve ser igual ao peso, e as componentes horizontais cancelam-se tendo uma resultante nula.

A força gravitacional *mg* pode ser considerada atuando no ponto G, que é dito o centro de massa do corpo, geralmente conhecido como centro de gravidade. Similarmente, a força oposta que equilibra o sistema pode ser concentrada no ponto B (centro de carena ou centro de flutuação).

Figura 2. Corpo flutuando.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Consideram-se as forças hidrostáticas atuando em uma área infinitesimal da, a uma profundidade y abaixo da superfície, como:

$$Pressão = densidade\ (\rho) \cdot aceleração\ da\ gravidade\ (g) \cdot profundidade(y)$$

$$P = \rho \cdot g \cdot y \qquad \text{Eq. (1)}$$

A força normal aplicada no elemento de área da é igual a $\rho \cdot g \cdot y \cdot da$.

Se θ é o ângulo de inclinação do corpo com relação a linha horizontal, então a componente vertical da força (empuxo E) é:

$$dE = (\rho \cdot g \cdot y \cdot da) \cdot cos\theta$$

$$dE = \rho \cdot g \cdot (volume\ infinitesimal\ submerso)$$

Efetuando a integração de todas as forças verticais tem-se:

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

$$E = \rho \cdot g \cdot \nabla \qquad \text{Eq. (2)}$$

Onde ∇ é o volume imerso do corpo.

O volume imerso (∇) também pode ser considerado o peso do volume de água deslocado. Esta é a intensidade da força de empuxo ou de flutuação.

Cálculo do volume submerso

Uma vez que a forma submersa define o volume, pode-se calcular esse volume submerso por:

$$\nabla = \int A_b \cdot dx \qquad \text{Eq. (3)}$$

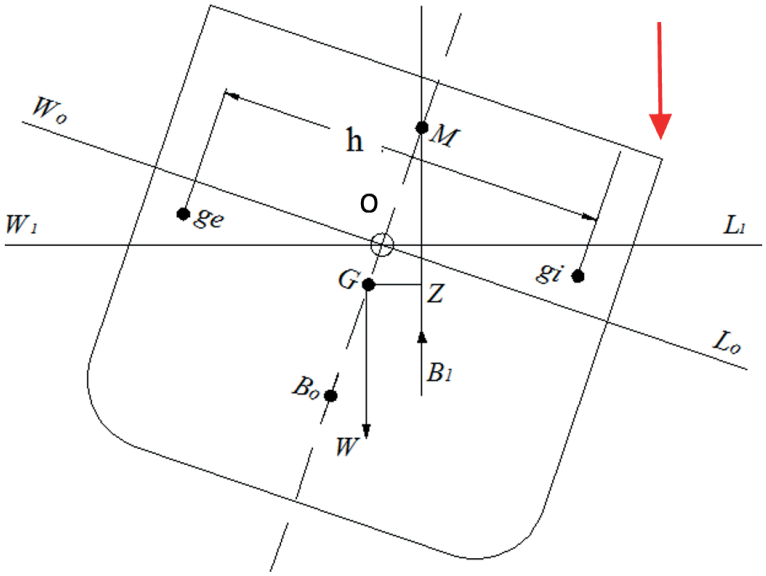
Uma forma mais comum de encontrar o volume submerso, uma vez conhecido o volume deslocado, é fazer uso das curvas de Bonjean. Estas são curvas relacionam áreas das seções transversais imersas (Ab), plotadas em relação ao calado ou carregamento. Os valores de x estão relacionados ao comprimento da embarcação.

O conceito de estabilidade de um corpo flutuando pode ser explicado ao considerá-lo inclinado com relação a sua posição de estabilidade devido aplicação de uma força externa (seta vermelha) que, ao ser removida, fará com que o corpo retorne a sua posição original, conforme ilustrado na Figura 3, onde uma embarcação flutua originalmente conforme a linha d'água W_oL_o, e ao se aplicar a força externa, rotaciona transversalmente, de um pequeno ângulo, para a nova posição W_1L_1.

A inclinação não afeta o posicionamento do ponto "G" da embarcação, uma vez que não haja deslocamento de pesos dentro da embarcação. Entretanto a inclinação afetará a forma do volume submerso e consequentemente o cento de flutuação "B" deslocar-se-á de B_0 para B_1. Isso ocorre porque o volume representado por W_0OW_1 emerge, e um volume igual representado por L_0L_1 submerge na água.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 3. Estabilidade em pequenos ângulos.



Fonte: Elaborado pelos autores adaptado de Barbosa (2008).

A inclinação não afeta o posicionamento do ponto “G” da embarcação, uma vez que não haja deslocamento de pesos dentro da embarcação. Entretanto a inclinação afetará a forma do volume submerso e consequentemente o cento de flutuação “B” deslocar-se-á de B_0 para B_1. Isso ocorre porque o volume representado por W_0OW_1 emerge, e um volume igual representado por L_0OL_1 submerge na água.

Se g_e e g_i são os centroides das cunhas e $\overline{g_e g_i} = h$ então:

$$B_0B_1 = \frac{v \cdot h}{\nabla} \qquad \text{Eq. (4)}$$

Onde v é o volume da cunha e ∇ é o volume total da embarcação.

Nesse momento, a força de empuxo começa a atuar na vertical que passa pelo ponto B_1 e intercepta a linha vertical anterior no ponto “M” conhecido como metacentro, no qual, para pequenos deslocamentos (inclinação), pode ser considerado um ponto fixo. O peso W = m · g agindo de cima para baixo e a força de empuxo, de mesma magnitude, agindo verticalmente para cima, não estão sendo aplicadas na mesma direção, formando um binário W x GZ, onde GZ é uma perpendicular a B_1 M partir de G.

Dessa forma, esse binário tende a restaurar o corpo a sua posição original, e nessa condição é dito que o corpo encontra-se em equilíbrio estável. $GZ = GM \cdot \text{sen}\,\theta$ e é chamado de “braço de alavanca” (ou braço de recuperação) e “GM” é a altura metacêntrica.

Considerando como referência a linha de base e chamando de “K” ao ponto mais baixo da perpendicular vertical que passa pela mesma pode-se dizer que:

$$KM = KB + BM \qquad \text{Eq. (5)}$$

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Como a diferença entre KM e KG encontra-se GM, ou altura metacêntrica, tem-se que:

$$B_0B_1 = B_0M\ sen\ \alpha \qquad \text{Eq. (6)}$$

Nota-se que:

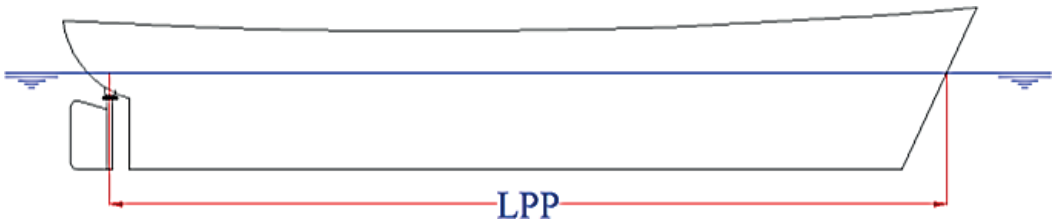
$$BM_t = \frac{I_t}{\nabla} \qquad \text{Eq. (7)}$$

Onde BM_t é o raio metacêntrico transversal e I_t é o momento de inércia transversal da área de flutuação, ou seja, a altura do metacentro acima do centro de flutuação é encontrado ao dividir-se o segundo momento de área do plano da linha d'água em torno de sua linha de centro, pelo volume deslocado.

Dessa maneira é observado que B e M são dependentes somente da geometria do casco e da linha d'água que está flutuando, e consequentemente podem ser determinados sem o conhecimento prévio da carga que causa a flutuação naquele calado.

Um diagrama do metacentro em que o KB e o KM são plotados com relação ao calado, é a forma conveniente para definir as posições de B e M para uma faixa de calados paralelos a um plano de linha d'água da carga.

Figura 4. Comprimento entre perpendiculares.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Analisando longitudinalmente a embarcação, tem-se que o comprimento entre perpendiculares (LPP) é a distância entre as perpendiculares de vante e de ré da embarcação (Figura 4). A perpendicular de vante é uma linha vertical imaginária traçada na interseção da linha d'água de projeto com o casco na parte frontal da embarcação. Já a perpendicular de ré é uma linha vertical imaginária traçada na direção da madre do leme que, geralmente, fica na popa da embarcação em embarcações propulsadas, ou no encontro da linha d'água de projeto com o casco a ré da embarcação caso não seja propulsada.

O valor do trim (t) é encontrado subtraindo-se o calado ré ($T_{ré}$) com o calado de vante (T_{avante}). Portanto, é a inclinação que o barco sofre longitudinalmente. Se o trim for positivo, ou seja, se o calado de ré for maior que o calado de vante a embarcação está sofrendo um *trim de ré*, isso significa que a popa da embarcação está mais imersa que a proa em relação

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

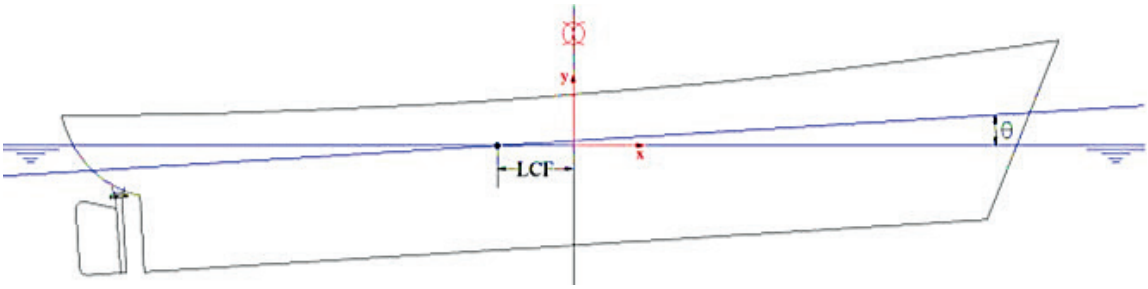
a linha de base. Se for o contrário a embarcação está com *trim de proa* ou *de vante*, onde a proa está mais imersa que a popa (Figura 5).

$$t = T_{ré} - T_{vante} \quad \text{Eq. (8)}$$

Devido o formato do casco das embarcações, geralmente, não ser retilíneo a média entre os calados de vante e de ré é diferente do calado que a embarcação apresentaria sem *trim* com o mesmo deslocamento (T_{ef}). Para pequenos ângulos, esta variação (δT) pode ser estimada (LEWIS, 1988).

$$\delta T = T_{ef} - \left(\frac{T_{ré} + T_{vante}}{2}\right) \quad \text{Eq. (9)}$$

Figura 5. Trim (t).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tendo os valores de LCF (ponto onde ocorre a rotação) e o ângulo de *trim*, pode-se encontrar os valores dos calados a vante e a ré e vice-versa.

$$T_{vante} = T_{ef} - \left(\frac{LPP}{2} + LCF\right) \cdot tan\,\theta \quad \text{Eq. (10)}$$

E

$$T_{ré} = T_{ef} + \left(\frac{LPP}{2} - LCF\right) \cdot tan\,\theta \quad \text{Eq. (11)}$$

Sendo assim:

$$T_{médio} = \left(\frac{T_{ré} + T_{vante}}{2}\right) = T_{ef} - LCF \cdot tan\,\theta \quad \text{Eq. (12)}$$

Logo, verifica-se que o valor de *trim* também pode ser encontrado pela expressão:

$$t = LPP \cdot tan\theta \quad \text{Eq. (13)}$$

Caso durante o carregamento a embarcação apresente *trim* será necessário estabilizá-la com a utilização de lastro.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Para falar sobre o método de Balanceamento por Lastro inicialmente, define-se que lastro é qualquer material usado para aumentar o peso e ou balancear um objeto. Nos navios, o lastro é necessário para manter seu equilíbrio hidrostático. Silva (2004) explica que, no passado, o lastro utilizado em navios era sólido (areia, madeiras, rochas) o que causava certa instabilidade, especialmente com o movimento de embarque e desembarque da carga nos portos.

A partir de 1880, com a melhoria da estrutura dos navios – surgimento dos motores a combustão e a construção de navios com casco de aço que aumentou a capacidade de carga transportada – a operação de lastreamento com sólidos foi se tornando progressivamente mais demorada e passou-se então a usar a água do mar como lastro.

Com o tempo, as embarcações começaram a utilizar a própria água dos portos como lastro, por conta da facilidade para encher e esvaziar os compartimentos. Dessa forma, água de lastro é o nome pelo qual se tornou conhecida internacionalmente a água utilizada pelos navios de carga para manterem a estabilidade e integridade estrutural quando navegando sem carga, ou durante algum procedimento, com vistas a assegurar condições mínimas de estabilidade, governo, manobra, carga e descarga (MARQUES, 2015).

Neste trabalho, houve a necessidade de se utilizar lastro com água do rio.

MÉTODOS DE PESQUISA

Os equipamentos a transportados foram: 1 (um) rotor da turbina de 320 ton com 8,834 m de diâmetro máximo e 5,039 m de altura e 1 (um) cone Suporte de 60 ton de diâmetro máximo de 6,419 e altura de 5,15 m (Figura 6).

Figura 6. Rotor de 320 ton (a) e Cone de 60 ton (b).



(a) (b)

Fonte: Foto tirada pelos autores.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

O meio de flutuação utilizado no estudo foi uma Balsa para o transporte de carga geral sobre o convés com o nome de LINAVE II (Figura 7) da empresa LINAVE (Luiz Ivan Navegação LTDA).

Figura 7. Balsa LINAVE II.



Fonte: Foto tirada pelos autores.

A Balsa foi construída pelo estaleiro ETN – Empresa Técnica Nacional no ano de 1997. Ela opera na navegação interior (área 2) e possui as seguintes características principais:

– Comprimento Moldado: 73,00 m;
– Boca Moldada: 18,00 m;
– Pontal: 2,8 m;
– Calado Leve: 0,53 m;
– Calado Máximo Carregado: 2,20 m;
– Deslocamento Leve: 416 ton;
– Porte Bruto: 1702,76 ton.
– Espaçamento entre cavernas: 1,65 m;
– Espaçamento entre anteparas transversais estanques: 11, 00 m.

No estudo considerou-se o carregamento da balsa no porto Carinho em Manaus com destino em Altamira. No carregamento, em Manaus, construiu-se uma rampa adequada e compatível com os resultados deste estudo.

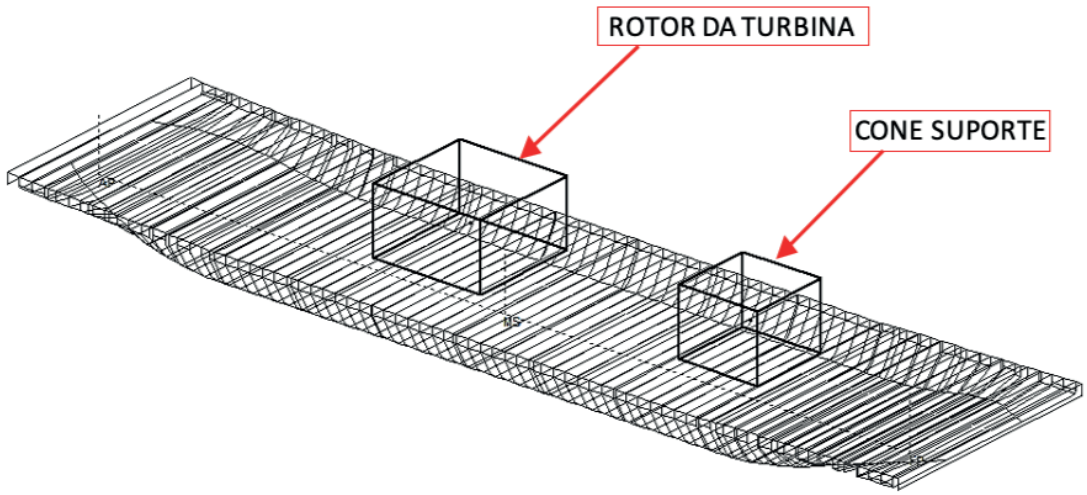
Modelou-se, então, o formato do casco e porões considerando o carregamento sobre apoios montados sobre o convés de 1 rotor e 1 cone suporte.

Considera-se a seguinte sequência de carregamento: primeiramente, o Rotor de 320 ton, localizado com o centro de massa sobre o cruzamento da antepara transversal da caverna 18 com a estrutura reforçada da linha de centro e depois o Cone Suporte de 60 ton localizado com o centro de massa sobre o cruzamento da antepara transversal da caverna 32 e a estrutura reforçada da linha de centro, onde o centro de gravidade do conjunto ficou

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

a 30,598 m a vante do espelho de popa da embarcação (Figura 8). Esta sequência foi definida devido a necessidade de o rotor ficar na antepara logo atrás da meia nau e a popa da embarcação ter presente duas traves e um cabeço para amarração ao rebocador que impossibilitam a passagem da linha de eixo com as peças pela popa.

Figura 8. Modelo da embarcação e cargas sobre o convés.



Fonte: Elaborado pelos autores (software HECSALV).

DISCUSSÃO

Para o carregamento acima descrito foram analisadas as condições de TRIM da embarcação sem a aplicação de lastro para balanceamento do momento gerado pela carga excêntrica em relação ao centro de massa da balsa e avaliado o equilíbrio estático da embarcação.

Após a identificação criou-se um sequencial para o carregamento do meio flutuante. Para a modelagem utilizou-se a tabela de cotas, medida em desenho original em escala, da embarcação LINAVE II.

A modelagem da carga foi feita a partir das dimensões principais dos equipamentos e o centro de gravidade localizado conforme descrito no anterior deste trabalho.

Listados abaixo estão os valores de calados nas perpendiculares de acordo com o software HECSALV, assim como o ângulo de banda (se a embarcação está adernando) e o ângulo de trim na condição leve da embarcação, ou seja, sem carga.

– Calado na Perpendicular de Vante: 0,502 m;
– Calado na perpendicular de Ré: 0,537 m;
– Ângulo de Banda: 0º;
– Ângulo de TRIM a ré: 0,03º.

A linha d'água na condição leve e os tanques da embarcação são definidos na Figura 9, onde BB são os tanques de bombordo (esquerda), C os tanques centrais e BE os tanques de boreste (direita).

Figura 9. Linha d'água na condição leve e tanques da balsa.



Fonte: Elaborado pelos autores (software HECSALV).

ANÁLISE

Para o início do carregamento do Rotor e, posteriormente, do Cone Suporte tornou-se necessário lastrear a balsa com o calado médio encontrado pelo software de computador na situação final para transporte.

De acordo com o estudo o calado médio do conjunto carregado é de 0,9625 m e para que a embarcação sem os equipamentos ficasse, aproximadamente, com esse calado foi necessário que se lastreasse os tanques 2C com 65% e 6C com 85% para que os calados a vante e a ré ficassem com 0,961 m e 0,998 m, respectivamente. Assim o pé de piloto (distância entre o fundo do casco e leito do rio) na margem do rio ficou em torno de 50 cm.

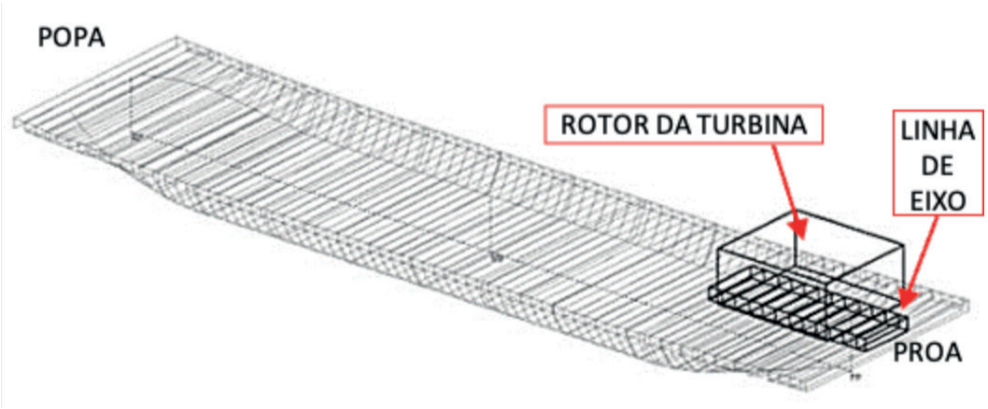
Com o avanço do carregamento os tanques foram carregados ou descarregados de acordo com as exigências. A linha de eixo possui 12 eixos, 30 m e 90 ton. Sendo assim, este estudo mostrará a definição dos lastros de acordo com a necessidade de cada situação a partir da entrada dos eixos.

Para o posicionamento da embarcação para a construção da rampa que será utilizada no embarque das peças, deve-se considerar que a balsa chegará tão próximo do cais até o limite de ter uma lâmina d'água de 1,4625 m, medidos na mesma direção das marcas de calado da balsa (condição indicada acima).

Em nenhuma ocasião deve-se operar o embarque da carga com a embarcação encalhada, ou apoiada no fundo, pois ela não está estruturada para operação em balanço podendo colocar em risco a carga e a embarcação.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 10. Modelo de Carregamento da entrada do Rotor da Turbina.



Fonte: Elaborado pelos autores (software HECSALV).

O calado na perpendicular de ré inicial (sem lastro) teve um valor negativo devido o momento gerado pelo carregamento do eixo ser elevado o suficiente ao ponto da popa sair da água.

A Figura 10 e Figura 11 mostram a condição de carregamento mais crítica, com o rotor da turbina e a linha de eixo de 90 ton, a linha d'água e o lastreamento da condição, respectivamente. A condição mais crítica acontece quando o décimo segundo eixo da linha de eixo sobe na embarcação. Cada eixo suporta 26,67 ton do peso do rotor (320 ÷ 12) mais 7,5 ton do peso da linha de eixo (90 ÷ 12) totalizando 34,17 ton. Assim, nesse momento, o peso total do rotor mais a linha de eixo se concentra na proa da embarcação. Abaixo estão as seguintes características da embarcação nesta condição e o lastreamento correspondente:

– Calado na Perpendicular de Vante inicial (sem lastro): 2,329 m;
– Calado na perpendicular de Ré inicial: -0,699 m;
– Ângulo de Banda: 0º;
– Ângulo de TRIM a vante inicial: -3,028 m (2,59º);
– Tanques lastreados: 1C, 2BE, 2C, 2BB;
– Quantidade de Lastro: 100%, 100%, 100%, 100% (respectivamente);
– Peso de cada lastro (ton): 83,524; 124,589; 282,849, 124,589 (respectivamente);
– Calado na Perpendicular de Vante final (com lastro): 0,963 m;
– Calado na perpendicular de Ré final: 2,202 m;
– Ângulo de Banda: 0º;
– Ângulo de TRIM a vante final: 1,329 m (1,14º).

O objetivo do lastro é manter o calado da embarcação a vante em 0,9625 m que é o calado médio com os dois equipamentos no convés. Esse valor permite com que a embarcação se mantenha nivelada com a margem do rio sem encalhar.

Figura 11. Tanques lastreados com percentual de lastro com o Rotor e a linha de eixo na posição inicial do carregamento.



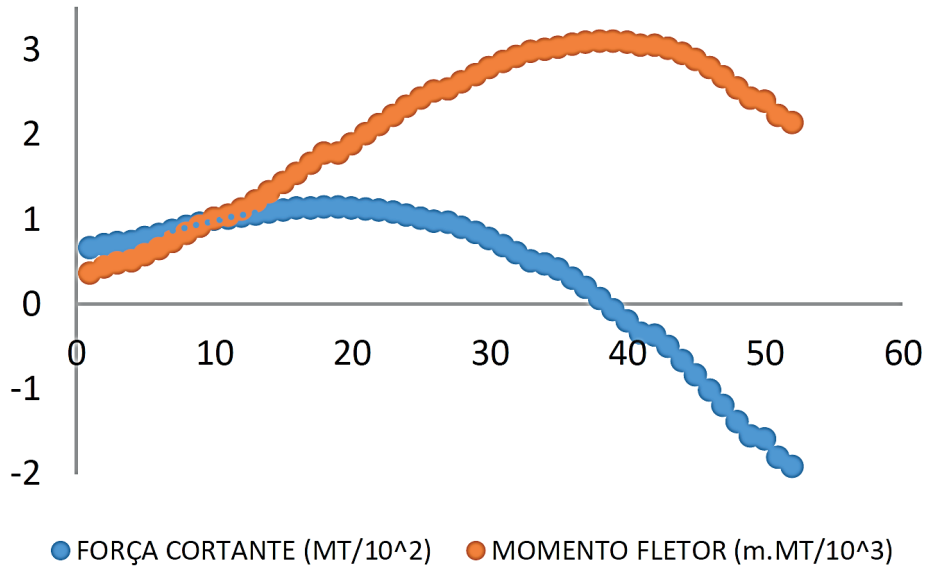
Fonte: Elaborado pelos autores (software HECSALV).

Portanto, todos os estudos de lastro foram realizados de forma que o calado final a vante girasse em torno desse valor. Esta situação é a mais crítica de todo o carregamento e por isso foi realizado um estudo da capacidade de resistência da seção mestra. Através dos planos da embarcação foi possível identificar os seguintes valores:

– Área transversal das estruturas da seção mestra: 2862,85 cm²;
– Inércia da seção mestra: 194,40 cm².m²;
– Distância da Linha neutra (LN) até a linha de base (LB): 1,71m;
– Distância da LN até o convés principal: 1,09 m;
– Momento de inércia em torno da linha neutra: 0,9216 m².m²;
– Módulo de flexão mínimo: 0,5389 m.m².

Com isso, encontrou-se a força cortante da seção mestra e o momento fletor máximo de 3.092 m.ton a 44,17 m a vante da perpendicular de ré (GRÁFICO 1).

Gráfico 1. Momento Fletor e Força Cortante da situação mais crítica do carregamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerando a tensão admissível do aço de 140 MPa, tem- se que:

$$Tensão\ admissível\ do\ aço\ \geq \frac{Momento\ fletor\ máximo}{Módulo\ de\ flexão\ mínimo}$$

$$140MPa \geq \frac{3.092\ m \cdot ton}{53{,}89\ m \cdot m^2}$$

$$140MPa \geq \frac{27.507.802{,}47\ m \cdot N}{0{,}5389\ m \cdot m^2}$$

$$140.000.000\ N/m^2\ \geq\ 51.044.354{,}18\ N/m^2$$

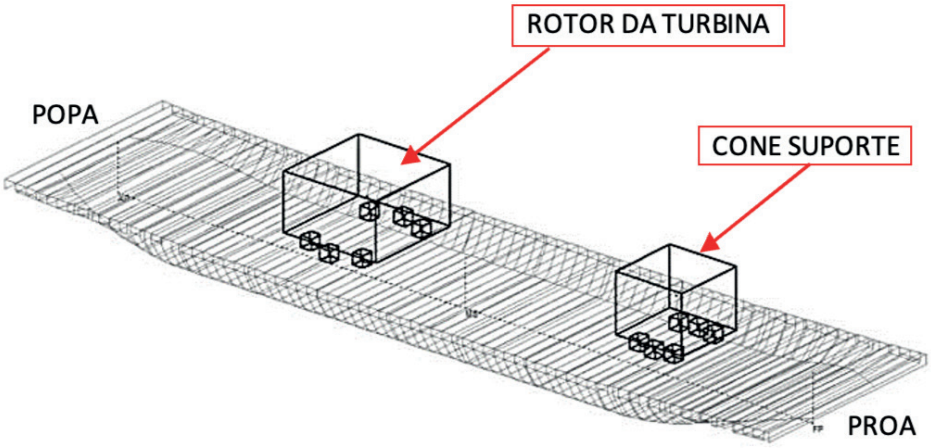
Portanto, na situação mais crítica pode-se observar que a embarcação é resistente o suficiente para não se romper, com uma margem de segurança de 2,74.

A posição final do cone pode ser observada na Figura 12, linha d'água correspondente ao posicionamento final do cone e lastreamento na Figura 13.

Como a linha de eixo, nesse momento, saiu do convés da balsa, não é necessário o nivelamento com a margem e a embarcação navegará sem lastro e com as características indicadas abaixo.

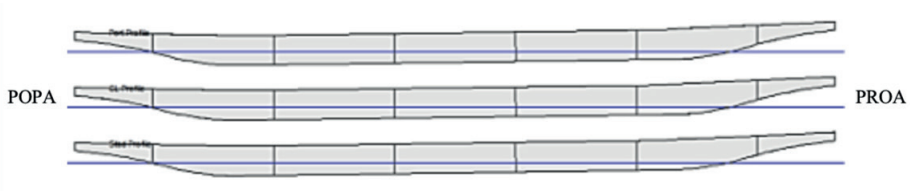
– Calado na Perpendicular de Vante inicial (sem lastro): 0,520 m;
– Calado na perpendicular de Ré inicial: 1,423 m;
– Ângulo de Banda: 0º;
– Ângulo de TRIM a vante inicial: 0,903 m (0,774º).

Figura 12. Posição final do rotor e do cone.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 13. Tanques lastreados com percentual de lastro com o Rotor e cone na posição final.



Fonte: Elaborado pelos autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo definir o plano de carregamento de uma balsa no transporte de dois equipamentos de alto índice de carga concentrada destinados a uma Usina Hidrelétrica. Dessa maneira, o objetivo principal foi alcançado. No momento de apresentação deste artigo a balsa já fez o transporte dos equipamentos e estes chegaram no destino com segurança. O carregamento foi feito de acordo com o processo descrito neste trabalho e o descarregamento foi realizado de forma contrária ao carregamento.

O trabalho foi realizado com sucesso ao ponto de sair nos jornais locais. As reportagens ilustram o avanço econômico da região e a possibilidade de novos transportes como esse, além da conclusão satisfatória da engenharia quanto ao carregamento. Uma das ilustrações está exposta na Figura 14.

Figura 14. Reportagem feita pelo jornal O Liberal.



Fonte: Foto tirada pelos autores (Jornal O Liberal).

Para trabalhos futuros, seria interessante a realização de estudos sobre a estabilidade para carregamentos de outros tipos de equipamentos utilizando a mesma metodologia ou

produtos considerando outros tipos de embarcações também utilizadas na região. Além disso, é de extrema importânica realizar estudos para a segurança operacional desse tipo de carregamento em sistemas flutuantes.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, F. S. Apostila de Resistência dos Materiais. 2008. Disponível em:<http://www.ufjf.br/lrm/files/2009/04/resmat2007a.pdf>. Acesso em: 05/11/2022.

GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 2, mar./abr., 1995.

KHURANA, S. Patents Protect Deepwater Platform Concepts. 1998. disponível em: <http://www.ogj.com/articles/print/volume-96/issue-25/in-this-issue/production/patents -protect--deepwater-platform-concepts.html>. acesso em: 05/11/2022.

LEWIS, E. V. PNA – Principles of Naval Architecture. Volume I – Stability and Strength. The Society of Naval Architecture and Marine Engineers – SNAME. Second Revision, 1988, 310p.

MARQUES, V. A. Pensamento Verde. Comércio exterior e o meio ambiente: O que são águas de lastro? 2014. Disponível em: <http://www.pensamentoverde.com.br/colunistas/comercio-exterior-e-meio-ambiente-o-que-sao-aguas-de-lastro/>. Acesso em: 04/11/2022.

MARTINS, M. R. Hidrostática e Estabilidade do Navio e de Sistemas Oceânicos. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2010.

OLIVEIRA, M. M. Como fazer pesquisa qualitativa. São Paulo: Vozes, 2007.

PENA, R. F. A. A distribuição da água no mundo. Mundo Educação. 2014. Disponível em: <http://www.mundoeducacao.com/geografia/a-distribuicao-agua-no-mundo.htm#comentarios>. Acesso em: 04/11/2022.

SILVA, J. et al. Água de lastro e bioinvasão. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

TEIXEIRA, E. As três metodologias: acadêmicas, da ciência e da pesquisa. 8. ed. – Petrópolis, RJ: Vozes, 2011. p.137.

YIN, R. Case Study Research: Design and Methods. (2ª Ed) housand Oaks, CA: SAGE Publications. 1994.

14

Modelo de otimização de conflitos entre usos múltiplos da água – uma análise para geração de energia e navegação na bacia do rio Tapajós

Nelio Moura de Figueiredo
Universidade Federal do Pará - UFPA

Claudio José Cavalcante Blanco
Universidade Federal do Pará - UFPA

Lúcio Carlos Pinheiro Campos Filho
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221110885

RESUMO

No atual contexto de globalização ambiental e social em que se vive, a implementação de sistemas de análise de conflitos hídricos gerados pela operação de usinas hidrelétricas é condição primária. Nesta pesquisa foram desenvolvidos e testados modelos estocásticos, baseados em programação não linear, via gradiente reduzido, destinado a minimização de conflitos de usos múltiplos da água, remanescentes de usinas hidrelétricas, considerando diferentes cenários operacionais como navegação, geração de energia, inundação, e vazão hidrológica. Os modelos foram aplicados à bacia do rio Tapajós, para o futuro aproveitamento hidro energético (AHE) de São Luiz do Tapajós, Itaituba, PA. Os resultados aferidos evidenciam que os modelos desenvolvidos são ferramentas de fundamental importância à otimização operacional de sistemas de reservatórios com usos múltiplos, permitindo a otimização de gerações e de defluências em AHE, em períodos de cheia e de estiagem e de grandes demandas energéticas, com a manutenção de condições de navegabilidade em trechos a jusante de barramentos, através de simulações operacionais sustentáveis que minoram conflitos de uso.

Palavras-chave: Usos Múltiplos da Água, Geração de Energia, Navegação, Capacidade de Carga, Conflitos de Usos Múltiplos da Água.

INTRODUÇÃO

A água é um elemento fundamental para preservar as condições básicas de vida (DARBANDSARI *et al.*, 2020). Dada essa noção, o gerenciamento desse recurso é necessário (KROČOVÁ; KAVAN, 2019; MARKOWSKA *et al.*, 2020), devendo incluir um gerenciamento coordenado de usos e a proteção dos recursos hídricos (CHINI *et al.*, 2016), considerando políticas que afetam a disponibilidade e a qualidade e demanda de água, para diversos usos, como agricultura, geração de energia, navegação, transporte e retirada industrial (AGRAWAL; AHIDUZZAMAN; KUMAR, 2018; XIONG *et al.*, 2020). Para possibilitar a coordenação e a integração total de vários usos da água, é necessário estabelecer um gerenciamento adequado da água, com ênfase na estratégia, planejamento e tomada de decisão (BRANCHE, 2017). Aprimorar o gerenciamento de recursos hídricos é uma das principais dificuldades globalmente enfrentadas em relação aos múltiplos usos da água (TORTAJADA *et al.*, 2019). A tomada de decisão sobre o gerenciamento de recursos hídricos é tipicamente guiada por vários objetivos em diferentes setores estratégicos, como geração de energia, irrigação, uso consuntivo e navegação. Embora esses setores estratégicos sejam fundamentais para a economia global, é difícil conciliar seus usos com os interesses e com a proteção do meio ambiente (BRANCHE, 2017).

Processos de tomadas de decisão sobre a gestão de recursos hídricos são composto por uma ampla gama de variáveis associadas a fatores hidrológicos, interesses políticos e sociais, bem como relações custo/benefício e disponibilidade de água (LOCH; ADAMSON; MALLAWAARACHCHI, 2014). Recursos hídricos devem ser gerenciados para gerarem, harmonicamente, múltiplos usos para o suprimento, a geração de energia, navegação, irrigação, indústria e sustentabilidade (LIU *et al.*, 2017; LUNA *et al.*, 2018). Tais requisitos díspares exigem o uso de um sistema integrado de modelagem hidrológica, hidráulica e de qualidade da água (EL AZHARI; LOUDYI, 2019; ZIOGOU; ZACHARIADIS, 2017) para que a metodologia utilizada possa gerenciar a alocação de recursos e satisfazer várias necessidades. usa através de processos que podem otimizar objetivos frequentemente sujeitos a restrições (LIU *et al.*, 2017; REN *et al.*, 2016).

Objetivos conflitantes geralmente ocorrem na operação de reservatórios. O gerenciamento eficaz de recursos hídricos requer a otimização de reservatórios em modelos de otimização capazes de uso múltiplo (AHMAD ALINEJAD; PISHVAEE; BONYADI NAEINI, 2018; LIU *et al.*, 2017; MATROSOV; HAROU; LOUCKS, 2011). Para Dobson; Wagener E Pianosi (2019), a otimização das operações do reservatório tem como objetivo determinar as decisões de liberação e transferência para garantir o suprimento de água, a produção hidrelétrica, a navegação e a mitigação de inundações a jusante. Estudos mostram que a utilização de modelos operacionais pode melhorar significativamente o desempenho dos reservatórios

existentes, usando a teoria da probabilidade, técnicas de programação e sistemas de simulação de fluxo. Essas metodologias de análise e gerenciamento foram revisadas e discutidas em Dobson; Wagener E Pianosi (2019), Giuliani e Herman (2018), Branche (2017), Seifollahi-Aghmiuni; Bozorg-haddad; Mariño (2016), Srinivasan e Kumar (2018).

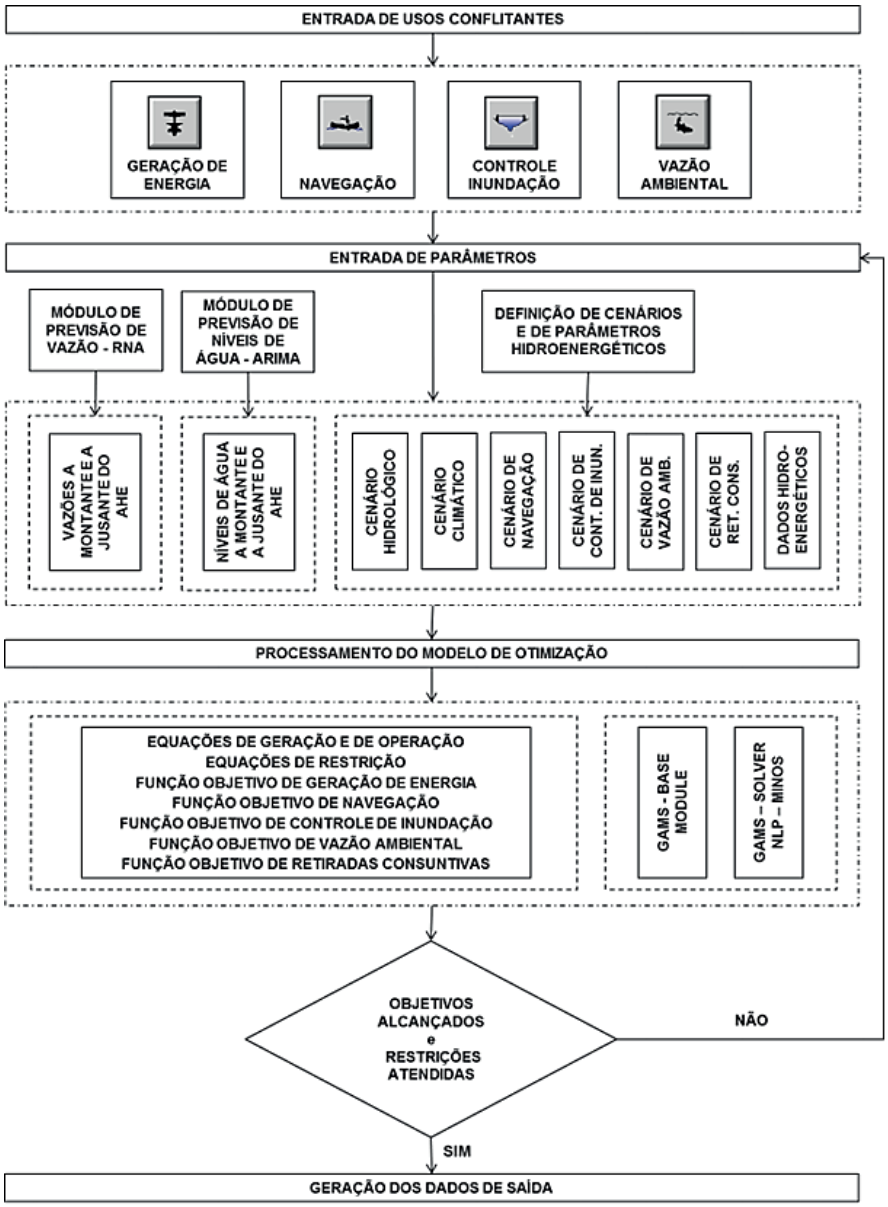
Neste estudo, um modelo de gerenciamento de uso múltiplo da água foi desenvolvido e utilizado para minimizar conflitos de uso relacionados à operação do sistema de reservatórios de usinas hidrelétricas em bacias hidrográficas. O Sistema de Otimização da Água de Uso Múltiplo (Modelo de Gerenciamento de Conflitos), baseado em programação não linear e estruturada nas linguagens C-SHARP e GAMS (General Algebraic Modeling System), foi aplicado ao reservatório da usina hidrelétrica de São Luiz do Tapajós, localizado na bacia do rio Tapajós, Amazônia, Brasil. Estudos de Mendes *et al.* (2015), Rheinheimer; Null e Lund (2015) e Wang *et al.* (2015) corroboram a eficiência do sistema. A validação do modelo permitiu a geração de cenários, incluindo geração de energia, inundação e navegação, que são muito recorrentes na Amazônia.

MÉTODO

O desenvolvimento do sistema de otimização, consistiu em um modelo de gerenciamento de usos múltiplos, que teve por suporte a linguagem de programação estruturada GAMS, acoplada a um solver de programação não linear, desenvolvido pela Universidade de Stanford, USA, denominado MINOS. Rotinas em GAMS desenvolvidas para modelos de gerenciamento de recursos hídricos e gerenciamento de usos da água em rios. O desenvolvimento metodológico da pesquisa apresenta-se de forma simplificada no fluxograma da Figura 1. A estruturação do modelo teve por base os direcionamento e resultados aferidos por Elabd e El-ghandour (2014), Rheinheimer; Null e Lund (2015), Wang *et al.* (2015), Mendes *et al.* (2015) e Loch; Adamson e Mallawaarachchi (2014).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 1. Fluxograma Metodológico.



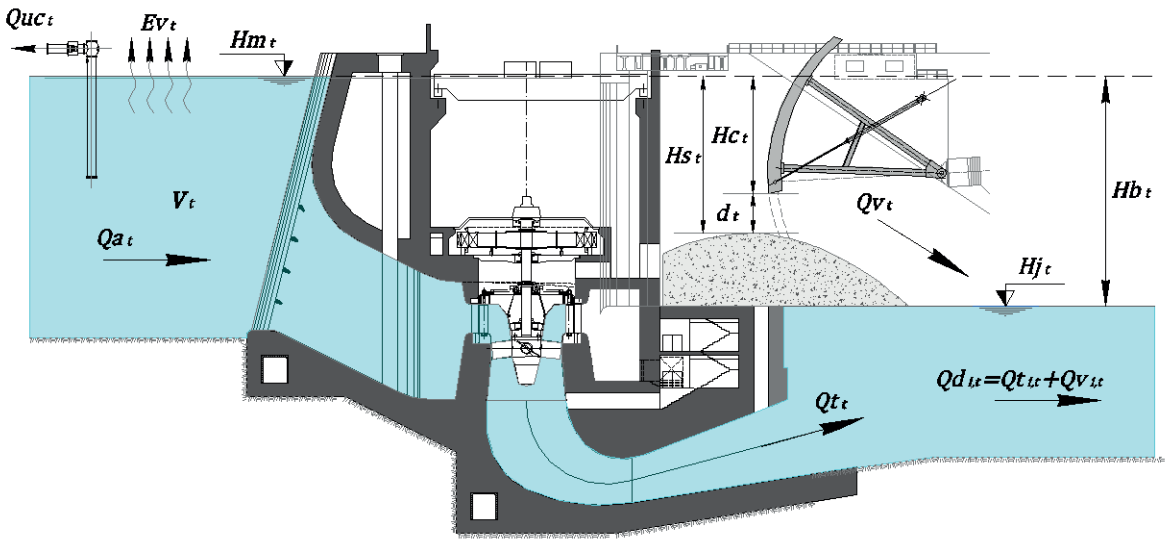
Fonte: Autores (2022).

Equacionamento do Modelo

Devido ao grande número de variáveis utilizadas no desenvolvimento dos modelos de otimização, tendo por base as etapas metodológicas apresentadas no fluxograma da Figura 1, evidenciam-se na Figura 2, em uma seção esquemática de uma usina hidrelétrica a fio d'água, as principais variáveis utilizadas.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 2. Seção esquemática de uma unidade geradora de um AHE.



Fonte: Adaptado de ELETROBRAS/CENEC WORLEYPARSONS (2014).

Em que, V_t é o volume armazenado no reservatório no intervalo t; Qa_t é a vazão afluente ao reservatório do AHE no intervalo t; Ev_t é a perda por evaporação no reservatório do AHE no intervalo t; A_t é a área do reservatório no intervalo t; Hm_t é o nível de água do reservatório a fio d'água no intervalo t; Hs_t é o desnível entre a cota da soleira do vertedouro e o nível de água do reservatório no intervalo t; Hc_t é o desnível entre a cota inferior da comporta do vertedouro e o nível de água do reservatório no intervalo t; d_t é a abertura da comporta do vertedouro no intervalo t; Quc_t é a vazão retirada para uso consuntivo no intervalo t; Qt_t é a vazão turbinada pelo AHE no intervalo t; Qv_t é a vazão vertida pelo AHE no intervalo t; Qd_t é a vazão defluente no AHE no intervalo t; Hj_t é o nível de água a jusante do AHE no intervalo t; Hb_t é a queda bruta média do AHE no intervalo t; e P_t é a energia gerada pelo AHE no intervalo t.

O gerenciamento de usos múltiplos da água na operação de reservatórios em aproveitamentos hidrelétricos, foi feita através de um modelo de otimização e de minimização de conflitos de usos, baseado em parâmetros de geração de energia e de despachos e na parametrização de cenários: de afluências hidrológicas; de afluências climáticas; de condições de navegabilidade; de retiradas consuntivas; de descargas ambientais e de controle de enchente. O desenvolvimento do modelo de otimização foi baseado no uso de funções e restrições lineares e não lineares. O processo de otimização foi feito através da aplicação de regras operacionais baseadas em funções objetivas que vinculam variáveis de entrada à saída do sistema (Castelletti, Pianosi, *et al.*, 2008; Vieira, Cunha, *et al.*, 2011; Mendes, de Barros, *et al.*, 2015). As funções objetivas foram elaboradas a partir da consideração dos múltiplos usos constantemente retratados em usinas hidrelétricas. As variáveis de decisão para esses usos foram direta e indiretamente associadas às funções definidas relacionadas

aos usos: geração de energia, controle de inundações, fluxo ambiental, navegação e retirada de consumo.

- Geração de energia

A Equação 1 representa a função objetivo e foi caracterizada por ser não linear e ter como objetivo maximizar os valores de potência (VEDULA E MUJUMDAR, 2005).

$$Max \dots P_t = \sum \left(\frac{g.\rho.\eta.H_{bt}.Q_{t_t}}{n}\right) \quad (1)$$

Em que P_t é a Energia gerada pelo AHE no intervalo t; η é o rendimento médio do AHE; H_{bt} é a queda bruta média no intervalo t; Q_{tt} é a vazão turbinada pelo AHE no intervalo t e n é o número de intervalos de tempo.

- Controle de inundação

A Equação 2 mostra a função objetivo que minimiza a variação na adição da camada de água em relação a um nível limite de água a jusante, quando $Hj_t \geq Hlcij$.

$$Min \dots \Delta Hcij_t = \sum \left(H_{jt} - Hlcij\right) \quad (2)$$

Em que H_{jt} é o nível de água a jusante do AHE no intervalo t; $Hlcij$ é o nível de água limite a jusante do AHE, onde acima do qual começam a ocorrer inundações a jusante; $\Delta Hcij_t$ é a variação de acréscimo da lâmina de água em relação a Hlj_t no intervalo t.

- Fluxo Ambiental

Em relação à função objetivo que garante esse fluxo, existem duas situações:

Quando $Hj_t \geq Hlaj$, a função objetivo maximiza a variação do aumento da profundidade da água em comparação com um nível limiar de água a jusante da HEU, conforme descrito na Equação 3.

$$Max \dots \Delta Haj_t = \sum \left(H_{jt} - Hlaj\right) \quad (3)$$

Quando $Hj_t < Hlaj$, a função objetivo minimiza a variação na diminuição da profundidade da água em relação a, conforme descrito na Equação 4.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

$$Min \dots \Delta Haj_t = \sum (Hlaj - H_{jt}) \quad (4)$$

Em que Hj_t é o nível de água a jusante do AHE no intervalo t; $Hlcij$ é o nível de água limite a jusante do AHE, onde acima do qual começam a ocorrer problemas ambientais e $\Delta Hcij_t$ é a variação de acréscimo da lâmina de água em relação a $Hlaj_t$ no intervalo t.

- Navegação

Quando $Hj_t \geq Hlnj$, a função objetivo maximiza a variação do acréscimo da lâmina de água em relação a um nível de água limite a jusante do AHE, conforme descrito na Equação 5, onde abaixo deste começam a existir restrições à navegação.

$$Max \dots \Delta Hnj_t = \sum (H_{jt} - Hlnj) \quad (5)$$

Quando $Hj_t < Hlnj$, a função objetivo minimiza a variação do decréscimo da lâmina de água em relação a Hlaj, conforme descrito pela Equação 6.

$$Min \dots \Delta Hnj_t = \sum (Hlnj - H_{jt}) \quad (6)$$

Em que Hj_t é o nível de água a jusante do AHE no intervalo t; $Hlnj$ é o nível de água limite a jusante do AHE, onde acima do qual começam a ocorrer inundações; $\Delta Hlnj_t$ é a variação de acréscimo da lâmina de água em relação a $Hlnj_t$ no intervalo t.

Retiradas Consuntivas

A função objetivo relacionada à demanda por usos consuntivos minimiza os desvios quadrados do fluxo de retirada e é expressa pela Equação 7.

$$Min \dots \Delta Quc_t = \sum (Quc_t - Duc_t)^2 \quad (7)$$

Em que Quc_t é a vazão retirada para usos consuntivos no intervalo t; Duc_t é a demanda por usos consuntivos no intervalo de tempo t; ΔQuc_t é a relação entre oferta e demanda por vazão de usos consuntivos no intervalo de tempo t.

Otimização não-linear de usos múltiplos

Uma função lagrangeana (Chu e Yeh, 1978) foi adicionada aos problemas de otimização nos quais as diferenças entre funções não lineares e suas linearizações são introduzidas na função objetivo. Assim, as não linearidades são resolvidas com as Equações (8), (9), (10), (11) e (12), que são restritas linearmente.

$$min \dots x, y: F(x) + \rho^T x + d^T y - \lambda^T (f - f') + \frac{1}{2} \rho (f - f')^T (f - f') \quad (8)$$

Sujeito a

$$f(x) + (A_1 y) \sim b_1 \quad (9)$$

$$A_2 x + A_3 y \sim b_2 \quad (10)$$

$$l_x \leq x \leq u_x \quad (11)$$

$$l_y \leq x \leq u_y \quad (12)$$

A função objetivo da Equação (8) foi chamada de função Lagrangeana Aumentada, λ é o vetor de multiplicadores de Lagrange; ρ é o parâmetro de penalidade e (f - f') que é usado no lugar da violação convencional da restrição; u, l, b_2 e b_2 são vetores; A_1, A_2 e A_2 são matrizes com números reais; os componentes de x e y são variáveis não lineares e lineares, respectivamente; f(x) é um vetor de funções contínuas ou diferenciáveis; F(x) é uma função escalar contínua ou diferenciável.

GAMS/MINOS usa o método Reduced Gradient (Lefkoff e Kendall, 1996; Lall e Miller, 1988) juntamente com o algoritmo quasi-Newton para resolver o problema de otimização definido pelas Equações (8), (9), (10), (11) e (12), que possui uma função objetivo não linear e restrições lineares. O algoritmo usado para resolver o problema de otimização consiste em iterações internas e externas. Na iteração interior, o método Gradiente Reduzido é usado para resolver o problema de otimização, onde valores fixos são atribuídos ao multiplicador Lagrange λ e ao parâmetro de penalidade ρ. As restrições das Equações (10) e (01) são transformadas em igualdade pela adição de vetores das variáveis auxiliares positivas S_1 e S_2. Os vetores dos termos independentes b_1 e b_2 são incorporados nessas variáveis de folga e as restrições linearizadas são escritas usando a Equação (13).

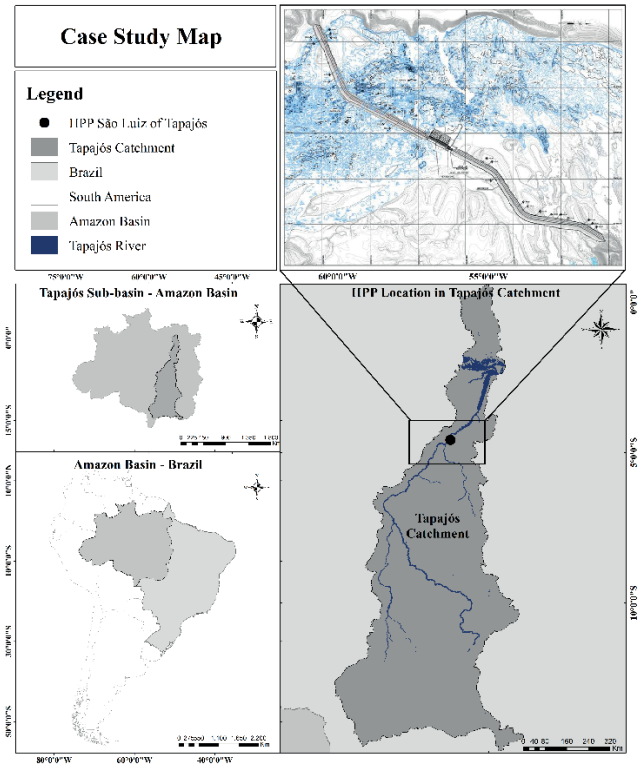
$$\begin{pmatrix} J_k & A_1 \\ A_2 & A_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_k + f_k \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Estudo de Caso

O modelo de gerenciamento de conflitos entre navegação e geração de energia desenvolvido foi aplicado na bacia do rio Tapajós, com a adoção de cenários de simulação hidro operacionais distintos, o que permitiu verificar a adequação e efetividade do modelo. O complexo hidrelétrico está localizado na bacia do rio Tapajós, PA, Brasil, entre a confluência dos rios Teles Pires e Juruena e a foz do Tapajós. A Figura 3 mostra a localização da usina hidrelétrica analisada. Os dados e parâmetros técnicos, operacionais e hidrológicos do modelo foram relacionados à operação da usina hidrelétrica - AHE de São Luiz do Tapajós e obtidos na CNEC e Worley Parsons (2014) e CNEC (2007), em inventários hidrelétricos, ambientais estudos de impacto e outros estudos.

Figura 3. Localização da Usina Hidrelétrica São Luiz do Tapajós.



Fonte: Autores (2022).

- Cenário Hidrológico

Os cenários hidrológicos que foram utilizados para a operacionalização e calibração dos modelos de otimização de conflitos, adotaram diversos padrões de afluências ao reservatório, para diferentes períodos de recorrência. No processo de *input* de dados de entrada nos modelos de otimização, foram definidos três cenários hidrológicos, a saber:

H1 SECO: Este cenário garante que apenas 1% das entradas estejam abaixo de cada valor mensal referenciado e 99% das descargas permaneçam acima.

H2 INTERMEDIÁRIO: Garante que 50% das entradas estão abaixo de cada valor mensal referenciado e, consequentemente, 50% das descargas permanecem acima; e

H3 ÚMIDO: garante que 99% das entradas estejam abaixo de cada valor mensal referenciado e, consequentemente, 1% das descargas permaneçam acima.

Logo, para a inicialização e operacionalização dos modelos, foram adotados diferentes padrões de afluência ao reservatório da Usina Hidrelétrica de São Luiz do Tapajós, consideram as afluências constantes da Tabela 1 e as permanências de cada cenário hidrológico.

Tabela 1. Vazões Afluentes dos Cenários.

	Vazões Afluentes (m³/s)											
	Jan	**Feb**	**Mar**	**Apr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Aug**	**Sept**	**Oct**	**Nov**	**Dec**
H1	7625	10222	17353	15693	9804	6131	4360	3623	3535	3475	3875	5677
H2	16052	21896	26790	25737	17579	9584	5759	4346	3979	4599	6253	9951
H3	29182	39134	39277	38884	30674	14011	7814	5941	5186	8187	11798	17360

Fonte: Autores (2022).

- Cenário de inundação

A verificação dos conflitos entre geração de energia e controle de inundação foi feita com base na observância da relação existente entre os níveis de água a jusante do AHE (Hj_t) e o nível de água limite a jusante do AHE, onde acima do qual começam a ocorrer inundações a jusante do AHE ($Hlcij$). Duas situações foram analisadas: a primeira situação foi caracterizada pela não ocorrência de inundações, pois $Hj_t < Hlcij$. A segunda foi marcada pela ocorrência de inundações a jusante do AHE, uma vez que $Hj_t \geq Hlcij$.

Para a análise de conflitos entre os usos da geração de energia e controle de enchentes, foram definidos e analisados três cenários de controle de enchentes: BAIXO, MÉDIO e ALTO. A Tabela 2 descreve os valores das variáveis adotadas para cada um dos cenários analisados.

Tabela 2. Cenário Hidrológico.

Cenário	**(Hlcij)**	**TR**	**Probabilid.**
C1	13.80 m	10 anos	90%
C2	14.82 m	2 anos	90%
C3	15.85 m	10 anos	90%

Fonte: Autores (2022).

- Cenários de navegação

Na Figura 4, em uma seção transversal de um canal de navegação hipotético, são mostradas duas situações: Na Situação – 01 ($Hj_t \geq Hlnj$) não ocorrem interferências na navegação, pois o nível de água a jusante do AHE (Hj_t) encontra-se acima do nível de água

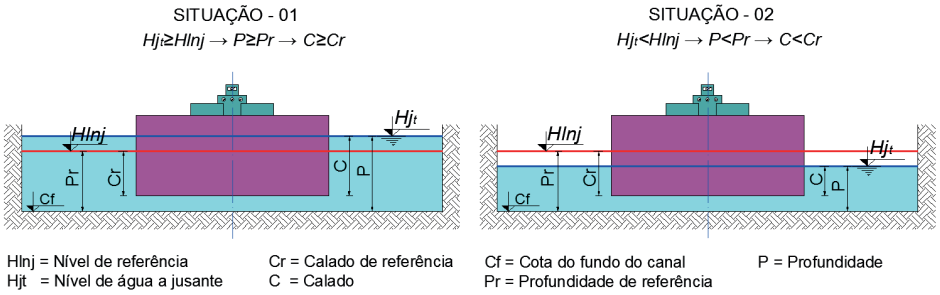
limite a jusante do AHE, onde abaixo do qual começam a ocorrer restrição na navegação ($Hlnj$). Na Situação – 02 ($Hj_t < Hlnj$) ocorre circunstância inversa, pois o nível de água a jusante do AHE (Hj_t) encontra-se abaixo do nível de água limite a jusante do AHE, onde abaixo do qual começam a ocorrer restrição na navegação ($Hlnj$). Na Tabela 3 podem ser observados os níveis de restrição na navegação ($Hlnj$) que caracterizam os cenários de navegação N1 LOW, N2 MEDIUM e N3 HIGH, usados pelo Modelo de Gerenciamento de Conflitos para otimizar conflitos entre geração de energia e uso de navegação.

Tabela 3. Cenários de Navegação.

Cenário	Hlnj	TR	Probabilidade
N1	10.02 m	10 anos	25%
N2	11.00 m	2 anos	25%
N3	11.98 m	10 anos	25%

Fonte: Autores (2022).

Figura 4. Seção transversal de canal hipotético com nível de água acima e abaixo do nível de referência.



Fonte: Autores (2022).

Dois pontos fundamentais de navegação foram observados: ganhos e perdas na profundidade da água a jusante e ganhos e perdas na capacidade de carga de um comboio típico. Na análise de conflitos, adotou-se uma profundidade de 3m como referência na obtenção da profundidade da água necessária para a navegação. Essa profundidade da água permite o uso de comboios típicos com um calado de 2,5 metros com uma folga (*Underkeel Clearance - UKC*) de 50 cm entre o fundo do comboio típico e o leito do rio.

Entrada de dados

As entradas de dados foram divididas em: Informações Mensais, Informações Operacionais do Reservatório e Informações Técnicas. Todas essas informações são comuns aos cenários propostos. A Tabela 4 mostra as informações mensais para cada variável de entrada do sistema de otimização, as informações técnicas e as informações físicas do reservatório do estudo de caso relacionado ao reservatório.

Tabela 4. Dados de entrada.

Mês	Evaporação	Uso Consuntivo
Jan.	20	0.15
Feb.	20	0.15
Mar.	11	0.15
Apr.	3	0.466
May	3	1.515
Jun.	-8	1.964
Jul.	-17	2.497
Aug.	-14	2.28
Sept.	-3	1.931
Oct.	12	0.583
Nov.	20	1.166
Dec.	42	0.15
Informações do Reservatóiio		
Volume Máx	7766 m³	
Volume Mín.	4536 m³	
Altura Máxima	50 m	
Altura Mínima	45 m	
Nível Mín. Jusante	7.04 m	

Fonte: Autores (2022).

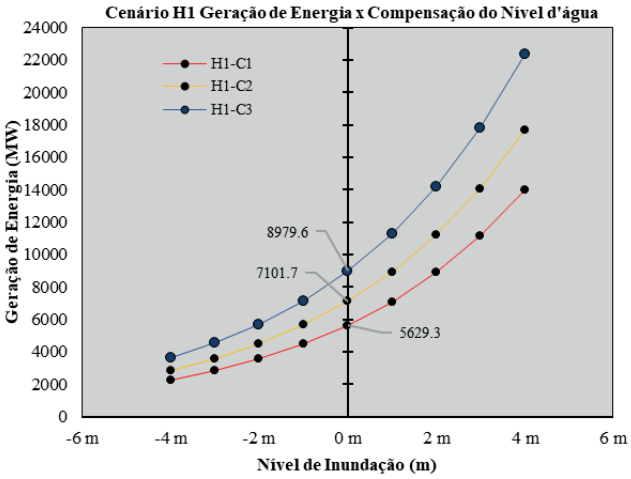
RESULTADOS

Apresentam-se os resultados para diferentes cenários de afluência, com a utilização de dados pluviométricos, fluviométricos e operacionais do futuro aproveitamento hidrelétrico de São Luiz do Tapajós, localizado na bacia do rio Tapajós, evidenciando-se as análises de *trade-off* relacionadas a conflitos de Inundação x Geração de Energia; Geração de Energia x Navegação; e Geração de energia x Capacidade de Carga. As análises em questão foram apresentadas a seguir.

- **Geração de energia x nível de inundação**

As curvas de regressão que mostram conflitos entre os usos da geração hidrelétrica, considerando os cenários H1 SECO, H2 MEDIO e H3 ÚMIDO e controle de inundações, tendo como referência os níveis de referência dos cenários C1, C2 e C3, foram apresentados na Figura 5, Figura 6 e Figura 7. O valor zero no eixo das abcissas representa o limite de conflito entre geração de energia e nível de inundação, ou seja, valores positivos acima dessa linha representam conflitos entre os usos da energia e geração de inundação e valores negativos. Os valores abaixo indicam que não há conflitos. A geração de energia que fornece níveis de água a jusante da UHE abaixo do nível de inundação de 0 m não causará inundações.

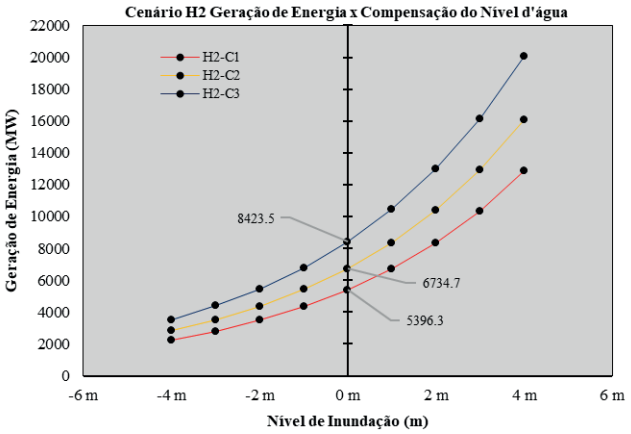
Figura 5. Cenário H1 - Geração de energia x nível de inundação.



Fonte: Autores (2022).

Considerando as entradas do cenário hidrológico H1 na Figura 5 para o cenário de controle de cheias C1, observa-se na curva que gerações de energia acima de 5629,3 MW causaram inundações a jusante. Para o cenário de controle de inundação C2, observa-se na curva que gerações acima de 7101,7 MW causaram inundações a jusante. Para o cenário de controle de inundação C3, observa-se na curva que gerações acima de 8979,6 MW causaram inundações a jusante.

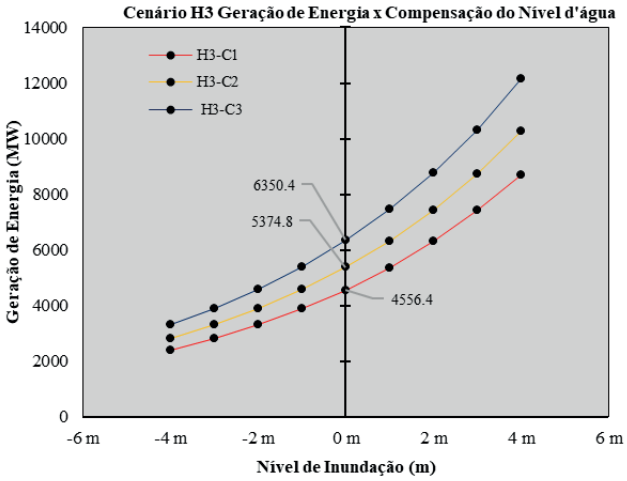
Figura 6. Cenário H2 - Geração de energia x nível de inundação.



Fonte: Autores (2022).

Considerando as entradas do cenário hidrológico H2 na Figura 6 para o cenário C1 de controle de inundações, observa-se na curva de geração de energia acima de 5396,3 MW causadas inundações a jusante. Para o cenário de controle de inundação C2, observa-se na curva que gerações acima de 6734,7 MW causaram inundações a jusante. Para o cenário de controle de inundação C3, observa-se na curva que gerações acima de 8423,5 MW causaram inundações a jusante.

Figura 7. Cenário H3 - Geração de energia x de nível de inundação.



Fonte: Autores (2022).

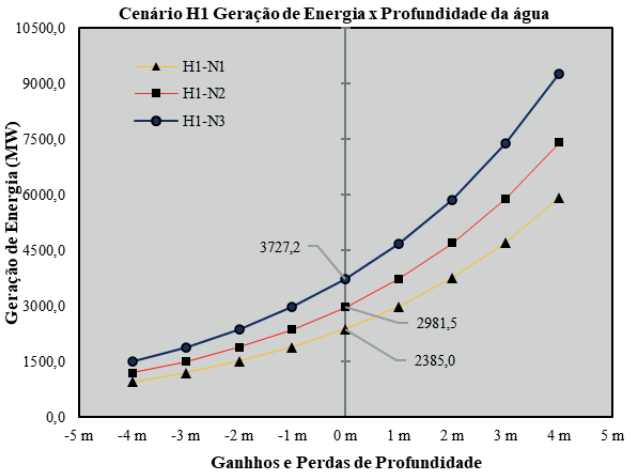
Considerando as entradas do cenário hidrológico H3 na Figura 7 para o cenário de controle de inundação C1, a geração de energia acima de 4556,4 MW pode ser vista na curva causada pelas inundações a jusante. Para o cenário de controle de inundação C2, observa-se na curva que gerações de energia acima de 5374,8 MW causaram inundações a jusante. Para o cenário de controle de inundação C3, observa-se na curva que gerações acima de 6.350,4 MW causaram inundações a jusante.

- **Geração de energia x navegação**

Foram calculados os ganhos ou perdas da profundidade da água, em relação aos níveis de referência dos cenários N1, N2 e N3, considerando as entradas para os cenários hidrológicos H1, H2 e H3. Valores positivos representam ganhos na profundidade da água, onde o nível da água a jusante estava acima dos níveis de referência para os cenários. Por outro lado, valores negativos representam perdas de profundidade da água.

A Figura 7 representa o primeiro cenário de análise, que considerou o cenário hidrológico H1 e os cenários de navegação N1, N2 e N3.

Figura 8. Cenário H1 - Compensação da profundidade da água.

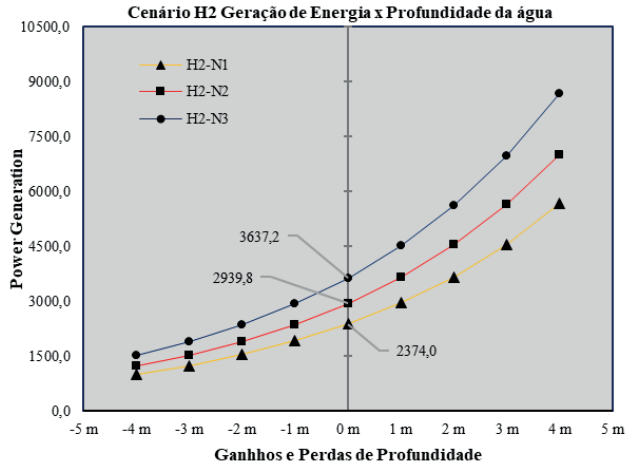


Fonte: Autores (2022).

Considerando as entradas do cenário hidrológico H1 e o nível de referência do cenário de navegação N1 na Figura 8, gerações de energia abaixo de 2.385 MW causam conflitos à navegação, pois resultam em lâmina d'água abaixo de 3 m. Para os cenários H1-N2, gerações abaixo de 2.981 MW causam conflitos de navegação, pois resultam em profundidades inferiores a 3 m. Considerando o cenário H1-N3, gerações abaixo de 3.727 MW causam conflitos de navegação, pois resultam em lâmina d'água abaixo de 3 m.

Para o cenário hidrológico de H2, na Figura 9, as curvas de regressão mostram relações de troca entre a energia gerada no empreendimento hidroenergético.

Figura 9. Cenário H2 - Compensação da profundidade da água.



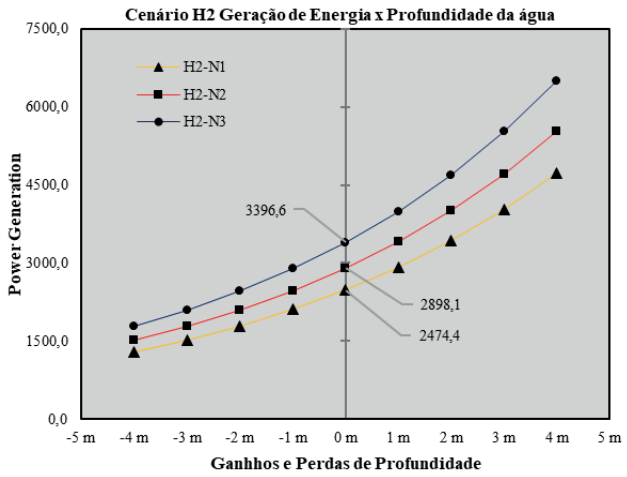
Fonte: Autores (2022).

Considerando as entradas do cenário hidrológico de H2 e o nível de referência do cenário de navegação N1 da Figura 9, gerações de energia abaixo de 2.374 MW causam conflitos de navegação, porque a profundidade da água resultante fica abaixo de 3 m. No cenário H2-N2, gerações de energia abaixo de 2.937 MW causam conflitos de navegação, pois resultam em lâmina d'água abaixo de 3 m. Analisando o cenário H2-N3, as gerações

de energia abaixo de 3.634 MW causam conflitos de navegação porque a profundidade da água resultante fica abaixo de 3 m.

Com base nas entradas do cenário hidrológico H3, a Figura 10 mostra curvas de regressão que demonstram as relações de troca pela energia gerada.

Figura 10. Cenário H3 - Compensação da profundidade da água.



Fonte: Autores (2022).

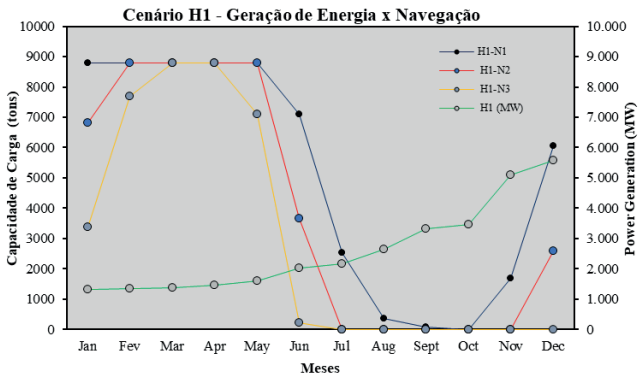
Considerando as entradas do cenário hidrológico H3 e o nível de referência do cenário de navegação N1, gerações de energia abaixo de 2.473 MW causam conflitos de navegação, pois resultam em profundidades inferiores a 3 m. Analisando o cenário H3-N2, a geração de energia abaixo de 2.898 MW causa conflitos de navegação. Considerando o cenário H3-N3, gerações de energia abaixo de 3.397 MW causam conflitos de navegação.

- **Geração de energia x capacidade de carga**

Semelhante às análises anteriores dos conflitos entre geração de energia e profundidade da água, uma profundidade de 3 m foi adotada como referência na obtenção da profundidade necessária para a navegação. A Figura 11 mostra os conflitos entre geração de energia e capacidade de transporte de carga do comboio fluvial analisado, em relação aos níveis de referência dos cenários N1, N2 e N3, considerando as entradas do cenário hidrológico H1.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

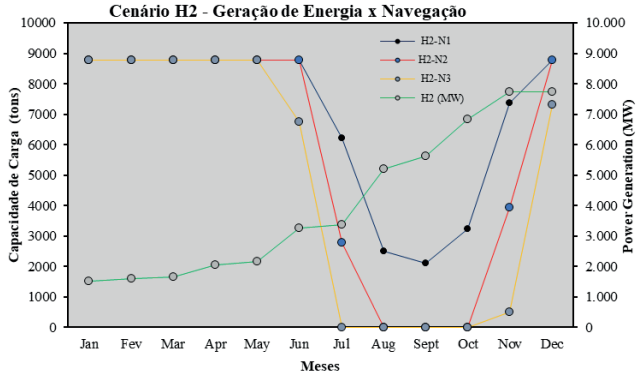
Figura 11. Cenário H1 - Compensação de capacidade de carga.



Fonte: Autores (2022).

A Figura 12 mostra os conflitos entre geração de energia e capacidade de transporte de carga para o comboio analisado, em relação aos níveis de referência dos cenários N1, N2 e N3, considerando as entradas do cenário hidrológico de H2.

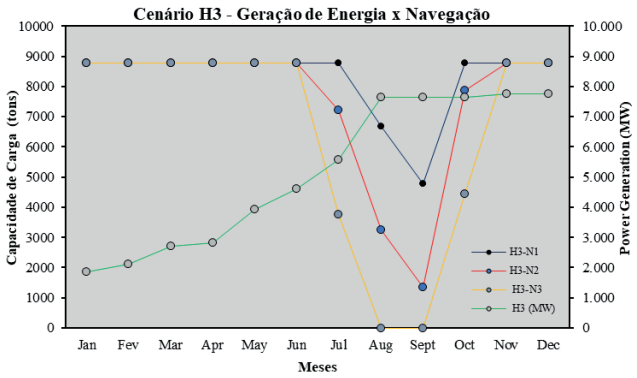
Figura 12. Cenário H2 - Compensação de capacidade de carga.



Fonte: Autores (2022).

Com base na Figura 12, em relação aos conflitos entre geração de energia e capacidade de carga transportada, para o cenário hidrológico de H2, o Modelo de Gerenciamento de Conflitos demonstrou que em relação ao cenário de navegação N1, gerações acima de 3.259 MW não geram ganhos em capacidade de carga. Para o cenário de navegação N2, gerações acima de 3.259 MW não agregam ganhos na capacidade de carga transportada, e gerações abaixo de 1.653 MW inviabilizam o transporte de carga. Para o cenário de navegação N3, gerações acima de 5.194 MW não geram ganhos na capacidade de carga transportada, e gerações abaixo de 2.045 MW inviabilizam o transporte de carga.

Figura 13. Cenário H3 - **Compensação** de capacidade de carga.



Fonte: Autores (2022).

A Figura 13 mostra que, para o cenário H3, em relação ao cenário de navegação N1, gerações acima de 2.704 MW não geram ganhos na capacidade de carga transportada. Para o cenário de navegação N2, gerações acima de 3.937 MW não agregam ganhos na capacidade de carga transportada. Considerando o cenário de navegação N3 como referência, gerações acima de 3.937 MW não geram ganhos na capacidade de carga transportada e gerações abaixo de 2.104 MW inviabilizam o transporte de carga.

DISCUSSÃO

Na análise dos conflitos foi adotada uma profundidade de 3 m como referência na obtenção da lâmina de água necessária a navegação. Essa profundidade permite a utilização de embarcações com calado de 2,5 m mais uma folga (pé de piloto) de 50 cm entre o fundo da embarcação e o leito do rio. No contexto dos resultados da otimização dos cenários analisados, pode-se observar a influência da priorização de um determinado uso múltiplo sobre outro, com impactos diretos nas variáveis de saída relacionadas a esses múltiplos usos.

Analogamente ao comportamento da análise de sensibilidade feita para o nível de referência (*Hlnj*) do cenário de navegação N1, que as menores variações percentuais de ganhos ou de perdas de profundidade, ocorrem nos meses de menores afluências. Para a geração de energia e profundidade da água de navegação, considerando as entradas para cenários hidrológicos seco, médio e úmido, o Modelo de Gerenciamento de Conflitos mostrou, em relação aos níveis de referência para os cenários de navegação baixo, médio e alto, as profundidades da água caíram abaixo do mínimo para gerações médias de 2.411 MW, 2.939 MW e 3.586 MW, respectivamente.

Observa-se, também, uma vez que o nível de referência (*Hlnj*) do cenário de navegação N2 é menos restritivo, que os limites de variação percentual dos ganhos ou perdas na profundidade média anual, para os cenários de afluência H1 BAIXO e H2 MÉDIO, é de baixa variabilidade. Considerando afluências dos cenários hidrológicos H1 SECO, H2 MÉDIO

e H3 ÚMIDO, sobre os ganhos ou perdas de profundidade média anual, tendo como plano referencial o nível de referência (Hlnj) definido para o cenário de navegação N3, observou-se, também, analogamente ao H2 MÉDIO, que para o H3 ÚMIDO ocorre uma crescente diminuição na restrição a navegação.

Igualmente as análises desenvolvidas aos conflitos entre geração de energia e profundidade do item anterior, adota-se uma profundidade de 3 m como referência na obtenção da lâmina de água necessária a navegação, a qual permite uma navegação de comboios com calado de 2,5 m mais e pé de piloto de 50 cm. Para geração de energia e capacidade de carga transportada, considerando as entradas para cenários hidrológicos seco, médio e úmido, o Modelo de Gerenciamento de Conflitos demonstrou, em relação aos níveis de referência dos cenários de navegação baixo, médio e alto, que gerações médias acima de 2.869 MW, 3.504 MW e 4.740 Os MW, respectivamente, não geram ganhos na capacidade de carga transportada, e as gerações médias abaixo de 1.344 MW, 1.622 MW e 2.056 MW, respectivamente, inviabilizam o transporte de carga.

Sempre haverá conflitos no uso da água na operação dos sistemas de reservatórios. O desenvolvimento de modelos que permitam medir, entre outros, conflitos entre geração de energia e navegabilidade em um trecho a jusante dos reservatórios é de grande importância. Um aumento na geração de energia fornece um aumento na profundidade da água a jusante e, consequentemente, um aumento na capacidade de carga de comboios de pressão usados no transporte de mercadorias em todo o mundo. Por outro lado, quanto menor a geração de energia, menores serão as profundidades a jusante, devido aos menores fluxos da turbina. A contribuição desta pesquisa é auxiliar o processo de avaliação e mitigação de impactos vinculados a projetos hidroenergéticos para os quais a navegação é um importante aspecto econômico da área analisada. A partir de uma revisão da literatura, este estudo é o único da bacia amazônica no Brasil que avalia os impactos da geração de energia sob a perspectiva da navegação, mostrando até que ponto um de múltiplos usos não interfere em outro. Pelos pontos acima, a grande relevância e contribuição do estudo são evidentes.

CONCLUSÃO

Com base nas discussões e nas análises dos resultados, conclui-se que os modelos utilizados são uma plataforma de subsídio à modelagem e à otimização operacionalização de reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos, que minimiza conflitos entre usos múltiplos da água em bacias hidrográficas. Em períodos de cheia, de estiagem e de grandes demandas energéticas, permite a otimização de gerações e de defluências, com manutenção de condições de navegabilidade em trechos a jusante de barramentos, através de simulações operacionais sustentáveis que minimizam conflitos entre usos múltiplos.

A aplicação do modelo do estudo de caso foi satisfatória ao analisar os resultados obtidos. Com as saídas de dados baseadas nos cenários de navegação e hidrológicos definidos, conseguimos desenvolver os gráficos e análises de trade-off. Por meio das abordagens, discussões e metodologias propostas, bem como da análise dos resultados, o Sistema de Otimização de Uso Múltiplo proposto é uma ferramenta computacional que pode fornecer subsídios à modelagem operacional e otimizar reservatórios de usinas hidrelétricas. Portanto, os objetivos deste estudo foram alcançados e a validação do programa mostrou-se satisfatória.

As conclusões obtidas nos estudos de priorização permitem o desenvolvimento de medidas para mitigar os impactos dos conflitos hídricos observados em locais com projetos hidrelétricos. Portanto, as informações contidas na aplicação metodológica, juntamente com a ferramenta computacional desenvolvida e os resultados do estudo de caso, podem ajudar a desenvolver instituições e políticas para priorizar os recursos hídricos, o que pode contornar os desafios relacionados à redução dos impactos sociais, econômicos e políticos da água.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, N.; AHIDUZZAMAN, M.; KUMAR, A. The Development of an Integrated Model for the Assessment of Water and GHG Footprints for the Power Generation Sector. **Applied Energy**, v. 216, p. 558–575, abr. 2018.

AHMAD ALINEJAD, E.; PISHVAEE, M. S.; BONYADI NAEINI, A. Key Success Factors for Logistics Provider Enterprises: An Empirical Investigation in Iran. **Kybernetes**, v. 47, n. 3, p. 426–440, 5 mar. 2018.

BRANCHE, E. The Multipurpose Water Uses of Hydropower Reservoir: The SHARE Concept. **Comptes Rendus Physique**, Demain l'énergie. v. 18, n. 7, p. 469–478, 1 set. 2017.

CHINI, C. M.; SCHREIBER, K. L.; BARKER, Z. A.; STILLWELL, A. S. Quantifying Energy and Water Savings in the U.S. Residential Sector. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 17, p. 9003–9012, 6 set. 2016.

DARBANDSARI, P.; KERACHIAN, R.; MALAKPOUR-ESTALAKI, S.; KHORASANI, H. An Agent-Based Conflict Resolution Model for Urban Water Resources Management. **Sustainable Cities and Society**, v. 57, p. 102112, jun. 2020.

DOBSON, B.; WAGENER, T.; PIANOSI, F. An Argument-Driven Classification and Comparison of Reservoir Operation Optimization Methods. **Advances in Water Resources**, v. 128, p. 74–86, 1 jun. 2019.

EL AZHARI, M.; LOUDYI, D. Analysis of the water–energy nexus in central Oum Er-Rbia sub-basin – Morocco. **International Journal of River Basin Management**, v. 17, n. 1, p. 13–24, 2 jan. 2019.

ELABD, S.; EL-GHANDOUR, H. A. Multiobjective Optimization of Bigge Reservoir Operation in Dry Seasons. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 9, p. 05014008, 1 set. 2014.

GIULIANI, M.; HERMAN, J. D. Modeling the behavior of water reservoir operators via eigenbehavior analysis. **Advances in Water Resources**, v. 122, p. 228–237, 1 dez. 2018.

KROČOVÁ, Š.; KAVAN, Š. Cooperation in the Czech Republic Border Area on Water Management Sustainability. **Land Use Policy**, v. 86, p. 351–356, 1 jul. 2019.

LIU, X.; CHEN, L.; ZHU, Y.; SINGH, V. P.; QU, G.; GUO, X. Multi-objective reservoir operation during flood season considering spillway optimization. **Journal of Hydrology**, v. 552, p. 554–563, 1 set. 2017.

LOCH, A.; ADAMSON, D.; MALLAWAARACHCHI, T. Role of Hydrology and Economics in Water Management Policy under Increasing Uncertainty. **Journal of Hydrology**, Creating Partnerships Between Hydrology and Social Science: A Priority for Progress. v. 518, p. 5–16, 10 out. 2014.

LUNA, J. H.; MAR-ORTIZ, J.; GRACIA, M. D.; MORALES-RAMÍREZ, D. An Efficiency Analysis of Cargo-Handling Operations at Container Terminals. **Maritime Economics & Logistics**, v. 20, n. 2, p. 190–210, jun. 2018.

MARKOWSKA, J.; SZALIŃSKA, W.; DĄBROWSKA, J.; BRZĄKAŁA, M. The Concept of a Participatory Approach to Water Management on a Reservoir in Response to Wicked Problems. **Journal of Environmental Management**, v. 259, p. 109626, 1 abr. 2020.

MATROSOV, E. S.; HAROU, J. J.; LOUCKS, D. P. A Computationally Efficient Open-Source Water Resource System Simulator - Application to London and the Thames Basin. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1599–1610, dez. 2011.

MENDES, L. A.; DE BARROS, M. T. L.; ZAMBON, R. C.; YEH, W. W.-G. Trade-Off Analysis among Multiple Water Uses in a Hydropower System: Case of São Francisco River Basin, Brazil. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 10, p. 04015014, out. 2015.

REN, L.; HE, L.; LU, H.; CHEN, Y. Monte Carlo-Based Interval Transformation Analysis for Multi-Criteria Decision Analysis of Groundwater Management Strategies under Uncertain Naphthalene Concentrations and Health Risks. **Journal of Hydrology**, v. 539, p. 468–477, 1 ago. 2016.

RHEINHEIMER, D. E.; NULL, S. E.; LUND, J. R. Optimizing Selective Withdrawal from Reservoirs to Manage Downstream Temperatures with Climate Warming. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 4, p. 04014063, 1 abr. 2015.

SEIFOLLAHI-AGHMIUNI, S.; BOZORG-HADDAD, O.; MARIÑO, M. Generalized Mathematical Simulation Formulation for Reservoir Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, p. 04016004, 11 jan. 2016.

SRINIVASAN, K.; KUMAR, K. Multi-Objective Simulation-Optimization Model for Long--Term Reservoir Operation Using Piecewise Linear Hedging Rule. **Water Resources Management: An International Journal, Published for the European Water Resources Association (EWRA)**, v. 32, n. 5, p. 1901–1911, 2018.

TORTAJADA, C.; GONZÁLEZ-GÓMEZ, F.; BISWAS, A. K.; BUURMAN, J. Water Demand Management Strategies for Water-Scarce Cities: The Case of Spain. **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 649–656, fev. 2019.

WANG, W.; PENG, Y.; SONG, X.; ZHOU, Y. Impact of Navigational Safety Level on Seaport Fairway Capacity. **Journal of Navigation**, v. 68, n. 6, p. 1120–1132, nov. 2015.

XIONG, W.; LI, Y.; PFISTER, S.; ZHANG, W.; WANG, C.; WANG, P. Improving Water Ecosystem Sustainability of Urban Water System by Management Strategies Optimization. **Journal of Environmental Management**, v. 254, p. 109766, 15 jan. 2020.

ZIOGOU, I.; ZACHARIADIS, T. Quantifying the water–energy nexus in Greece. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 36, n. 10, p. 972–982, 26 nov. 2017.

15

O conceito de corredores verdes de transportes de mercadorias e uma aplicação no transporte de soja para exportação

João Ferreira Netto
Universidade de São Paulo - USP

Rui Carlos Botter
Universidade de São Paulo - USP

Daniel de Oliveira Mota
Universidade de São Paulo - USP

doi 10.37885/221111064

RESUMO

Muitas políticas públicas têm buscado minimizar os efeitos que atividades de transporte causam ao meio ambiente e à sociedade. Uma dessas políticas remete ao surgimento dos corredores verdes de transporte de cargas, originalmente concebidos na Europa. Inicialmente, propõe-se uma definição de corredores verdes para que se avalie o transporte de mercadorias no Brasil a partir da definição obtida e seja selecionado um caso de transporte de mercadorias no Brasil para avaliação de acordo com o que se propõe em experiências internacionais, incluindo a aplicação de tecnologias para obtenção de tais corredores. Desenvolve-se, portanto, um estudo de caso aplicado a corredores de transporte de soja produzida no Mato Grosso para exportação, de forma que se considere os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário, e a intermodalidade. São utilizados indicadores de desempenho para análise e verificadas as características e diferenças entre os corredores. Tecnologias que visam aumentar a sustentabilidade em um corredor são testadas e formas de tornar um corredor brasileiro de transporte de soja em um corredor verde são sugeridas. Observa-se que corredores que utilizam o modal hidroviário tendem a apresentar melhor desempenho econômico e ambiental, sugerindo que a alternativa para “verdificação” de corredores de transportes no Brasil é a utilização dos rios. Verifica-se também que substituir combustíveis utilizados pode reduzir em até 90% a emissão de gases do efeito estufa e que investir em terminais intermodais leva eficiência às operações deixando margem para investimentos em tecnologias sustentáveis. Conclui-se, ainda, que corredores que utilizam hidrovias possuem elevado potencial de melhoria em função da quantidade de tecnologias e melhorias propostas.

Palavras-chave: Transportes, Corredores, Sustentabilidade, Intermodalidade, Logística.

INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda o transporte de mercadorias no Brasil, através de suas características operacionais, no âmbito da busca por atividades e sistemas logísticos mais sustentáveis, propondo afinal a concepção de corredores verdes de cargas no país.

O termo “Corredores Verdes”, de acordo com Psaraftis e Panagakos (2012), surgiu em 2007, a partir de uma ação do “Plano de Ação em Logísticas e Transportes” da Comissão das Comunidades Europeias. Segundo os autores, ao estabelecer as operações de um corredor verde, buscava-se o desenvolvimento integrado, eficiente e ambientalmente responsável do transporte de mercadorias entre terminais de grande porte, localizados distantes um do outro.

Psaraftis e Panagakos (2012), entretanto, destacam a falta de uma definição para o termo e apresentam o SuperGreen, projeto realizado no continente europeu para o desenvolvimento de estratégias e referências, definidas através de medidas de desempenho, a serem consideradas como base para uma conceituação do termo “corredores verdes”. Destaca-se o desafio que as indústrias enfrentam para equilibrar suas possibilidades de expansão à necessidade de promover a sustentabilidade ambiental e eficiência energética.

Da mesma forma, no Brasil, o transporte de mercadorias por longas distâncias é uma atividade importante para o desenvolvimento nacional, uma vez que o país é um grande exportador de commodities e concentra os centros produtores em regiões específicas. Sendo assim, surge um desafio: tornar essas operações de transportes mais sustentáveis através da conceituação e aplicação de métodos utilizados nos corredores europeus.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

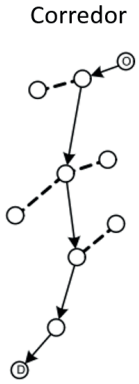
Para estudar os corredores verdes, é preciso que se entenda, em princípio, o que caracteriza um corredor de transportes. Segundo Panagakos e Psaraftis (2011), é “um corredor que atravessa ao menos dois ou três países diferentes com uma distância maior que 500 quilômetros entre dois terminais”. Citam os corredores em uma realidade encontrada na Europa, onde distâncias maiores que 500 quilômetros frequentemente podem fazer com que se cruze mais de um país. Ao se tratar de um corredor no Brasil, esse pode ligar alguns Estados/Unidades da Federação (UF) ou regiões do território nacional, dadas as dimensões continentais do país. Priemus e Zonneveld (2003) conceituaram os corredores de transportes como conjuntos de infraestruturas que conectam duas ou mais áreas urbanas, associando o termo também ao transporte de passageiros, não somente às mercadorias.

De acordo com esses autores, corredores de transportes muitas vezes resultam da concentração de população e de cinturões industriais lineares com recursos minerais ou solo fértil.

De acordo com Woxenius (2007), operacionalmente, o projeto de um corredor de transportes requer paradas muito curtas (rápidas) em terminais intermediários, a fim de manter um tempo razoável de transporte ao longo do corredor completo. Se o tráfego nas capilaridades for muito lento, pode impactar no corredor e diversas vezes isso faz com que alguns nós deixem de ser atendidos naquela viagem. Alta frequência de viagens e folga na capacidade do corredor diminuem os problemas. Um desafio pontual para os operadores é equilibrar a capacidade de transporte e as receitas a partir de um nível eficaz e eficiente de serviço esperado.

Um corredor de transporte, associa Woxenius (2007), é como um sistema circulatório humano, no qual existe um fluxo de alta densidade ao longo de uma artéria e serviços capilares mais curtos para acessar os nós (locais) que não componham o corredor. Os nós são, portanto, hierarquicamente ordenados. A Figura 1, adaptada do autor, apresenta um corredor com os nós de origem (O) e destino (D) e sua interligação a outros nós da rede.

Figura 1. Representação de um corredor como rede de transportes.



Fonte: Woxenius (2007).

Chapman *et al.* (2003) afirmam ainda que um corredor oferece uma forma clara para reduzir as disparidades regionais, por exemplo através da distribuição de produtos e riquezas, existentes ao longo da sua extensão, e promover o desenvolvimento econômico e a proteção do meio ambiente.

Cabe destacar a importância que a integração entre os modais tem para o desenvolvimento de um corredor de transportes. Para Bak e Borkowski (2011), um corredor de transportes, bem como os ganhos com eficiência podem ser obtidos também em transportes multimodais, um exemplo disso são os transportes com navios Ro-Ro ou Lo-Lo, podendo ainda ser melhorados. A introdução de melhores serviços Ro-Ro requer novos tipos de embarcações capazes de transportar diretamente outros veículos rodoviários, inclusive trens, aumentando a eficiência do sistema e diminuindo os tempos de operações de carga e descarga.

Nas últimas décadas, segundo Fleischer (2011), o termo meio ambiente passou de algo desprezado a algo com relevância e influência nas tomadas de decisão por diversos setores

da sociedade, incluindo grupos privados e poder público. Um dos motivos pelos quais existe uma tendência de que as atividades humanas protejam de maneira mais assertiva o meio ambiente são as propagadas mudanças que ocorrem no clima da Terra nas últimas décadas. Para Houghton (2005 apud Corbett, Wang e Winebreak, 2009), a mudança climática global pode ser um dos problemas ambientais mais desafiadores já enfrentados pela sociedade: é global, seus efeitos são sentidos no longo prazo e sua mitigação envolverá grandes transformações sociais e tecnológicas.

Corroborando o fato da maior atenção ser direcionada à preservação do meio ambiente e associando isso ao cenário globalizado e de liberalização da economia atual (Ballou, 2006), de acordo com Grossman and Krueger (1993 apud Gallagher, 2005), alguns economistas delinearam mecanismos pelos quais a liberalização comercial e de investimentos tem efeitos indiretos sobre o meio ambiente, dentre eles a escala, a composição e a técnica:

- Os efeitos de escala ocorrem quando a liberalização provoca a expansão da atividade econômica. Se a natureza da atividade está inalterada, mas cresce em escala, surge como consequência a poluição e o esgotamento de recursos. Gallagher (2005) relata que níveis crescentes de emissões de dióxido de carbono devido à expansão da economia mundial na década de 90 são frequentemente citados como exemplos de efeitos de escala;
- Os efeitos de composição ocorrem quando o aumento do comércio leva nações a se especializarem nos setores em que se beneficiam de uma vantagem comparativa. Se uma poluição intensiva das indústrias começa a concentrar-se em nações com as normas ambientais relativamente fracas, teme-se que haja uma "corrida para o futuro", ou seja, que ações precisem ser realizadas com urgência para se manter padrões ambientais;
- Os efeitos de técnica, ou as mudanças nas tecnologias de extração de recursos e de produção, podem potencialmente levar a um declínio na poluição por unidade de produção. A liberalização do comércio e dos investimentos pode incentivar a transferência de tecnologias mais limpas para países em desenvolvimento.

Deve-se considerar, nesse contexto, o fato de que a saúde das pessoas é diretamente afetada pela falta de cuidado com a preservação do meio ambiente. Chang e Wang (2012) salientam que a poluição do ar é a causa de inúmeras doenças ligadas ao sistema respiratório, incluindo câncer de pulmão, doenças cardiovasculares, além de problemas congênitos.

A necessidade de proteção ambiental e as crescentes demandas por recursos naturais, conforme ponderam Wu e Pagell (2011), estão forçando as sociedades a reconsiderar seus modelos de negócios e reestruturarem as suas cadeias de suprimento. Segundo Ahi e

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Searcy (2013), iniciativas de sustentabilidade nos negócios são frequentemente associadas à "responsabilidade social corporativa". Embora existam aqueles que argumentam contra a prática, a sustentabilidade e a responsabilidade social das empresas são muitas vezes utilizadas como sinônimos no contexto empresarial.

Para Linton, Klassen e Jayaraman (2007), o foco nas cadeias de suprimento é um passo para um desenvolvimento mais amplo da sustentabilidade, uma vez que esta cadeia considera o produto desde a primeira transformação das matérias-primas até a entrega ao cliente. A sustentabilidade deve também integrar as questões e os fluxos que se estendem para além do núcleo de gestão da cadeia de suprimentos: design de produto, fabricação de subprodutos, subprodutos produzidos durante o uso do produto, extensão da vida de um produto, o fim da vida de um produto e os processos de recuperação ao fim da vida.

Para que as atividades de transportes sejam executadas, é importante o planejamento, que deve iniciar pela escolha do modal a ser utilizado (CHOPRA e MEINDL, 2012). Um modal de transportes, segundo esses autores, é a maneira como, determinada carga é deslocada de certo local na cadeia de suprimentos para outro. Descrevem ainda, que os modais se diferenciam através da velocidade, do tamanho dos lotes transportados, dos custos e da flexibilidade oferecida.

Corredores Verdes

O termo "*Green Corridors*" surgiu em 2007 como uma ação do "Plano de Ação em Logísticas e Transportes" da Comissão das Comunidades Europeias (PSARAFTIS E PANAGAKOS, 2012), mas há necessidade de uma definição precisa do termo. Nesse sentido, esta pesquisa pode ser de contribuição significativa.

Psaraftis e Panagakos (2012) se referem aos corredores verdes como corredores de transportes de mercadorias que encorajam o uso da comodalidade e de tecnologias aplicadas para acomodar possíveis aumentos nas quantidades transportadas concomitantemente à promoção de atividades mais sustentáveis e eficientes no consumo de energia.

Para que isso seja possível, Psaraftis e Panagakos (2012) destacam a necessidade de se contar, na operação desses corredores verdes, com equipamentos que facilitem o transbordo de mercadorias, localização estratégica de terminais e utilização de biocombustíveis, além de formas mais ambientalmente responsáveis de propulsão. Em suma, de acordo com esses autores, corredores verdes devem ser experimentos de preservação do meio ambiente, inovação e uso de sistemas de comunicação para otimizar os transportes. Deve haver, também, disponibilidade de acesso a infraestruturas de transbordo de acordo com leis e regras vigentes.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Fozza e Recagno (2012) apontam a necessidade de tecnologias que possibilitem a um corredor de transportes operar de forma sustentável e ambientalmente responsável, sobretudo em relação às emissões dos gases causadores do efeito estufa (greenhouse gas – GHG). Os autores identificaram 190 tipos de tecnologias, agrupando-as para facilitar sua análise e abordagem.

A partir do estudo realizado, define-se que um corredor verde pode ser definido da seguinte maneira:

"Corredores de transporte de mercadorias compostos por operações que considerem estratégias para redução de emissão de gases do efeito estufa, que operem por terminais que permitam transbordo entre modais, quando esta operação existir no corredor, sejam objetos de verificação de tecnologias para melhorias de eficiência e sustentabilidade, sob ambiente regulado e com alta capacidade de volumes transportados, visando equilíbrio entre produtividade e sustentabilidade".

METODOLOGIA

Muitos são os autores que se utilizam do estudo de caso para abordagens de problemas dos mais diversos tipos e relacionados às mais diversas áreas. Yin (2015) relembra que esta metodologia pode ser utilizada nas mais variadas situações devido ao seu potencial de contribuir com o conhecimento de fenômenos individuais, políticos, coletivos, sociais, dentre outros. O autor também cita sua aplicação em áreas como psicologia, antropologia, ciências políticas e enfermagem, mostrando a interdisciplinaridade presente na abrangência de um estudo de caso, incluindo estudos sociais e relacionados à saúde. Dentre as áreas que podem ser pesquisadas com a metodologia de estudo de caso se encontram também a engenharia e a gestão de processos (MIGUEL *et al.*, 2012). Um dos objetivos a serem alcançados é a avaliação de corredores de transportes existentes no Brasil sob o ponto de vista dos corredores verdes, utilizando-se de indicadores de desempenho (KPI's) e níveis de serviço definidos, através de um estudo de caso.

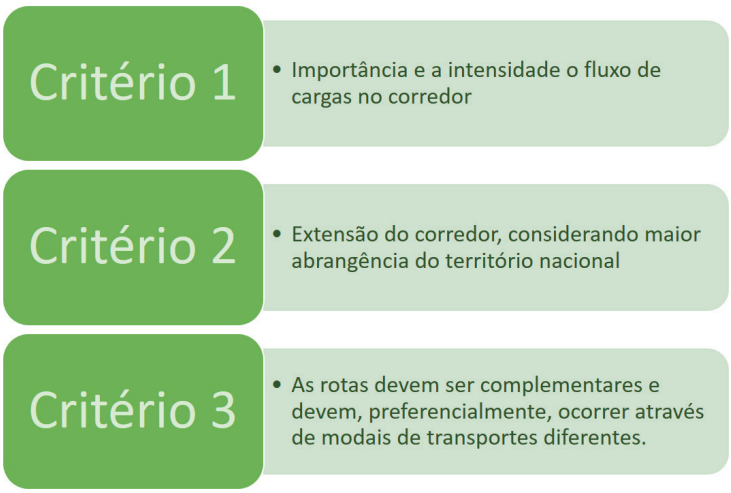
SELEÇÃO E ANÁLISE DE CASOS

São definidos os indicadores chaves de desempenho (KPI's) considerados para avaliação dos corredores, uma escolha baseada na análise de Green Corridors internacionais, e os critérios de avaliação considerados, de modo a possibilitar a posterior análise dos corredores e a identificação dos pontos críticos existentes, permitindo a seleção de tecnologias com o objetivo de transformar as rotas em corredores verdes.

Os corredores escolhidos são utilizados para a exportação de soja, uma vez que o Brasil é um dos maiores produtores do mundo e exporta grande parte dessa produção (EMBRAPA, 2017). A escolha é baseada nos volumes escoados aos portos marítimos para serem exportados, nas complementaridades existentes entre eles e na necessidade de otimização das operações.

Para escolha das rotas utilizadas no estudo de caso, foram considerados três critérios, apresentados na Figura 2.

Figura 2. Critérios adotados para seleção dos corredores considerados no estudo de caso.



Fonte: Autores (2017).

A partir destes critérios, estabelece-se que devem ser estudados corredores de transporte de soja com fluxos consideráveis, extensos e que não possuam semelhanças entre si ao longo de sua extensão, sendo que, preferencialmente, como mostra a Figura 2, operem através de modais de transportes diferentes. É preferível, portanto, que se considere os três modais possíveis (rodoviário, hidroviário e ferroviário) e diferentes formas de combinação.

De acordo com esses três critérios, são escolhidos os pontos de origem e destino final e as rotas entre estes. Segundo o primeiro critério, a partir do qual se leva em consideração os volumes transportados, são selecionados, como nós de origem, os municípios de Sorriso ou Sapezal, no Estado do Mato Grosso, maiores produtores de soja do país e o Porto de Santos, por ser o porto com maior volume de soja exportada. Sendo assim, um primeiro corredor selecionado pode ser o que considere o transporte entre Sorriso (MT) e Santos (SP).

Pelo segundo critério, definiu-se que devem ser selecionados portos localizados na região Norte e na região Sul, por se tratarem de extremos geográficos do território nacional. Na região Sul, define-se o Porto de Paranaguá, por ser o único com considerável volume de soja mato-grossense exportada, já para a região Norte, escolhe-se o Porto de Santarém, devido ao fato de o trajeto até tal porto necessitar de um trecho maior de utilização do modal hidroviário em relação ao trajeto até o Porto de Manaus.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Sendo assim, outros dois corredores com origem em Sorriso e Sapezal são analisados e, contemplando também terceiro critério, define-se que estes corredores ligam Sapezal (MT) a Santarém (PA) (Sapezal a oeste de Sorriso, exclui-se um trecho rodoviário da viagem até Porto Velho), corredor este que inclui a utilização do modal hidroviário, e Sorriso (MT) a Paranaguá (PR).

O corredor Sorriso_Santos

Este corredor foi selecionado por se tratar de uma rota que parte do município que mais produz soja no Brasil com destino ao porto que mais exporta o produto, ou seja, um corredor por onde são transportadas quantidades consideráveis de grãos.

Em 2016, 8,5% da soja produzida no Mato Grosso para exportação, ou seja, 1,3 milhões de toneladas do produto, foram levadas até o transporte marítimo por esta rota (ALICEWEB, 2017).

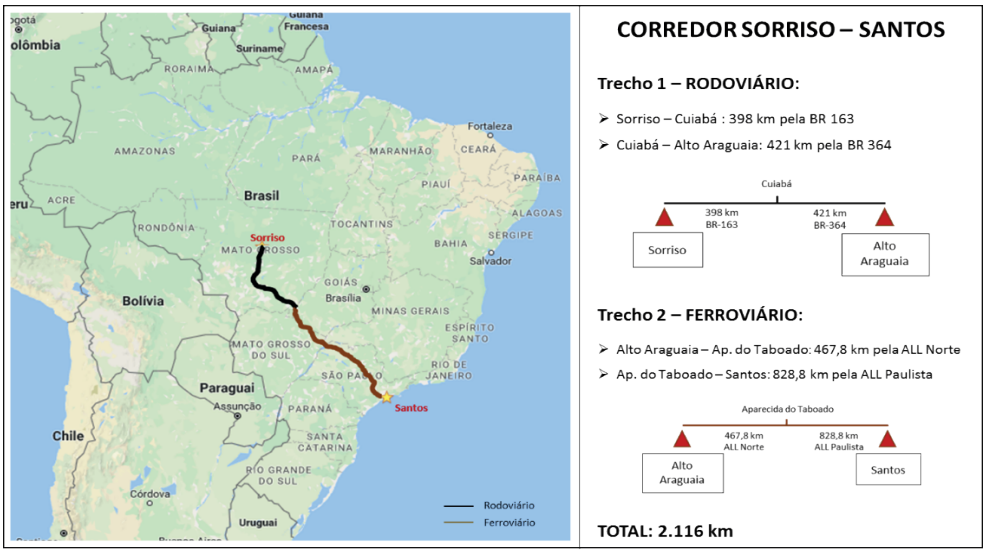
A extensão total do corredor é de 2.116 km, sendo que o mesmo pode ser dividido em dois trechos principais:

(1) O primeiro trecho é rodoviário, de Sorriso (MT) até Alto Araguaia, no polo Sudeste do Mato Grosso. São 819 km de estrada percorridos de caminhão, que ainda podem ser divididos em duas etapas devido a uma mudança de rodovia na capital Cuiabá.

(2) O segundo trecho, entre Alto Araguaia (MT) e Santos (SP) é percorrido pelo modal ferroviário, em duas ferrovias administradas pela América Latina Logística (ALL): a Ferronorte, até Aparecida do Taboado (na tripla fronteira entre Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e São Paulo) e depois, a Ferroban (ALL Paulista) até Santos.

A Figura 3 apresenta a localização e as características do corredor Sorriso – Santos por trecho e modal.

Figura 3. Localização e características do corredor Sorriso - Santos por trecho.



Fonte: Autores (2017).

Observa-se que o corredor Sorriso – Santos cruza quatro estados: Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul e São Paulo.

O corredor Sapezal – Santarém

O segundo corredor selecionado liga o município produtor de Sapezal (MT) ao Porto de Santarém, no Pará. Como explicado anteriormente, este corredor foi selecionado devido à sua abrangência (localização na região Norte) e também por utilizar-se do modal hidroviário para o transporte de soja. De acordo com tais características, o Porto de Manaus também poderia ser o escolhido para a composição do corredor, até por se tratar de um porto por onde uma quantidade maior de soja foi exportada (3,4% do total exportado no Brasil entre 2012 e 2016 foram exportados pelo Porto de Manaus, enquanto 2,4% deste total, foram levados aos compradores em navios carregados no Porto de Santarém). Entretanto, preferiu-se considerar Santarém devido à extensão do modal hidroviário ser maior e devido ao fato de que é possível considerar que este porto apresenta maior potencial de desenvolvimento (SEP, 2013), uma vez que se encontra mais próximo do Oceano e, portanto, do importador.

Como origem do corredor, foi escolhido o município de Sapezal (MT), no polo Oeste do Mato Grosso, município que envia a maior quantidade de soja para o Porto de Santarém. Em 2016, 22% da soja mato-grossense exportada por Santarém foi produzida em Sapezal, ou seja, aproximadamente 278 mil toneladas escoadas por este corredor.

O corredor Sapezal-Santarém possui uma extensão total de aproximadamente 2.620 km e pode ser dividido em, basicamente, duas partes:

(1) O primeiro trecho da viagem é realizado através do modal rodoviário entre Sapezal (MT) e Porto Velho (RO), pela BR 364, percorrendo uma distância de 950 km.

(2) O segundo trecho liga Porto Velho (RO) até o Porto Santarém por uma hidrovia que se inicia no Rio Madeira até Itacoatiara (AM), em seu trecho mais longo, e segue daí pelo Rio Amazonas.

Trata-se de um corredor mais extenso que os outros, o que é possível por conta da possibilidade de se utilizar o modal hidroviário, mais barato por km percorrido. A Figura 4 apresenta a localização e as características do corredor Sapezal - Santarém por trecho e modal.

Figura 4. Localização e características do corredor Sapezal - Santarém por trecho.



Fonte: Autores (2017).

Observa-se que o corredor Sapezal – Santarém, tal qual o corredor Sorriso – Santos, cruza quatro estados: Mato Grosso, Rondônia, Amazonas e Pará.

O corredor Sorriso-Paranaguá

O terceiro corredor selecionado considera o transporte de soja desde o município de Sorriso (MT), novamente, até o Porto de Paranaguá, no litoral do Paraná. Tal escolha justifica-se pelo fato de o Porto de Paranaguá ser o porto que mais exporta a soja mato-grossense e não está na Região Sudeste (Santos) ou Norte (Santarém), já consideradas nos corredores escolhidos anteriormente. Desta forma, a rota satisfaz o critério 1 (fluxo relevante) e o critério 2, uma vez que o trajeto até a Região Sul é longo e abrangente.

O ponto de origem deste corredor, novamente, é o município de Sorriso (MT), maior produtor de soja do país, confirmando a adequação ao primeiro critério de seleção. Por fim, verifica-se que a rota entre Sorriso e Paranaguá possui somente um trecho, pela BR 163, de intersecção com outro corredor selecionado, o que faz com que o mesmo atenda também ao critério 3.

De acordo com os dados do Portal AliceWeb (2017), em 2016, o município de Sorriso produziu 17 % da soja mato-grossense exportada pelo Porto de Paranaguá, ou seja, aproximadamente 109 mil toneladas.

A Figura 5 apresenta a localização e as características do corredor Sorriso – Paranaguá por trecho e modal.

Figura 5. Localização e características do corredor Sorriso - Paranaguá por trecho.



Fonte: Autores (2017).

Trata-se de um corredor que considera, exclusivamente, o modal rodoviário. Basicamente, ele pode ser dividido em quatro trechos:

(1) O primeiro trecho é o maior, corresponde a pouco mais de metade da distância total do corredor, com 1.219 km de extensão, e liga Sorriso (MT) a Nova Alvorada do Sul (MS) pela BR 163.

(2) O segundo trecho vai até Presidente Prudente, em São Paulo, e tem extensão de 340 km percorridos pela BR 267.

(3) O terceiro trecho é o menor e interliga Presidente Prudente (SP) e Apucarana (PR) através de 188 km pela PR 170.

(4) O último trecho do corredor tem 465 km e liga Apucarana (PR) até o Porto de Paranaguá através da BR 376.

Observa-se que o corredor Sorriso – Paranaguá cruza quatro estados: Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Paraná.

CONCLUSÃO

Os corredores selecionados, Sorriso (MT) – Santos (SP), Sapezal (MT) – Santarém (PA) e Sorriso (MT) – Paranaguá, são analisados de acordo com alguns dos indicadores

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

estabelecidos por Moyano *et al.* (2012): eficácia, qualidade do serviço, sustentabilidade ambiental, suficiência de infraestrutura e reflexos sociais. Concomitantemente à definição de KPI's a serem analisados, definem-se os critérios e índices considerados para avaliação dos corredores, como por exemplo, a situação dos retroportos brasileiros, baseada em entrevistas realizadas e consolidadas pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2012).

A análise considerou dados obtidos, em sua maioria, junto a órgãos governamentais e de apoio às operações de transportes e os resultados obtidos permitiram uma análise comparativa dos corredores, inicialmente em suas condições atuais.

De forma geral, pode-se avaliar que o corredor Sapezal-Santarém é o que tem o menor custo relativo (considerando quantidade e distâncias) dentre os casos, o que corrobora a afirmação de que o modal hidroviário é o mais barato por agregar economia de escala à operação. Entretanto, não é o corredor mais confiável, tampouco o mais rápido ou seguro. O corredor Sorriso-Santos é o mais rápido e também o que conta com a melhor infraestrutura de apoio, sendo assim o mais seguro.

Considerando os indicadores de sustentabilidade ambiental, novamente se observa que o modal hidroviário é vantajoso, uma vez que emite uma quantidade menor de gases de efeito estufa comparativamente aos outros corredores, outra característica esperada em relação a corredores que contemplam o modal hidroviário. Já o corredor Sorriso-Paranaguá, puramente rodoviário, é o que causa maior impacto social, por conta de seu trajeto dentro de áreas urbanas.

Esta análise inicial dos KPI's "as is" possibilita que se responda à primeira pergunta proposta na introdução deste trabalho, sobre o potencial que os corredores brasileiros possuem para serem considerados corredores verdes. Nota-se a partir dos resultados obtidos que os corredores analisados possuem pontos críticos que merecem atenção, como o preço relativo e a eficiência ambiental no corredor Sorriso-Paranaguá ou o tempo de transporte no corredor Sapezal-Santarém, ou seja, caso sejam realizados planejamentos buscando aliar maior sustentabilidade a eficiência, os corredores podem ser considerados corredores verdes de transporte de mercadorias.

Além disso, observa-se que a implantação e desenvolvimento de sistemas de informação e tecnologia podem acrescentar outras melhorias, em alinhamento com o que ocorre nos corredores europeus.

A análise final verifica a possibilidade de aplicação de algumas das tecnologias propostas por Moyano *et al.* (2012), e apresentadas no Anexo A, nos corredores estudados. Essa análise considera o indicador de desempenho afetado pela tecnologia analisada e se haveria melhorias no caso de sua aplicação.

Dentre as possibilidades avaliadas, pode ser citada a tecnologia EN21, que considera a utilização de motores com sistema de redução no escape para as embarcações no corredor Sapezal-Santarém, e observou-se que os ganhos seriam pequenos, uma redução de 0,29% na quantidade de CO2 emitido na atmosfera.

Já a adoção de veículos movidos a Gás Natural Líquido (LNG) ou Gás Natural Comprimido (CNG) pode trazer ganhos importantes para os três corredores, reduzindo em até 90% a quantidade de NOx emitida nas operações destes corredores.

Uma outra melhoria que merece atenção é a que considera a otimização dos arrastos aerodinâmicos para os caminhões, possibilitando a diminuição do consumo de combustíveis nos três corredores e, consequentemente, diminuição do custo e emissão de gases do efeito estufa. Ao final da análise das tecnologias selecionadas, foram consideradas somente as que impactavam mais de 1% em ao menos um dos indicadores alterados por sua adoção.

Pode-se concluir a partir dos resultados obtidos nas análises dos estudos de caso que existe um potencial considerável de redução da emissão de gases do efeito estufa, especialmente o NOx, uma diminuição mais tímida do custo relativo de operação nos corredores e melhorias operacionais que levam a melhores indicadores de confiabilidade e tempo de transportes.

O Quadro 1 apresenta as melhorias selecionadas para cada corredor analisado.

Quadro 1. Tecnologias selecionadas como melhoria para os três corredores avaliados

Sorriso-Santos	Sapezal-Santarém	Sorriso-Paranaguá
● FU08 & FU03 Uso de Gás Natural Líquido (LNG) e Gás Natural Comprimido (CNG - para rodoviário) ● HT28 Unidade de carga e descarga automática ● HT34 Unidade de carregamento intermodal ● LU13 & LU14 Recuperação da energia de frenagem & Sistemas de armazenamento de energia a bordo ● VE03 Caminhões Híbridos ● VE29 Melhoria do arrasto aerodinâmico ● VE33 Pneus de baixa resistência ao rolamento	● FU08 & FU03 Uso de Gás Natural Líquido (LNG) e Gás Natural Comprimido (CNG - para rodoviário) ● HT28 Unidade de carga e descarga automática ● HT32_a Sistema de barcaça oceânica ● HT34 Unidade de carregamento intermodal ● VE03 Caminhões Híbridos ● VE29 Melhoria do arrasto aerodinâmico ● VE33 Pneus de baixa resistência ao rolamento ● NA16 Auxílio de combinação "velocidade – rota"	● FU08 & FU03 Uso de Gás Natural Líquido (LNG) e Gás Natural Comprimido (CNG - para rodoviário) ● HT28 Unidade de carga e descarga automática ● HT34 Unidade de carregamento intermodal ● VE03 Caminhões Híbridos ● VE29 Melhoria do arrasto aerodinâmico ● VE33 Pneus de baixa resistência ao rolamento

Fonte: Autores (2017).

Foram adotadas sete tecnologias para o corredor Sorriso-Santos, oito tecnologias para o corredor Sapezal-Santarém e seis tecnologias para o corredor Sorriso-Paranaguá. Para cada corredor tais tecnologias foram avaliadas de forma acumulada, ou seja, como se fossem implementadas simultaneamente e com resultados independentes, e foram observadas as possibilidades de melhorias. Esta análise permitiu que fosse respondido o segundo questionamento proposto para esta tese, acerca das intervenções realizadas para que operações mais sustentáveis fossem realizadas em corredores de transportes de cargas brasileiros.

Observa-se que seis das tecnologias se repetem como opções para os três corredores. Estas seis intervenções coincidentes (Uso de Gás Natural Líquido (LNG) e Gás Natural Comprimido (CNG - para rodoviário), unidade de carga e descarga automática, unidade de carregamento intermodal, caminhões híbridos, melhoria do arrasto aerodinâmico e pneus de baixa resistência ao rolamento) são, portanto, exemplos de intervenções que colaborariam com a sustentabilidade dos corredores.

Cabe salientar que estas intervenções se referem à operação rodoviária por se tratar do modal comum aos três corredores, mas a análise dos corredores "as is" permite concluir, mais uma vez, que a utilização do modal hidroviário contribui com a "verdificação" dos corredores, uma vez que é o modal que permite ao corredor que o utiliza, no caso, Sapezal-Santarém, a apresentar os melhores índices para os KPI's analisados. Em se tratando de Brasil, um país rico em bacias hidrográficas e com rios de extensão considerável, é possível afirmar que para que as operações de transportes de mercadorias sejam mais sustentáveis, deve haver um desenvolvimento do modal hidroviário.

Inclusive, pode-se afirmar que daí vem a resposta ao terceiro questionamento proposto para esta tese, que discute os gargalos e limitações para que no Brasil mais corredores de transportes sejam objeto do processo de desenvolvimento de corredores verdes. Observa-se nos resultados obtidos que o corredor mais sustentável, de forma geral, é o corredor que considera o modal hidroviário em sua composição, o corredor Sapezal-Santarém. É o mais barato (custo relativo), o que emite a menor quantidade de gases, apresenta segurança adequada e boa infraestrutura, de forma geral.

Além disso, é o corredor que apresentou maior quantidade de tecnologias, ou seja, apresenta um potencial de operações ainda mais ambientalmente responsáveis e eficientes. Pode-se dizer, portanto, que o baixo uso do modal hidroviário no Brasil (5% do total) é um fator limitante para o desenvolvimento dos corredores verdes no Brasil.

REFERÊNCIAS

ALICE WEB. Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior. Base de Dados, 2017. Disponível em: <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>. Acesso em Fev. 2017.

BAK, M.; BORKOWSKI, P. Is integration of transport infrastructure positively impacting environmental sustainability?. In: SoNorA University Think Tank Conference, 8., 2011, Szczecin, Polônia. Proceedings of the 8th SoNorA University Think Tank Conference (Szczecin): University of Applied Sciences Erfurt, 2011, p. 29-38. ISSN 1868-8411

BALLOU, R. H. Gerenciamento da cadeia de suprimentos/ logística empresarial. 5ª. Ed. Porto Alegre: Artmed. 2006.

BAZARAS, D.; YATSKIV, I.; ALMINAS, M.; RAMUNAS, P. Analysis of Common Governance Transport System Development Possibilities in the East-west Transport Corridor. Transport and Telecommunication, v. 16(1), p. 31–39, 2015. DOI: 10.1515/ttj-2015-0004

CHAPMAN, D.; PRATT, D.; LARKHAM, P.; DICKINS, I. Concepts and definitions of corridors: evidence from England's Midlands. Journal of Transport Geography, v. 11(3), pp. 179–191, 2003. DOI: 10.1016/S0966-6923(03)00029-2

CHOPRA, S., MEINDL, P. Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation. 5ª. ed. New Jersey: Pearson Education S.A. p. 528. 2012.

KONTOVAS, C. A.; PSARAFTIS, H. N. An online ship emissions calculator as a decision-making aid and policy evaluation tool. In: Congress of International Maritime Association of Mediterranean, 13., 2009, Istanbul, Turquia.

LINTON, J. D.; KLASSEN, R.; JAYARAMAN, V. Sustainable supply chain: an introduction. Journal of Operations Management, v. 6, p. 1075-1082, 2007. DOI: 10.1016/j.jom.2007.01.012

MOYANO H.; PANAGAKOS G.; FOZZA S.; HOLTE E.A.; ZACHARIOUDAKIS P.; GEORGOPOULOU C. Green Corridors Handbook - Volume I. A SuperGreen project document, 20.12.2012.

PANAGAKOS, G. P.; PSARAFTIS, H. N. Green Corridors in freight logistics: how conducive is the operational and regulatory environment in Europe. In: SoNorA University Think Tank Conference, 8., 2011, Szczecin, Polônia. Proceedings of the 8th SoNorA University Think Tank Conference (Szczecin): University of Applied Sciences Erfurt, 2011, p. 39-48. ISSN 1868-8411

PANAGAKOS, G.; PSARAFTIS, H. N.; LARSEN, A. (2016). Green corridors in freight logistics. Technical University of Denmark (DTU), 2014.

PSARAFTIS, H. N.; PANAGAKOS, G. Green Corridors in European surface freight logistics and the SuperGreen project. Procedia – Social and Behavioral Sciences, v. 48, p. 1723 - 1732, 2012. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1147

16

Operações ao largo para transbordo de carga granéis sólido

Vanessa C. Rafael
Universidade Federal do Pará - UFPA

Pedro I. D. Lameira
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/221111056

RESUMO

As longas filas de espera para atracação de navios graneleiros e os gargalos na infraestrutura de acesso aos portos são grandes entraves na logística do transporte aquaviário brasileiro. Nesse cenário, as operações ao largo para transbordo de carga de granéis sólidos surgem como alternativa a essa problemática. Entretanto, esse tipo de operação ainda carece de estudos mais elaborados que garantam sua seguridade. **Objetivo:** Este artigo tem por finalidade apresentar o modo operacional do transbordo ao largo de granéis sólidos, em Vila do Conde, destacando a importância do desenvolvimento de um procedimento operacional e estudo de análise de riscos. **Métodos:** Na metodologia, foram efetuados levantamentos dos principais riscos inerentes à operação que possam interferir no transbordo de granéis sólidos ao largo, de acordo pesquisa bibliográfica realizada e elementos essenciais e dados operacionais levantados. **Resultados:** Pretende-se, com o resultado do estudo, contribuir com proposições para maior segurança operacional nas operações ao largo de transbordo de carga de granéis sólidos.

Palavras-chave: Transbordo, *Transhipment,* Carga, Operações ao Largo, Segurança Operacional, Portos.

INTRODUÇÃO

Transbordo de carga, de acordo com a definição da Receita Federal, órgão que, dentre suas atribuições, realiza o controle aduaneiro de carga, é a transferência direta de mercadoria de um veículo para outro.

A Agência Nacional de Transporte Aquaviários (ANTAQ), por meio da Resolução Normativa Nr 20, de 15 de maio de 2018, apesar de definir Estação de Transbordo de Carga (ETC) como "instalação portuária, localizada fora da área do porto organizado e utilizada exclusivamente para operação de transbordo de mercadorias em embarcações de navegação interior ou cabotagem", não estabelece ao certo as configurações para esse tipo de estação.

Em 28 de outubro de 2021, pela Resolução Nº59 a ANTAQ passou a regulamentar as operações STS, entretanto, até o presente momento ainda não há regulação sobre as operações de Transbordo de Carga de Granéis Sólidos.

Para a Autoridade Marítima, por intermédio das Normas da Autoridade Marítima para Tráfego e Permanência de Embarcações em Águas Jurisdicionais Brasileiras, NORMAM-08/DPC, Transbordo de Carga de Granéis Sólidos, *Transshipment,* é o procedimento para transbordo de granéis sólidos entre embarcações em áreas portuárias, podendo ser realizado por embarcações fundeadas, atracadas a contra bordo ou amarradas a um sistema de boias.

Na prática internacional, o Transbordo de Carga de Granéis Sólidos nada mais é que uma Estação de Transbordo de Carga, que pode estar localizada tanto dentro como fora do porto organizado, e é usualmente reconhecida pelo termo *Transshipment.*

Nos portos estrangeiros, tem sido observado três dinâmicas de transbordo:

Formada por duas ou mais embarcações amarradas a contra bordo navegando ou estacionárias em sistema de posicionamento dinâmico, em alto-mar, operando com transbordo de carga, geralmente com óleo e seus derivados (Figura 1);

Operações em boia (Figura 2) ou boias preestabelecidas (Figura 3) em mar aberto ou em fundeadouros de áreas portuárias, podendo operar tanto com óleo e seus derivados, como com outros tipos de carga; e

Ocorrendo em áreas abrigadas (Figura 4), com uma embarcação fundeada, utilizando seu próprio sistema de fundeio, com uma ou mais embarcações amarradas a contra bordo, realizando o transbordo de diversos tipos de carga.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 1. Embarcações amarradas a contra bordo.



Fonte: Maritime MT (2022).

Figura 2. Navio amarrado em monoboia.



Fonte: Petrobras (2015).

Figura 3. Navio amarrado em quadro de boias.



Fonte: Arquivo pessoal (2021).

Figura 4 . Navio fundeado.



Fonte: Terminal UNI-Z (2022).

Há ainda uma distinção referente ao equipamento utilizado para realizar o transbordo de granéis sólidos, podendo ser utilizado um guindaste flutuante (*Floating Crane* – Figura 5), um terminal flutuante (*Floating Terminal* –Figura 6) ou um navio de auto descarga (*Self-unloading Vessel* – Figura 7).

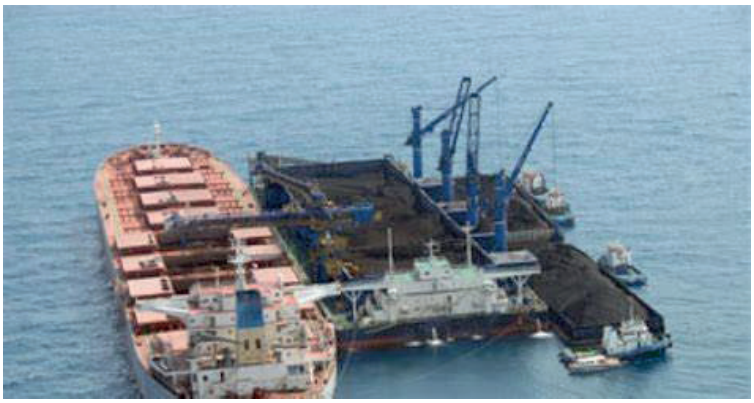
De acordo com Wang (2015), em 60% dos casos de *Transhipment*, a preferência é pelos guindastes flutuantes. Em termos de disponibilidade de equipamento em território brasileiro, esse artigo abordará a formação de 3 unidades conectadas ao mesmo sistema, sendo: 1 navio de grande porte + 1 guindaste flutuante + 1 barcaça/balsa/navio pequeno porte (Figura 8).

Figura 5. *Floating Crane.*



Fonte: Conoship International (2019).

Figura 6. *Floating Terminal.*



Fonte: Logistics Middle East (2014).

Figura 7. *Self-Unloading Vessel.*



Fonte: MacGregor (2016).

Figura 8. Transbordo de Carga (3 unidades).



Fonte: CSL Group (2022).

A Figura 9 traz uma visão do estudo de Wang, realizada com diversas empresas do seguimento mundial, de onde mais tem ocorrido as operações em sistemas flutuantes para transbordo de carga, a qual ele denomina FBTO – *Floating Bulk Transshipment Operation*.

Figura 9. Operações FBTO pelo mundo.



Fonte: Wang (2015).

As empresas que mais se destacam no segmento mundial atualmente são: Swire, Coeclerici, Scorpio Logistics, ASL Energy, Odendorff, LDA, Rietlanden, Marcor e CSL, com grande representatividade das operações acontecendo principalmente na Indonésia.

No Brasil, tem-se o pioneirismo em autorização da empresa Mega Logística, no porto de Vila do Conde, e os processos realizados pela empresa Cargill, no porto de Santarém, e Hermasa, em Itacoatiara. Em comum entre as três empresas, estão as cargas que operam: granéis sólidos (soja, milho e fertilizantes).

MÉTODOS

O Porto de Vila do Conde é um importante porto brasileiro, localizado no município de Barcarena, nas proximidades da Vila de Murucupi, no estado do Pará, em frente a baía do Marajó; baía esta formada pela confluência dos rios Pará, Tocantins, Moju, Guamá e Acará.

Por suas influências tanto fluviais como marítimas, é parte primordial para o desenvolvimento do Arco Norte, movimentando cargas tanto procedentes dos rios Tapajós (porto de Miritituba), Pará, Tocantins, Moju, Guamá e Acará, como por navios mercantes oriundos de diversos países. De excelente localização estratégica, fica situado próximo aos Estados Unidos da América (próximo ao canal do Panamá) e da Europa.

Outro fator importante, que reflete diretamente no aumento da demanda e importância de Vila do Conde, são os estudos para o aumento do calado no canal do Quiriri, principal canal de acesso aos portos de Belém e Vila do Conde, que saiu de 12,2 metros para os atuais 13,8 metros, com perspectivas de chegar a 14,0 metros de profundidade, o que permitirá a navegação de navios com maior porte.

Acrescenta-se sua importância frente a conclusão das obras da BR-163, que proporcionou um incremento no escoamento de grãos no Porto de Miritituba, no município de Itaituba (PA), sendo um dos principais portos a serem utilizados para exportar soja e milho, por meio de diversas empresas que atuam direta e indiretamente na região, como: Unitapajós, Hidrovias do Brasil, LDC, Mega Logística, Cargill e Bertolini.

A empresa Mega Logística, pioneira no Brasil a conseguir autorização para realizar operação de transbordo, iniciou em 2018, por intermédio da Fundação Dom Cabral, os estudos para implantação de um porto sustentável, por meio do *Floating Crane,* para criação de uma solução eficiente no escoamento de grãos pelo Norte do Brasil.

O sistema atual utilizado no porto de Vila do Conde, operado pela Mega logística, consiste em 4 boias instaladas, dentro da poligonal do porto, nas posições: Boia 1 - posição Latitude 01º33'26" S e Longitude 048º46'20" W; Boia 2 - posição Latitude 01º33'35" S e Longitude 048º46'28" W; Boia 3 - posição Latitude 01º33'33" S e Longitude 048º46'32" W; e Boia 4 – posição Latitude 01º33'23" S e Longitude 048º46'22" W.

Vale ressaltar que a poligonal do porto é uma área que indica o limite geográfico da área do porto organizado, sob jurisdição da Autoridade Portuária. A área da poligonal compreende os acessos terrestres e aquáticos, as instalações portuárias e infraestrutura de proteção à atividade portuária.

A Autoridade Portuária do porto de Vila do Conde é a Companhia Docas do Pará (CDP), que concedeu o arrendamento temporário da área que está sendo utilizada pela empresa Mega Logística para realização da operação de transbordo.

O ineditismo da regulamentação desse tipo de operação é destacável também nas normas regulamentadoras que regem as concessões da Autoridade Portuária, pois foi necessária a intervenção da ANTAQ, pela Resolução Nº 64, de 15 de dezembro de 2021, que consolidou a contratação de uso temporário de áreas dentro do porto organizado, para que a CDP realizasse o modelo de arrendamento que está sendo empregado (Figura 10).

Figura 10. Áreas disponíveis para contrato de uso temporário no Porto de Vila do Conde.



Fonte: CDP (2021).

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Levantamentos dos elementos essenciais para operação

A realização das operações ao largo para transbordo de carga de granéis sólidos exige uma gama de levantamentos e cuidados que começam na escolha das embarcações, passam pelas autorizações dos órgãos competentes até chegar a fase da execução.

Pelo entendimento das normativas brasileiras, a execução da operação é de responsabilidade da empresa detentora da autorização para realizar as operações de transbordo de carga em seus sistemas flutuantes, no estudo de caso, pela empresa Mega Logística.

Partindo do suposto que a empresa dimensionou o sistema, fez a escolha dos navios e conseguiu as autorizações necessárias para realizar as operações, seu trabalho não se encerra por aí, pois as etapas de realização das operações exigem cuidados específicos para que se garanta a segurança da operação, por meios de processos consolidados, como procedimentos operacionais e estudos de análise de riscos.

Comunicação

Primeiro, é essencial que exista uma boa comunicação entre as embarcações envolvidas na operação e para tal faz-se necessário a definição de uma pessoa responsável por toda a operação, como um superintendente experiente que tenha conhecimento sobre manobras de convés, comunicação marítima, primeiros socorros, segurança pessoal, responsabilidade social, que tal qual como ocorre nas operações STS, seja uma pessoa licenciada no país com base na Convenção e Código de Instrução, Certificação e Serviço de Quarto para Marítimos (*Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers* – STCW), como oficial de náutica.

A necessidade de escolha de um profissional gabaritado para esse tipo de operação deve-se principalmente pelo fato de que as embarcações que operam na navegação de longo curso, levando os produtos brasileiros a serem transportados pelo mundo, são em sua maioria estrangeiras, provenientes de países signatários da Organização Marítima Internacional (IMO), organização que rege internacionalmente as leis marítimas, como a convenção STCW.

Ainda na parte da comunicação, pelo fato da língua inglesa ser reconhecida pela IMO como a linguagem marítima internacional, é essencial que a pessoa designada como responsável pela operação fale inglês.

As embarcações engajadas nesse tipo de operação devem estabelecer comunicação, em um canal específico do rádio VHF, e permanecer durante todas as etapas da operação atentas a qualquer chamada, utilizando-se de frases diretas e concisas, quando for necessário estabelecer contato, evitando ao máximo interrupções no canal, seguindo as recomendações do *Global Maritime Distress and Safety System* – GMDSS. Além de manter atenção ao

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

canal VHF de chamada geral (canal 16), acompanhando a comunicação das embarcações que trafegam na região.

Avaliação da cena de ação

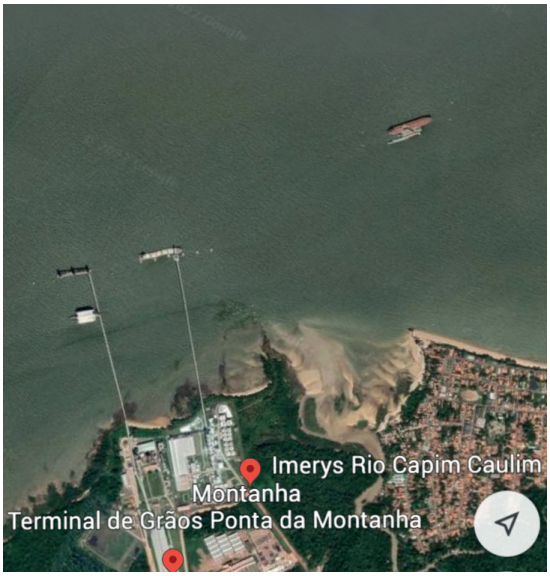
Durante o planejamento de uma operação três pontos principais devem ser levantados antes do seu início: tráfego aquaviário no local, condições climáticas e características hidrológicas.

Tráfego Aquaviário

Quando uma embarcação chega no local da operação, é essencial que seja feita uma avaliação do tráfego local a fim de impedir que outras embarcações ou operações atrapalhem a aproximação no local estabelecido para operação de transbordo. Se for necessário, utilizar como ferramenta a chamada geral no rádio VHF e/ou uma embarcação auxiliar para realizar limpeza de área.

O sistema de transbordo da empresa Mega Logística fica localizado próximo à confluência do Igarapé Curuperé (0,5 milhas náuticas) e aos terminais de Ponta da Montanha e Imerys Rio Capim Caulim (0,59 milhas náuticas), em uma região de tráfego constante, sujeito ao trânsito de navios mercantes e de embarcações de menor porte.

Figura 11. Localização do *Transshipment* em Vila do Conde.



Fonte: Google Earth https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/ (2022).

As informações de navios mercantes que demandem os terminais podem ser consultadas junto a CDP ou estação de praticagem local. Entretanto, para as embarcações de menor porte, que navegam na região e não são controladas ou acompanhadas por nenhum órgão específico, e para as embarcações regionais miúdas e irregulares, que não

possuem rádio VHF, faz-se necessário a utilização de uma embarcação para realizar uma espécie de “varredura” local com antecedência necessária a não permitir obstáculos na operação de amarração.

Condições Climáticas

A importância do levantamento climático está diretamente ligada a todas as fases da operação, fazendo-se necessária sua correta avaliação de forma a contribuir com a segurança operacional

Na fase inicial do projeto, antes da sua implementação, é fundamental que seja realizado um estudo climático que permita verificar a viabilidade das operações, parâmetros como vento, umidade relativa, temperatura e precipitações inferem diretamente nas operações portuárias e no manuseio da carga. A soja, por exemplo, é um produto perecível à água.

O clima em Vila do Conde é definido no Plano de Desenvolvimento e Zoneamento Portuário (PDZ) como equatorial úmido, com pouca variação de temperatura. De acordo com dados levantados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a variação de temperatura na região situa-se entre 22º e 32ºC, com a média anual de 25,6º C.

A principal característica da região é o regime pluviométrico, com os períodos mais chuvosos concentrados entre os meses de janeiro e maio. Nos meses de setembro a dezembro as chuvas vêm acompanhadas de rajadas de ventos fortes, entretanto, a estação automática de Belém (A201) do INMET, a mais próxima de Vila do Conde, não tem registro em seu histórico ventos maiores do que 10 nós de velocidade, o que não reflete a realidade da região.

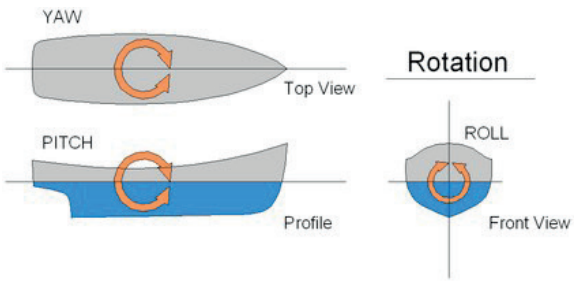
De acordo com informações levantadas com a Estação de Praticagem Barra do Pará, composta por práticos da Zona de Praticagem 03, que possuem expertise nas manobras da área de Vila do Conde e Adjacências, os ventos podem chegar a rajadas de 40 nós.

Outro fator que pode influenciar a realização das operações é a formação das ondas no local, que em Vila do Conde são resultado dos ventos da região de Ponta Grossa, sendo essas ondas apenas de superfície, da ordem de 0,84 m e amplitude de 3,5 segundos, o que não oferece riscos a operação do navio mercante, entretanto, as barcaças e o *floating crane*, por serem de menor porte, podem ser diretamente afetadas, adquirindo movimentos em torno de seus eixos (graus de liberdade), o que pode acarretar choques entre as embarcações.

Os principais movimentos que as barcaças e o *floating crane* podem adquirir pelo movimento das ondas e que podem acarretar em problemas para a operação são osmovimentos rotativos de cabeceio (*yaw),* caturro (*pitch*) e balanço (*roll),* demonstrados na Figura 12.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 12. Movimentos rotativos.



Fonte: Wikipédia (2020). Disponível em: <https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Movimentos_da_embarcação#/media/Ficheiro%3ARotations.png>.

Não há como prever com exatidão quando os movimentos das embarcações afetarão a operação de transbordo, porém como as ondas na região de Vila do Conde são provocadas pelos ventos, a previsão meteorológica consegue apresentar um panorama do comportamento das embarcações, quanto maior a intensidade do vento, maior o número de vagas e maior a movimentação rotativa entre as embarcações.

Características Hidrológicas

Outro quesito importante é realizar uma avaliação das condições hidrológicas, pois as manobras de amarração de desamarração do navio nas boias, conforme determinado pela Autoridade Marítima local, só podem ser realizadas com a maré de enchente.

Existem diversos aplicativos, sites e publicações que conseguem prever com exatidão o regime de marés em determinado local, a importância do estudo da maré está relacionada com o nível de profundidade local e na definição da corrente no local (corrente de enchente ou vazante).

Profundidade não é um fator preocupante para o quadro de boias instalado em Vila do Conde, pois de acordo com a Carta Náutica do local, no nível máximo de redução a profundidade chega a 17 metros de profundidade. Entretanto, a amplitude da maré reflete diretamente na velocidade das correntes de enchente e vazante, quanto maior a amplitude, maior a corrente no local.

A maré de Vila do Conde tem a característica de ser semi-diurna, ou seja, com 2 baixa mar e 2 preamar.

O porto de Vila do Conde fica localizado dentro da área estuarina do Rio Pará e, além da influência das marés, a corrente também fica sujeita ao ciclo fluvionométrico dos rios, resultado do período das cheias (entre dezembro e junho) e secas (entre julho e novembro).

As correntes no local varia entre 2 e 4 nós, na direção Sudoeste – Nordeste, sendo assim, o quadro de boias foi estabelecido de forma que o navio fique sempre aproado a corrente, no aproamento de 47º, a fim de não sofrer influências laterais, o que facilita bastante

a operação no local. Porém, seu efeito deve ser estudado e considerado, principalmente durante a aproximação dos *Floating Crane* e da Barcaça, ainda que as operações sejam realizadas no bordo mais abrigado, à boreste do navio, conforme demonstra a Figura 13.

Figura 13. Fotos da Operação em Vila do Conde.



Fonte: Arquivo Pessoal (2021).

Avaliação dos equipamentos

A avaliação dos equipamentos consiste na verificação de todos os meios físicos envolvidos diretamente nas operações, identificando as possíveis restrições encontradas, podendo ser dividida em: quadro de boias e embarcações envolvidas.

Quadro de boias

O dimensionamento do quadro de boias foi mensurado para atender todos os elementos do conjunto envolvido nas operações, de forma que consiga suportar todo o peso desse conjunto (navio, *floating crane* e barcaça com empurrador), incluindo o as forças externas, resultante de cargas ambientais (vento e corrente) atuantes no sistema.

Além disso, o sistema precisa passar por vistorias periódicas a fim de verificar se mantém as condições de suportar as cargas aplicadas, bem como se houve algum tipo de alteração da posição.

O sistema de fundeio são formados por âncoras, poitas, e boias, todos com especificações próprias dos fabricantes, que garantem que o conjunto atenda determinada carga de trabalho. Além disso, os próprios fabricantes recomendam a periodicidade e tipo de inspeções que devam ser realizados.

Para as amarras, em especial, devem seguir as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 5940 e NBR 13715, quanto a sua manutenção, inspeções e durabilidade.

Embarcações envolvidas na operação

É fundamental que todas as embarcações envolvidas na operação sejam testadas e encontrem-se sem restrições operacionais antes de iniciar as operações.

Dentre os equipamentos que devem ser testados destacam-se os sistemas de governo, as máquinas propulsoras, os sistemas de emergência, os equipamentos de navegação, equipamentos de comunicação, sistema de amarração e sistema de defensas.

Nas palavras da empresa de praticagem da Barra do Pará, diferente de uma manobra de atracação, onde o navio fica encostado nas defensas enquanto os cabos de amarração são passados, na operação de transbordo, quando o navio encontra-se em posição, dentro do quadro de boias, experimenta-se um certo grau de liberdade até que esteja efetivamente amarrado as boias, o que causa uma instabilidade, que somada a falta de referências fixas, demanda mais máquina da embarcação, fator que pode ser limitante para os navios cujo sistema de partida se dê por injeção de ar comprido.

Pelo mesmo motivo acima apresentado, exige-se mais dos rebocadores que acompanham a manobra de amarração do navio, sendo importante que esses estejam em pronta condição de operação.

Outras embarcações que devem ser testada e estarem em plenas condições de operação são os empurradores que conduzem as barcaças e o *Floating Crane*, para que consigam aproximar, com segurança, dos elementos que compões a operação.

O *Floating Crane* merece atenção especial pois, além de precisar apresentar condições de navegabilidade, o guindaste e a garra utilizados no transbordo também devem ser testados e estar em condições seguras de serem operados. Da mesma forma que é feito no quadro de boias, os fabricantes desses equipamentos recomendam a periodicidade e tipo de inspeções que devam ser realizados, bem como os limites operacionais aos quais possam ser expostos.

Riscos envolvidos nas Operações

Os riscos das operações estão diretamente relacionados a possibilidade de acidente, pois pela definição, risco nada mais é que o perigo ou ameaça da ocorrência de um determinado evento que comprometa a segurança da operação.

Dentre os acidentes aos quais o navio está mais propenso a sofrer durante as etapas da operação, pode-se destacar:

- Colisão – choque mecânico entre uma embarcação e um objeto, no caso do estudo, há a possibilidade de ocorrência de choque de qualquer uma das embarcações envolvidas com as boias que compõe o sistema;
- Abalroamento – choque mecânico entre as embarcações envolvidas, durante suas movimentações;
- Choque – devido a proximidade das embarcações durante a operação, ocasionado

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

pelos graus de liberdade adquiridos pelas condições climáticas e hidrológicas;

- Incêndio – destruição causada pela ação do fogo;
- Vazamento de óleo – qualquer quantidade acidental de óleo combustível, proveniente das embarcações envolvidas, que derrame para água;
- Queda de pessoa na água – queda de qualquer tripulante ou pessoas envolvidas nas etapas operacionais, de forma acidental;
- Acidente pessoal grave – acidente ocasionado diretamente com alguma das etapas da operação, que resulte em ferimento grave ou morte;
- Perda de governo – quando uma embarcação sob máquinas, não consegue governar adequadamente nos rumos determinados; e
- Perda de propulsão – quando uma embarcação perde potência de máquinas.

Etapas das Operações

As operações ao largo para transbordo de cargas de granéis sólidos começaram a se desenvolver, no Brasil, nos últimos anos, com sua primeira operação oficialmente homologada pela Autoridade Marítima brasileira em 25 de março de 2022, pela Portaria nº 34 da Capitania dos Portos da Amazônia Oriental, para navios do tipo Panamax, até o limite de 75000 toneladas, no quadro de boias instalado no Porto de Vila do Conde, que traz algumas recomendações, como:

– Manobras de amarração e desamarração a serem realizadas apenas no período diurno e com a maré de enchente;
– Recomendações aos amarradores, nas manobras de amarração e desamarração;
– Quantidade de rebocadores a serem utilizados na manobra; e
– Escalação de práticos com experiência.

A NORMAM-08/DPC passou a trazer recomendações para o cadastro de empresas interessadas em realizar a operação de transbordo de cargas de granéis sólidso, a qual passou a denominar-se pelo termo *Transshipment* (termo pelo qual a partir deste ponto passará a designar as operações ao largo para transbordo de carga de granéis sólidos), que foca na parte documental para se obter a Autorização de Operação de Transbordo de Granéis Sólidos entre Embarcações, com a recomendação de utilização de checklists para as etapas da operação de transbordo, que as classifica como pré-chegada/amarração, operação de transbordo e pré-saída.

As operações do tipo STS e STB contam com recomendações de segurança criadas pelo Fórum Marítimo Internacional das Empresas Petrolíferas (OCIMF) e pela Câmara Internacional de Navegação (ICS), organizações essas que desenvolvem e promovem guias

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

de boas práticas para indústria da navegação. O *Ship to Ship Transfer Guide for Petroleum, Chemicals and Liquified Gases* é um guia específico para as operações STS, que contém recomendações de segurança, nível mínimo de equipamentos e boas práticas de operação, dividido em quatro estágios – pré chegada; chegada e amarração; transferência de carga; e procedimentos para saída – que envolvem uma série de variáveis que impactam diretamente e indiretamente cada etapa da operação.

A IMO possui uma publicação genérica, focada nos procedimentos de segurança, o Código Internacional de Gerenciamento de Segurança (ISM Code), e uma publicação mais específica para o carregamento de granéis sólidos, o Código Marítimo Internacional para Cargas Sólidas à Granel (IMSBC Code), mas não há nada direcionados às operações *Transshipment,* tal qual o guia da OCIMF criado para as operações STS.

Considerando as semelhanças com a operação STS, o presente artigo utilizará como base para estudo as etapas apresentadas no *Ship to Ship Transfer Guide for Petroleum, Chemicals and Liquified Gases,* que compreendem os procedimentos para: Pré chegada; Aproximação e amarração; Transferência de Carga; e Pós transferência.

Pré Chegada

Antes da chegada da embarcação uma série de informações precisam ser levantadas a fim de planejar uma operação segura, sendo necessário a definição de uma figura que atue como responsável pela operação, que orientará o navio e coordenará as operações, de acordo com os regulamentos locais.

Como visto anteriormente, é primordial que seja feito um levantamento meteorológico para os dias em que acontecerão a operação.

Além disso, ainda dentro dos elementos essenciais, faz-se necessário avaliar o espaço d'água utilizado, verificando as condições de maré para definição da amarração, bem como verificar presença ou previsões de interdições ou alterações do tráfego aquaviário, o que pode ser consultado junto às autoridades marítima e portuária.

É importante também estabelecer comunicação com todos os meios e autoridades envolvidas na operação, repassando os dados mais importantes, a fim de conduzir as manobras com clareza, discernimento e anuência, principalmente, das autoridades locais.

Por mais que as operações *transshipment* estejam ocorrendo em diversas partes do mundo, ainda não é uma operação normatizada, onde muitos navios e tripulações ainda não têm experiência, dessa forma é essencial que seja feito um briefing com a tripulação do navio mercante e que todos os tripulantes estejam treinados nos mais diversos tipos de acidentes e incidentes que possam ocorrer durante a operação.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Da mesma forma, as tripulações dos empurradores e rebocadores utilizados na operações devem receber treinamento apropriado para o tipo de operação.

Outra situação que deve ser bem avaliada é arranjo entre as embarcações para que seja possível realizar suas amarrações com segurança e dispondo da proteção das defensas.

Ao responsável pela operação cabe também definir os detalhes da operação de carga, estabelecendo um plano que deverá ser seguido por todos os envolvidos, que contenha as atribuições e ações de todos os elementos envolvidos na operação, sem interferir na autoridade do comando de cada embarcação.

No plano a ser desenvolvido pelo responsável da operação, devem estar contidas, claramente, a função de cada uma das embarcações, um plano de comunicação, bem como as respostas às situações de emergência.

Além das recomendações já mencionadas, o navio deve realizar as operações de lastro ou deslastro nessa fase, de acordo com o plano de carregamento que realizará no porto.

Caso não haja nenhuma restrição dentre os parâmetros levantados, recomenda-se que todos os equipamentos sejam testados e encontrem-se em condições satisfatórias a fim de que possa ser realizada a próxima etapa.

Em resumo, a pré-chegada deve abordar: comunicação; avaliação do tráfego; avaliação das condições climáticas; avaliação das condições hidrológicas; teste prévio dos equipamentos envolvidos, embarcações e quadro de boias; além de também focar em um programa de treinamento prévio das tripulações das embarcações.

Quanto aos riscos envolvidos nessa etapa, por ser um processo de planejamento, os riscos são os os mesmos eventuais da navegação e/ou fundeio da embarcação.

Aproximação e amarração

Em termos de aproximação e amarração, esta fase pode ser dividida, de forma sequencial, em 3 etapas: navio principal, *floating crane* e barcaças.

Navio principal

A aproximação ao ponto onde o navio realizará a operação deve ser efetuada com velocidade controlada e utilizando todos os meios de segurança disponíveis.

Como mencionado anteriormente, não há pontos referenciais fixos para que se possa monitorar a embarcação, sendo assim, não é recomendado que essa manobra ocorra à noite.

Uma ferramenta muito utilizada para fazer o monitoramento final da embarcação, enquanto são realizadas as amarrações, é o *Portable Pilot Unit* (PPU). O PPU é um auxílio comumente utilizado pelos práticos, que conectam um plug no navio que estão assessorando (*Pilot Plug*) para transmitir a posição do *Automatic Aid System* (AIS) do navio a um software

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

que correlaciona as informações necessárias e produz vetores de predição dos movimentos, otimizando a manobra de amarração às boias.

Quando o navio encontra-se em posição, começa a manobra de amarração, que é feita com auxílio de embarcações menores, levando amarradores para subirem nas boias e passarem os cabos. Com o grau de liberdade da embarcação, esses amarradores ficam expostos a riscos quando sobem nas boias, pois qualquer alteração errada na posição do navio pode tensionar os cabos, colocando esses amarradores em risco de queda e sujeitos a rompimento dos cabos.

A amarração dos cabos nas boias é sem dúvidas uma parte muito arriscada da operação, que deve envolver experiência e bastante treinamento dos amarradores, para que esses não se coloquem em riscos desnecessários, como ficar em cima da boia enquanto os cabos são tensionados (Figura 14).

Figura 14. Amarração nas boias.



Fonte: Arquivo Pessoal (2021).

Cada boia recebe 3 cabos, e após todos os cabos passados, esses devem ser tensionado e, caso não ocorra nenhum problema, encerra-se a amarração do navio principal.

Floating Crane

A manobra de aproximação do *Floating Crane* é feita por um empurrador (Figura 15) ao qual permanece atrelado durante toda a operação. Recomenda-se que a aproximação seja realizada por um profissional experiente.

A manobra em si, deve ser realizada com cautela, aproximando-se com velocidade baixa, observando o tráfego local e, quando a uma distância segura, passar os cabos, acordo arranjo de amarração previamente planejado, de acordo com a disposição das defensas no costado.

Navio e *Floating Crane* devem permanecer em contato via rádio, durante toda a operação, a fim de estabelecerem uma comunicação segura, principalmente, quando houver a necessidade de movimentar o *Floating Crane* em virtude da alteração do porão do navio,

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

à medida que o carregamento for avançando, conforme será abordado na parte da transferência de carga.

Figura 15. Aproximação do *Floating Crane*.



Fonte: Arquivo Pessoal (2021).

Aproximação das barcaças

Essa é uma etapa que ocorrerá algumas vezes, pois se uma barcaça tem capacidade para transportar 2.000 toneladas, o navio do tipo Panamax, que tem capacidade para receber de 65.000 a 80.000 toneladas, poderá receber no mínimo 33 barcaças para carregar um navio.

A aproximação das barcaças ocorre com auxílio de um empurrador, que em cada etapa opera com 2 barcaças.

Por mais que a operação ocorra toda no bordo mais abrigado, a aproximação deve ser realizada com bastante cautela, em uma velocidade segura, observando sempre as condições ambientais e o tráfego local, mantendo contato constantemente com o *Floating Crane*.

Quando a uma distância segura, os cabos devem ser passados e as barcaças amarradas ao *Floating Crane*, observando a disposição das defensas, visando evitar o choque físico entre as embarcações envolvidas.

Vale ressaltar que os empurradores utilizados tanto para o *Floating Crane* quanto para as barcaças devem possuir suficiente potência propulsora e capacidade de manobra para operarem tanto em condições favoráveis, quanto em condições adversas, pois de acordo com o plano de emergência a ser utilizado em certas condições consideradas inseguras, o empurrador poderá ser solicitado a desamarrar e afastar o conjunto.

Requisitos adicionais

O processo de amarração do *Floating Crane* ao navio e das barcaças ao *Floating Crane* demanda as mesmas recomendações cobradas para os casos em que o navio é amarrado a um cais ou trapiche fixo, a saber:

– Apenas o pessoal necessário para operação de amarração deve estar presente nos conveses do navio, *Floating Crane* e barcaças;
– Ter atenção aos cabos e às voltas formadas pelos cabos;
– Checar todo equipamento necessário, buzinas, guinchos etc antes de iniciarem as operações com amarração; e
– Manter uma rotina de sempre checar os cabos para verificar se estão tensionados de maneira apropriada (sem muita folga ou muito tensionados).

Além disso, a aproximação e amarração deve abordar, de forma resumida, procedimentos para: comunicação; avaliação do tráfego; avaliação das condições climáticas; avaliação das condições hidrológicas; e teste prévio dos equipamentos envolvidos, embarcações e quadro de boias.

Quantos aos riscos envolvidos nesta etapa destacam-se as possibilidades de ocorrência de colisão; abalroamento; choque entre embarcações; incêndio e/ou vazamento de óleo, ambos decorrentes de qualquer um dos choques anteriores; queda de pessoa n'água; acidente pessoal grave, em virtude de rompimento de cabos; perda de governo; perda de propulsão.

Transferência de Carga

A fase de transferência de carga é a mais demorada, requerendo um revezamento apropriado entre as pessoas envolvidas na operação a fim de que a falta de repouso apropriado e, consequente, esgotamento não cause acidentes ou problemas a operação.

Nessa etapa ocorre a descarga das barcaças e carregamento do navio, através da operação do guindaste do *Floating Crane,* que como mencionado anteriormente, possui limitações, principalmente por conta da velocidade do vento, não podendo operar acima de 20 nós.

Ainda sobre a operação do *Floating Crane,* é necessário que o operador do guindaste tenha formação na Normas Regulamentadoras (NR) 11 e 12, além de possuir experiência nesse tipo de movimentação.

Durante toda operação, guindaste, convés do navio e todas as pessoas envolvidas necessitam estar em comunicação para repasse das informações necessárias.

O navio deve ter especial atenção para que não aderne lateralmente (adquirir banda) ou fique com um grande diferença de calados entre proa e popa, dessa forma, se necessário,

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

os procedimentos para lastro e deslastro da embarcação deverão ser efetuados, atendendo as legislações nacionais e internacionais.

Além dos procedimentos acima listados, em virtude da alteração do calado do navio enquanto está sendo carregado, as amarrações devem ser constantemente checadas para garantir o tensionamento apropriado.

Outra recomendação especial é para o fechamento dos porões em caso de chuva, pois além de danificar a carga, pode causar liquidificação da carga dentro do porão, o que ocasionaria problemas de estabilidade.

Em resumo, os seguintes parâmetros devem ser avaliados durante a fase de transferência de carga: comunicação; avaliação das condições climáticas; avaliação das condições hidrológicas; avaliação dos equipamentos, em especial os cabos de amarração e guindaste do *Floating Crane;* além da recomendação do adestramento das tripulações das embarcações envolvidas na operação, principalmente dos operadores de guindaste.

Durante esta etapa, destacam-se os riscos: choque entre embarcações; incêndio e/ou vazamento de óleo, decorrentes de choque; queda de pessoa n'água; acidente pessoal grave, em virtude de rompimento de cabos choque entre embarcações.

Pós transferência

Após o carregamento do navio, começam os procedimentos pós transferência, que consistem na desamarração das embarcações, desamarração do navio e saída do quadro de boias.

Para a desamarração das embarcações, deve ser dada especial atenção aos cabos durante esse processo, para que a manobra ocorra em segurança, com todas embarcações envolvidas atentas à comunicação e ao tráfego local.

No processo de desamarração do navio ao quadro de boias, é necessário ter a devida atenção aos amarradores que subirão nas boias, permitindo que esses só acessem a manobra após os cabos estarem brandos.

Para a saída da embarcação, os procedimentos de comunicação, avaliação do tráfego, avaliação das condições climáticas, avaliação das condições hdrológicas e teste prévio dos equipamentos, principalmente relativos ao governo do navio, devem ser executados.

Para essa etapa destacam-se os riscos de colisão; abalroamento; choque entre embarcações; incêndio e/ou vazamento de óleo, ambos decorrentes de qualquer um dos choques anteriores; queda de pessoa n'água; acidente pessoal grave, em virtude de rompimento de cabos; perda de governo; perda de propulsão.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

RESULTADOS

Como resultado do levantamento dos riscos operacionais envolvidos na operação *Transshipment*, em Vila do Conde, onde foram abordados os elementos essenciais, de acordo com cada etapa da operação, baseados na mesma cinemática das operações STS, propõe-se a criação de procedimentos operacionais e análise de riscos para cada uma das etapas da operação *Transshipment,* de acordo com os quadros resumos abaixo apresentados:

Tabela 1. Procedimentos Operacionais x Etapas Operacionais.

ETAPAS OPERACIONAIS		PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS					
		Comunicação	Avaliação da Cena			Avaliação dos Equipamentos	
			Tráfego	Condições climáticas	Condições Hidro-lógicas	Quadro de boias	Embarcações
Pré Chegada		X	X	X	X	X	X
Aproximação	Navio	X	X	X	X	-	X
	Floating Crane	X	X	X	X	-	X
	Barcaças	X	X	X	X	-	X
Transferência de Carga		X	-	X	X	-	X
Pós Transferência		X	X	X	X	-	X

Fonte: Autores (2022).

Tabela 2. Riscos Operacionais x Etapas Operacionais.

ETAPAS OPERACIONAIS		RISCOS OPERACIONAIS								
		Colisão	Abalroamento	Choque	Incêndio	Vazamento de óleo	Queda de pessoa n'água	Acidente pessoal grave	Perda de propulsão	Perda de governo
Pré Chegada		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aproximação	Navio	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Floating Crane	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Barcaças	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Transferência de Carga		-	-	X	X	X	X	X	-	-
Pós Transferência		X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Autores (2022).

DISCUSSÃO

O presente artigo focou apenas na operação de transbordo, não abordando as interações com outras operações que ocorrem dentro de complexo portuário de Vila do Conde, como as operações nos terminais de Ponta da Montanha e Imerys Rio Capim Caulim, os mais próximos do local do *Transshipment.*

A posição onde ocorre o *Transshipment* também sofre influência do tráfego de embarcações regionais de carga, passageiros e de navios mercantes que eventualmente estejam

fundeados próximos, que embora considerados na avaliação da cena, não há, dentro das literaturas atuais, o estabelecimento de uma margem de segurança que tenha que ser mantida da operação *Transshipment* para demais embarcações que trafegam na área.

CONCLUSÃO

Apesar das proposições feitas, de acordo com o levantamento feito para cada etapa, para o aumento da segurança operacional das operações *Transshipment*, a temática ainda é inovadora em solo brasileiro e carece de mais estudos que corroborem a temática apresentada.

Dentre os estudos, sugere-se um incremento nas análises de riscos, de maneira que possam abranger não só a operação *transshipment,* mas suas interações com operações próximas, com outras atividades que ocorram no local, e seus impactos sociais e ambientais.

Ressalta-se que, apesar da carga manuseada ser de menor risco do que as cargas manuseadas nas operações STS e STB, os navios que recebem a carga de granel sólido transportam grandes quantidades de combustível para consumo próprio, o que justifica ainda mais o incremento nas análises e nos estudos para esse tipo de operação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO. **Anuário ANTAQ**: 2021. [*S.l.*]: ANTAQ, 2021. Disponível em: <http://ea.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/opendoc.htm?document=painel%5Cantaq%20-%20anu%C3%A1rio%202014%20-%20v0.9.3.qvw&lang=pt-BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true>. Acesso em: 20 jan. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO. **RESOLUÇÃO ANTAQ Nº 59, de 28 de Outubro 2021**. [*S.l.*]: ANTAQ, 2021. Disponível em: <https://juris.antaq.gov.br/index.php/2021/11/05/59-2021/> Acesso em 20 jan. 2022.

CARVALHO, E. *et al.* **Floating Crane: Porto Sustentável**. Especialização (Gestão de Negócios) – Fundação Dom Cabral, Belém, 2018. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/32>. Acesso em: 15 dez. 2021.

COMPANHIA DOCAS DO PARÁ. **PDZ – Porto de Vila do Conde/PA**. Belém: CDP, 2020. Disponível em:<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e- planejamento/politica-e-planejamento/arquivos-pdz/pdz_vila_do_conde_portaria_591_2021.pdf>. Acesso em 20 jan. 2022.

DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS. **Normas da Autoridade Marítima para Tráfego e Permanência de Embarcações em Águas Jurisdicionais Brasileiras**. [*S.l.*]: DPC, 2013. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/NORMAM-08.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

OLIVEIRA, P.C.M. **Análise Operacional e de Custo Logístico do Processo de Transbordo de Navio para Navio – Transshipment – no Brasil. Uma Aplicação ao Minério de Ferro no Porto de Santos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3148/tde-01092017-144127/pt-br.php>. Acesso em: 11 nov. 2021.

OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM. **Ship to Ship Transfer Guide Petroleum. International Chamber of Shippng**. 4. ed. [*S.l.*]: OCIMF, 2005.

WANG, Y. **Operability Study of Floating Bulk Transhipment Operation**. Master of Science Thesis - Delft University of Technology, 2015. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A6ff67b1f-adf7-4435-9600-7d29ce0c5147>. Acesso em: 17 jan. 2022.

17

Os barcos expressos e o transporte fluvial de passageiros: transformações e inovações no ir e vir Amazônico

Robert Carvalho de Azevedo David
Secretaria Municipal de Educação de Manaus - AM

10.37885/221110939

RESUMO

Neste capítulo, serão apresentados resultados da pesquisa realizada em Manaus e interior do Amazonas entre 2015 e 2020 sobre os Barcos conhecidos como Expressos ou Ajatos. Com os Expressos, segmento que se expandiu após a década de 1990, no Amazonas, percursos tiveram seu tempo de viagem amplamente reduzidos. Essas embarcações funcionam com motores potentes, são mais leves e velozes em relação às embarcações tradicionais que transportam cargas e passageiros ao mesmo tempo, também conhecidos como transporte fluvial amazônico misto. Nos Expressos ou Ajatos é priorizado o transporte de passageiros em detrimento de cargas, o que possibilita as viagens serem mais rápidas. Inicialmente, foram pesquisadas as articulações entre Manaus e as cidades da Região Metropolitana de Manaus - RMM e, posteriormente, as viagens dos Expressos a partir de Manaus para pontos mais distantes da capital, em cidades que exercem centralidade na rede fluvial como: Coari, Tefé, Tabatinga, Itacoatiara e Parintins. Para compreender melhor esse segmento do transporte fluvial amazônico, foram realizadas viagens, entrevistas e aplicação de questionários com armadores, tripulantes e viajantes, durante as viagens e nos portos dessas cidades.

Palavras-chave: Transporte Fluvial, Manaus, Expressos, Velocidade.

INTRODUÇÃO

A cidade de Manaus concentra grande parte das atividades de transporte fluvial na região, pois dela partem vários Expressos que circulam no Amazonas. Nas últimas décadas, os Expressos passaram a ter importante papel na rede fluvial amazônica, já que em algumas localidades, esses barcos são o principal e mais rápido meio de interligação entre a capital e alguns municípios que fazem parte da RMM e comunidades rurais próximas. A partir da pesquisa realizada nos portos e estruturas flutuantes localizadas na cidade de Manaus e no interior, ficou evidente que os Expressos já estão consolidados em diversas rotas, não é incomum haverem mudanças para adequação de demanda de passageiros, como ocorreu no caso da viagem entre Manaus-Santarém, que teve redução na oferta de embarcações do segmento ao decorrer dos anos por conta da concorrência com o modal aéreo, que ampliou bastante as viagens para essa cidade com preços acessíveis boa parte do ano.

As cidades que possuem embarcações do tipo Expresso estão mais articuladas que as demais cidades e possuem mobilidade mais rápida na rede fluvial regional. Elas apresentam diferenças internas, no que se refere à disposição de equipamentos de transporte, visto que os modais podem estar organizados de maneira distinta. Essa diferenciação entre as cidades, no que tange o transporte, pode ocorrer por diversos aspectos e afetará diretamente na possibilidade de demanda para barcos do tipo Expresso. Sendo assim, ao se analisar a distribuição dos barcos Expressos, é primordial que se articule com o funcionamento das cidades estudadas a fim de compreender a organização da rede fluvial de transporte de passageiros que utilizam embarcações desse segmento.

MÉTODO

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a dinamicidade espacial e temporal do transporte fluvial Expresso na rede fluvial amazônica, tendo como base a cidade de Manaus e a sua articulação, além de demonstrar como o transporte fluvial na Amazônia se inseriu no meio técnico-científico-informacional por meio da utilização dos barcos Expressos; analisar as inovações e as transformações no transporte regional a partir da introdução de novas técnicas de navegação no transporte fluvial e, como esta modernização contribuiu para a produção do espaço e mobilidade na Amazônia; mapear e caracterizar a rede fluvial de navegação regional nas calhas dos rios Amazonas e Solimões a partir da implementação dos barcos Expressos. Visando elucidar os principais pontos teóricos, foi realizado o levantamento da bibliografia existente relacionada ao tema, a fim de compreender como a temática do transporte fluvial tem sido trabalhada no meio acadêmico; ante deste arcabouço, realizou-se as opções teóricas e metodológicas da pesquisa. A pesquisa de campo foi o

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

principal instrumento de coleta de dados, primeiramente levantamos as embarcações que realizam interligação entre a cidade de Manaus e os municípios que fazem parte da região metropolitana, compreendendo, inclusive, algumas áreas e comunidades que possuem interligação a partir dessas embarcações; posteriormente aqueles que realizam transporte longitudinal, no âmbito estadual e interestadual, como por exemplo, para cidades de Coari, Tefé, Tabatinga, Itacoatiara e Parintins.

A capital Manaus é o centro difusor da rede, exercendo centralidade no Amazonas no que se refere à interligação com as diversas cidades do estado. Como etapa inicial da pesquisa de campo, realizamos o levantamento dos Barcos Expressos que praticam as rotas a partir das balsas localizadas na área denominada de Manaus Moderna. Essa área foi escolhida mediante a considerável quantidade de embarcações em atividade e que trafegam por diversas cidades da Amazônia, interligando a capital Manaus, principal centro difusor de embarcações no estado. Conforme pesquisas previamente realizadas, verificou-se que os barcos Expressos passaram a atuar como novo segmento, utilizando como pontos de atracação as balsas que estão localizadas na supracitada área. Nesse sentido, cumpre a esta pesquisa entender e mapear como ocorre o fluxo de embarcações a partir dessas balsas. Os Expressos realizam seus fluxos principalmente das balsas que ficam atracadas na Manaus Moderna, localizada no centro da cidade de Manaus. A maioria dos destinos que partem de Manaus para diversas áreas do Amazonas utilizam o Porto da Manaus Moderna, excetuando-se as embarcações que viajam para o Rio Negro, que tem como porto de atracação o Porto do São Raimundo.

RESULTADOS

Com o Expresso, percursos tiveram seu tempo de viagem amplamente reduzido. Estas embarcações funcionam com motores potentes, são leves e velozes, com pontos fixos de parada. Diferente do transporte fluvial amazônico misto, o qual transporta passageiros e cargas no mesmo barco, o Expresso prioriza o transporte de passageiros, tornando as viagens mais rápidas. Para tanto, ressalta-se que essas mudanças não se dão isoladamente, possuindo forte relação com fatores econômicos, culturais e sociais na região. Assim, o transporte não pode ser analisado de forma isolada, pois sua funcionalidade está integrada às transformações socioespaciais (SANTOS, 1999).

Como não há impedimento legal para mudanças de trechos nas rotas intermunicipais, a fiscalização é pouco frequente, os critérios para definição das rotas e dias em que as embarcações navegarão são definidos entre os armadores a partir de critérios como: demanda de passageiros para o dia, já que existem embarcações com diferentes capacidades atuando no mesmo trecho, tempo de atuação no trecho, armadores que possuem mais tempo

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

navegando em determinados trechos, de certa forma prioridade na escolha do dia de partida (NOGUEIRA, 1999).

A entrada novas embarcações nos trechos, também, se pauta na autorregulamentação do transporte regional. Apesar de não haver proibição de concorrência por nenhum órgão regulamentador, já existe uma organização preestabelecida entre armadores e proprietários dos terminais, que leva em consideração também o tempo no ramo e o nível de proximidade entre os proprietários nos quatro terminais em que realizam atracação para esse tipo de viagem saindo de Manaus.

Apesar do crescimento do segmento, o fato de construir a embarcação não gera garantia de manutenção do armador no segmento ou na rota inicial, dependendo da concorrência ou da demanda de passageiros pode haver insucesso na rota pretendida, ocasionando a retirada da embarcação do trecho, quando isso ocorre às embarcações podem ser negociadas pelos seus armadores ou alugadas caso o mesmo não tenha o interesse de se manter na rota. No entanto, tal situação se configura como a minoria dos casos, pois a maioria dos armadores entrevistados tem o objetivo de permanecer no segmento, alguns deles, inclusive, já estão no segmento há vários anos e tem procurado diversificar o número de embarcações (DAVID, 2019).

DISCUSSÃO

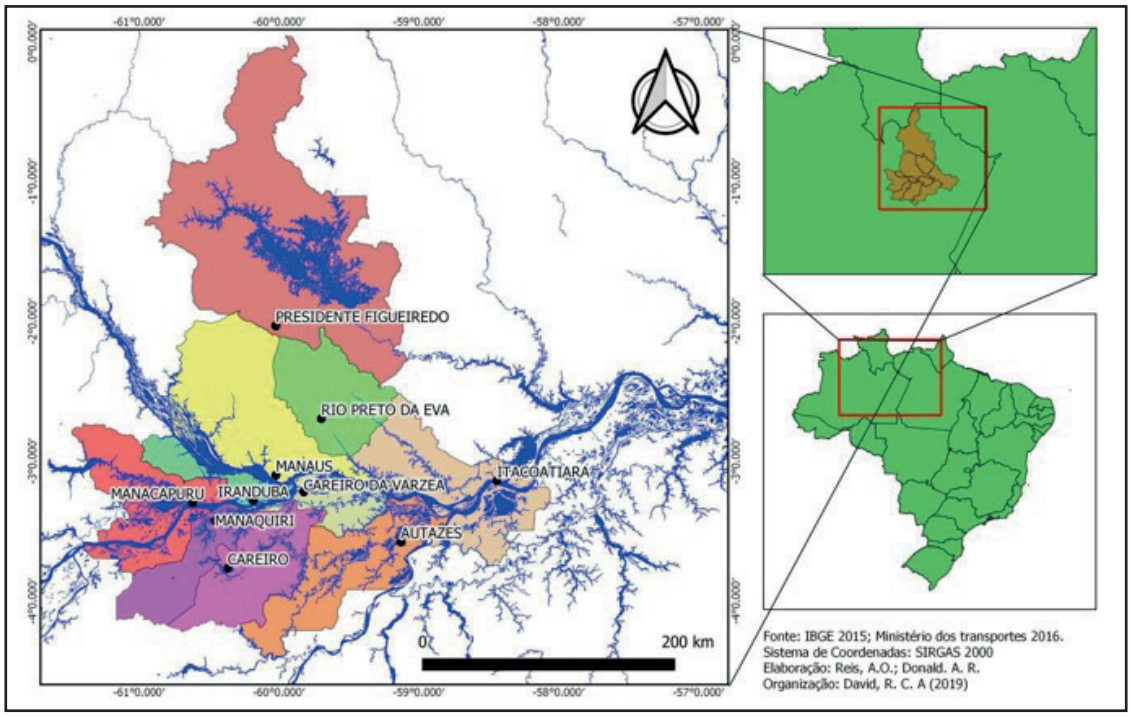
A cidade de Manaus concentra grande parte das atividades de transporte fluvial na região, pois dela partem vários Expressos que circulam no Amazonas. Nas últimas décadas, os Expressos passaram a ter importante papel na rede fluvial amazônica, uma vez que em algumas localidades, esses barcos são o principal e mais rápido meio de interligação entre a capital e alguns municípios que fazem parte da RMM (Manaquiri, Careiro da Várzea). Também, serve comunidades rurais próximas que possuem considerável proporção de barcos Expressos em relação às embarcações tradicionais com funcionamento diário, além de cidades distantes tais como Tabatinga no Alto Solimões, ponto final na Calha Solimões e, Parintins na Calha do Amazonas com ligação para as cidades do oeste paraense. Assim, no que tange o transporte específico de passageiros, o Expresso tem se apresentado como uma importante alternativa de mobilidade entre as cidades no Amazonas.

A capital é polarizadora de diversos serviços urbanos e com isso os meios de transporte entre os municípios da região metropolitana, a maior parte fluvial, apesar de alguns possuírem a opção rodoviária. A capital abastece e também é abastecida, utilizando-se de embarcações regionais, tanto para o transporte de passageiros, como também de cargas. O Expresso tem sido importante opção de mobilidade na RMM, que tem como principal

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

ponto de concentração de embarcações é área da Manaus moderna localizada no centro da cidade (DAVID, 2019). Ver Figura 1.

Figura 1. Região Metropolitana de Manaus – Amazonas - Brasil.



Fonte: IBGE (2015).

Manaus é o principal centro difusor de transporte fluvial Expresso no Amazonas e mais importante centro difusor tanto para os municípios da RMM e para o interior do estado. Na capital, a maioria das embarcações se concentram no Porto da Manaus Moderna, localizado nas margens do Rio Negro, na área central de Manaus. Como pontos de atracação e embarque são utilizadas estruturas flutuantes, localizadas no entorno dessa área. Por se localizar na parte central de Manaus, perto de diversas instituições públicas e, também, com diversas opções de transporte urbano para os diversos bairros da cidade, sua localização se torna importante fator para que a maioria dos barcos realize seu embarque nessa parte da cidade.

Nessa área existe a maior concentração de embarcações provenientes de diversas localidades, que utilizam as estruturas flutuantes particulares para atracar. Essas estruturas flutuantes não possuem regulamentação referente à qualidade na prestação de serviços, por parte do poder público estadual. A autorização está vinculada ao status de embarcação, dessa maneira, a averiguação das balsas está relacionada, principalmente aos itens de segurança. Mesmo não sendo regulamentadas, são nelas que ocorre a maior movimentação de passageiros e mercadorias na cidade de Manaus, já que há décadas a questão da regulamentação do transporte fluvial regional não é resolvida (NOGUEIRA 1999).

Devido à proximidade das feiras e comércios existentes na área da Manaus Moderna, vários produtos de diversas localidades chegam através dos barcos que aportam nas balsas,

que, de certa maneira, favorecem o abastecimento agrícola da Feira da Manaus Moderna de maneira mais rápida. Vários desses produtos são provenientes de municípios que se localizam nas proximidades de Manaus, enquanto outros são provenientes de municípios mais distantes.

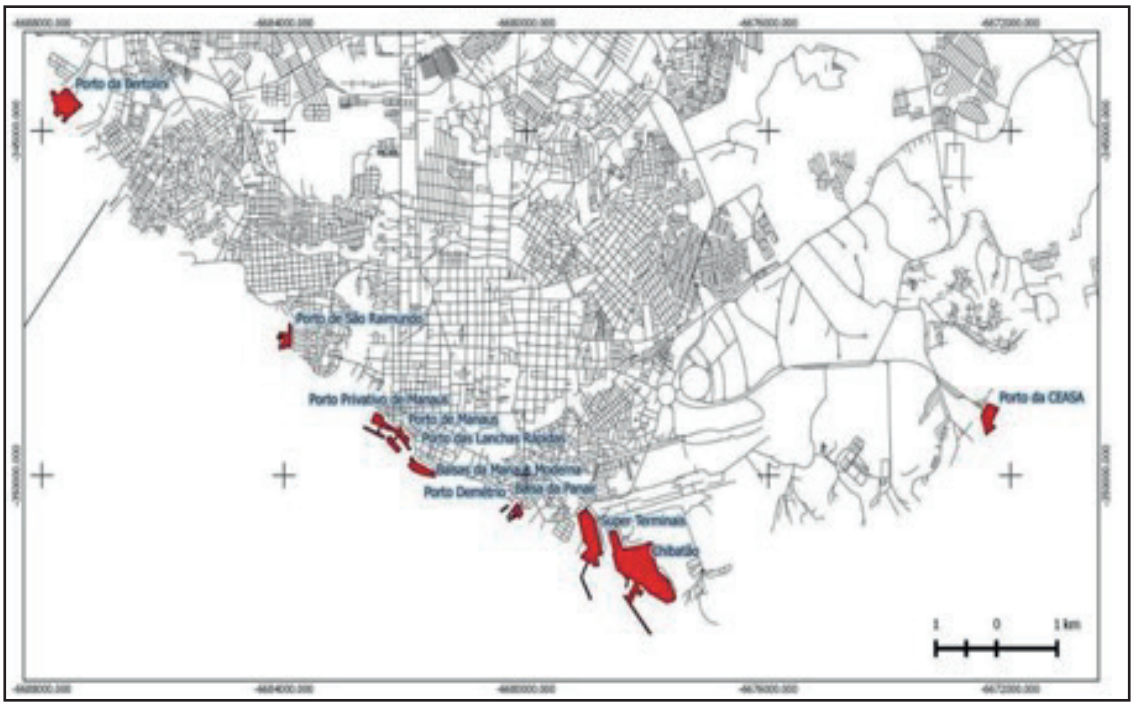
Apesar da importância para a movimentação de passageiros de transporte fluvial, as estruturas flutuantes da Manaus Moderna, apresentam diversas dificuldades no que se refere ao embarque e desembarque de passageiros. Excetuando-se o terminal Ajato, onde atracam apenas barcos do segmento Expresso, as outras estruturas flutuantes recebem atracação de transporte misto, dentre elas, a Balsa Verde e da Balsa Amarela também comportam a atracação de Expressos.

Na Manaus Moderna, pode-se apontar as seguintes balsas de onde ocorrem os fluxos de embarcações para diversas localidades da Amazônia: o Terminal Ajato ou Balsa Laranja, a Balsa Amarela e a Balsa Verde. Essas estruturas flutuantes, também chamadas de balsas, são utilizadas como portos e nelas funcionam os pontos de chegada e saída da maioria dos barcos em Manaus seguindo para todo o Amazonas, parte do Pará e Rondônia. Cada uma dessas balsas possui características comuns, no que se refere ao destino das embarcações que a utilizam.

Na parte central de Manaus, outro ponto para embarque e desembarque de passageiros para viagens intermunicipais funciona simultaneamente as Balsas da Manaus Moderna, porém, administrado de maneira diferenciada: o Porto Privatizado de Manaus. A partir de 1992, passou a funcionar, visando atender, com maior qualidade e segurança aos passageiros que realizavam viagens fluviais. Até a década de 1990, a área conhecida como Manaus Moderna era a opção principal para atracação de embarcações regionais de maior capacidade de cargas e passageiros. Buscava-se, com o Porto Privatizado, solucionar questões como conforto e segurança, atraindo, assim, passageiros e embarcações. No entanto, em 2018, a maioria dos barcos não utiliza como ponto de atracação por diversas razões, dentre elas, está principalmente o valor cobrado para a atracação bem maior do que a cobrada no Porto da Manaus Moderna. Ver Figura 2.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 2. Portos flutuantes de Manaus.



Fonte: Ferreira (2016).

No porto privatizado, há melhor estrutura em relação ao Porto da Manaus Moderna. Este porto possui algumas áreas cobertas e climatizadas; existem guichês específicos para compra de passagens e envio de cargas. O acesso também é controlado para chegar às embarcações, parte do serviço é sistematizada, contando com número predefinido de barcos cadastrados e horários fixos de saída. Além dos serviços portuários, possui bares, caixas eletrônicos, restaurantes e segurança interna. Existe também, certo rigor no horário da saída das embarcações. No entanto, as passagens comercializadas no porto privatizado são repassadas a um custo maior. Há frequência de embarcações mistas de grande porte, pois a estrutura flutuante do porto acomoda melhor esses barcos (NOGUEIRA 1999).

Grande parte das cargas levadas está relacionada ao abastecimento do comércio das cidades destino, já tendo inclusive fluxos semanais e mensais de diversos produtos. As principais rotas intermunicipais de embarcações de transporte misto atendidas nesse porto são: Coari, Tefé, Tabatinga e escalas, Porto Velho, Santarém e Belém. O Porto Privatizado não atende toda a demanda do fluxo de embarcações existentes em Manaus, os fluxos existentes nesse porto estão relacionados às embarcações que possuem maior capacidade de carga e passageiros.

Os barcos regionais que realizam operação nesse terminal possuem dimensões maiores em relação aos das demais rotas, levando grande quantidade de carga (SINDARMA, 2014). No Porto Privatizado, atualmente administrado pela empresa Sierra do Brasil S. A., a estrutura para recebimento de carga é melhor que na Manaus Moderna, já que os caminhões

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

podem chegar mais próximos das embarcações, o que facilita bastante a carga de descarga, no entanto é cobrada uma taxa para a entrada de veículos e pessoas.

Apesar da existência do Porto Privatizado, são nas estruturas flutuantes da Manaus Moderna onde ocorre maior movimentação de passageiros, fazendo o serviço de embarque e desembarque. Mesmo sem a devida regulamentação, as balsas da Manaus Moderna continuam sendo a alternativa mais utilizada para o transporte fluvial intermunicipal, recebendo embarcações de diversas localidades que desempenham importante papel na mobilidade de passageiros no estado. Apesar da precariedade dos serviços, apresenta dinâmica de funcionamento que possui relação com diversos outros serviços como fretes, carregadores e entrega de encomendas, além do acesso ao barco ocorrer livremente, diferente do Porto Privatizado que cobra taxas para acesso às embarcações, estando a pé ou com veículo.

Além das balsas da Manaus Moderna e do Porto Privatizado, noutras partes da cidade são utilizadas para o embarque e desembarque de passageiros e transporte de mercadorias com destaque para os seguintes:

O Porto do São Raimundo: localizado no bairro com o mesmo nome, era bastante utilizado, antes da construção da Ponte do Rio Negro, para a travessia do rio através de balsas que transportavam veículos e passageiros no primeiro convés. No outro lado do rio, aportavam na comunidade do Cacau Pirêra, onde os passageiros poderiam seguir viagem para os municípios de Iranduba, Manacapuru e Novo Airão. Com a construção da ponte, as balsas desta travessia deixaram de ser utilizadas para essa finalidade e o porto passou a atender outras funções. Após uma reforma, sua administração coube ao DNIT, passando, também, a sediar a SNPH, autarquia estadual que administrava parte da estrutura portuária do estado, e acabou tendo sua área de atuação redefinida pelo mesmo. A construção da ponte possibilitou que o porto pudesse ser utilizado pelos barcos que navegavam na Calha do Rio Negro. Sabe-se que a qualidade de navegação na Amazônia está relacionada com a estrutura portuária oferecida, no entanto, esses portos apresentam várias dificuldades e, em muitos casos, não atendem adequadamente à demanda regional.

Nessa pesquisa, priorizou-se compreender as estruturas portuárias onde ocorre a atuação somente de Expresso ou em conjunto com barcos mistos, que realizam viagens intermunicipais ou interestaduais, das localizadas em Manaus pode-se destacar a partir de Manaus a Balsa Laranja ou Terminal Ajato, a Balsa Verde, Balsa Amarela e Porto do São Raimundo.

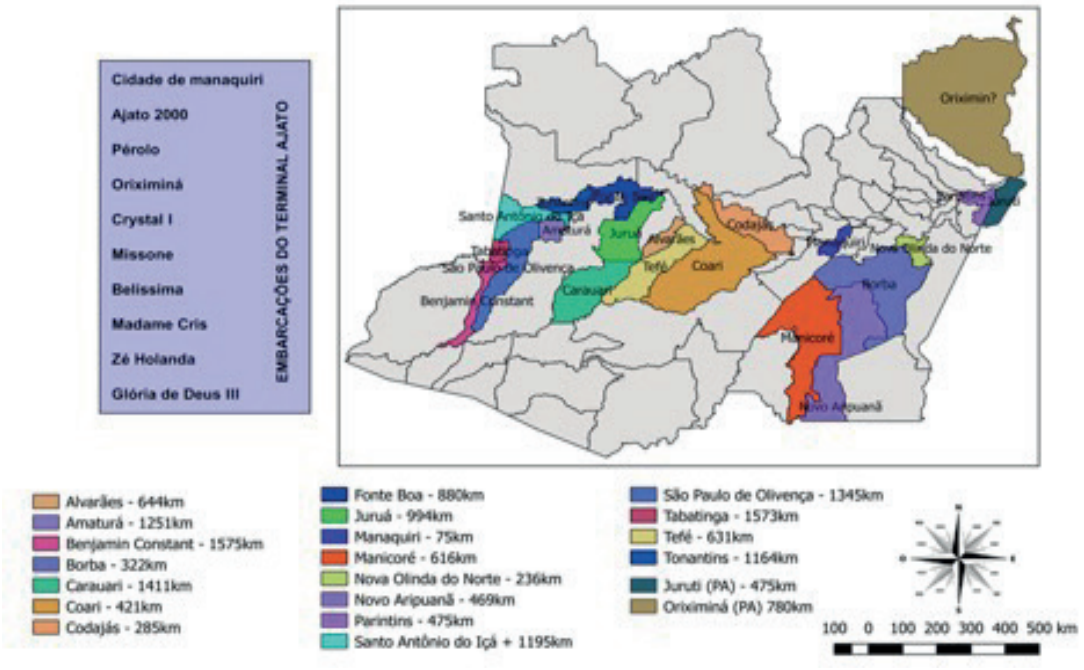
O Terminal Ajato ou Balsa Laranja: por decisão do seu proprietário, atracam apenas embarcações do segmento Expresso, sendo a única balsa em Manaus que atua no transporte exclusivo de passageiros para viagens intermunicipais e interestaduais. Sua estrutura é composta por um flutuante com cobertura de aproximadamente 41m de comprimento por 21m de largura.

As atividades nesse terminal foram iniciadas apenas com uma embarcação, o barco Ajato 2000. Seu proprietário, o Sr. Aguiar, foi o pioneiro no expresso e se mantém no negócio até hoje, sua família possui três barcos no segmento. Seu crescimento no ramo nos últimos anos influenciou diversos outros armadores a migrarem ou iniciarem atuação na atividade fluvial até o ano de 1999, quando era proprietário de um barco no segmento Expresso, o Ajato 2000; em 2001 foi lançado o Ajato 2001, sendo esses dois para linhas regulares. Após isso, diversas outras embarcações passaram a expandir suas atividades para diferentes rotas e trechos da Amazônia tendo os Expressos com parâmetro para executar suas viagens (DAVID, 2010).

O Terminal Ajato expandiu suas atividades para várias rotas, passando a agregar embarcações que exigiram elevados investimentos financeiros para os padrões regionais. As embarcações que atracam no terminal têm capacidade superior a 80 passageiros, e esses barcos exigem investimentos elevados que podem ultrapassar o valor de um milhão de reais, variando a partir da qualidade dos materiais utilizados no interior da lancha e, também, no acabamento.

Os barcos que atracam no terminal têm como destinos principais as cidades de Tabatinga, Parintins, Oriximiná e Manicoré. Além da redução do tempo de viagem para várias cidades que são cobertas pela atuação dos Expressos, há também partidas regulares e a rigorosa busca do cumprimento do preestabelecido. Ao observar o mapa da Figura 3, verifica-se o fluxo dessas embarcações para várias cidades da Amazônia.

Figura 3. Embarcações que partem para municípios do Amazonas a paitir do Terminal Ajato (Balsa Laranja).



Fonte: Pesquisa de Campo (2019). Elaboração: Robert David

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

De modo geral, dos terminais de Manaus, o Terminal Ajato recebeu os maiores investimentos em estrutura física ao longo dos anos. Nele a qualidade do embarque e desembarque ocorre de modo diferencial, pois o terminal foi projetado para receber exclusivamente Expresso.

A Balsa Verde é uma das três estruturas flutuantes da Manaus Moderna de onde partem Expresso, possui essa denominação devido a cor de sua pintura, que foi proposta pela Superintedência Nacional dos Portos e Hidrovias em 2014, autarquia responsável pela administração do porto, objetivando indentificar melhor as balsas localizadas na área da Manaus Moderna. Nela, existem dois módulos de estrutura flutuantes que funcionam acoplados, o primeiro módulo possui 35m x 8m, o segundo 30m x 8m, o terceiro 30m x 8m e o quarto módulo 25m x 8m, totalizando um comprimento total de 120m x 8m (SNPH, 2010). Além da presença dos Expressos, a partir dessa balsa ocorrem viagens de embarcações mistas que navegam para o interior do Amazonas, assim sua utilização no transporte misto, se restringe a viagens intermunicipais. A maior parte das embarcações que atracam na balsa, ainda possui o padrão de construção tradicional, utilizando a madeira como elemento essencial. A quantidade de embarcações que atracam nessas balsas varia conforme a dimensão das embarcações atracadas, uma vez que não existe padronização quanto ao dimensionamento das embarcações regionais, mas em média cabem no máximo 30 embarcações.

No que tange à utilização da Balsa Verde por Expressos. Excetuando-se a viagem realizada para o município de Beruri, no Rio Purus, a peculiaridade das viagens realizadas pelas embarcações que atracam nessa balsa são para cidades circunvizinhas a Manaus que possibilita um movimento de retorno diário a passageiros. Tais passageiros se deslocam na Região Metropolitana de Manaus, e os trajetos realizados a partir desta balsa atendem o município do Careiro da Várzea e outras comunidades próximas à capital. Essas localidades têm nos barcos Expressos a opção de interligação mais veloz com a capital.

Essa oferta de viagens favorece o fluxo mais rápido entre essas localidades e a capital, já que essas localidades são carentes de diversos serviços públicos e privados, tendo em Manaus o local para resoluções de questões de cunho pessoal e de trabalho. A relativa proximidade geográfica da capital, que acarreta menor consumo de combustíveis, que é um dos fatores que interfere decisivamente no preço competitive das passagens, com valores próximos aos praticados pelas embarcações tradicionais que realizam viagem para o mesmo destino. O constante fluxo e rotatividade de passageiros, são os principais fatores que colaboram para o crescimento e manutenção dos custos das embarcações do tipo Expresso que compõem a Balsa Verde, cuja rota se encontra na Figura 4.

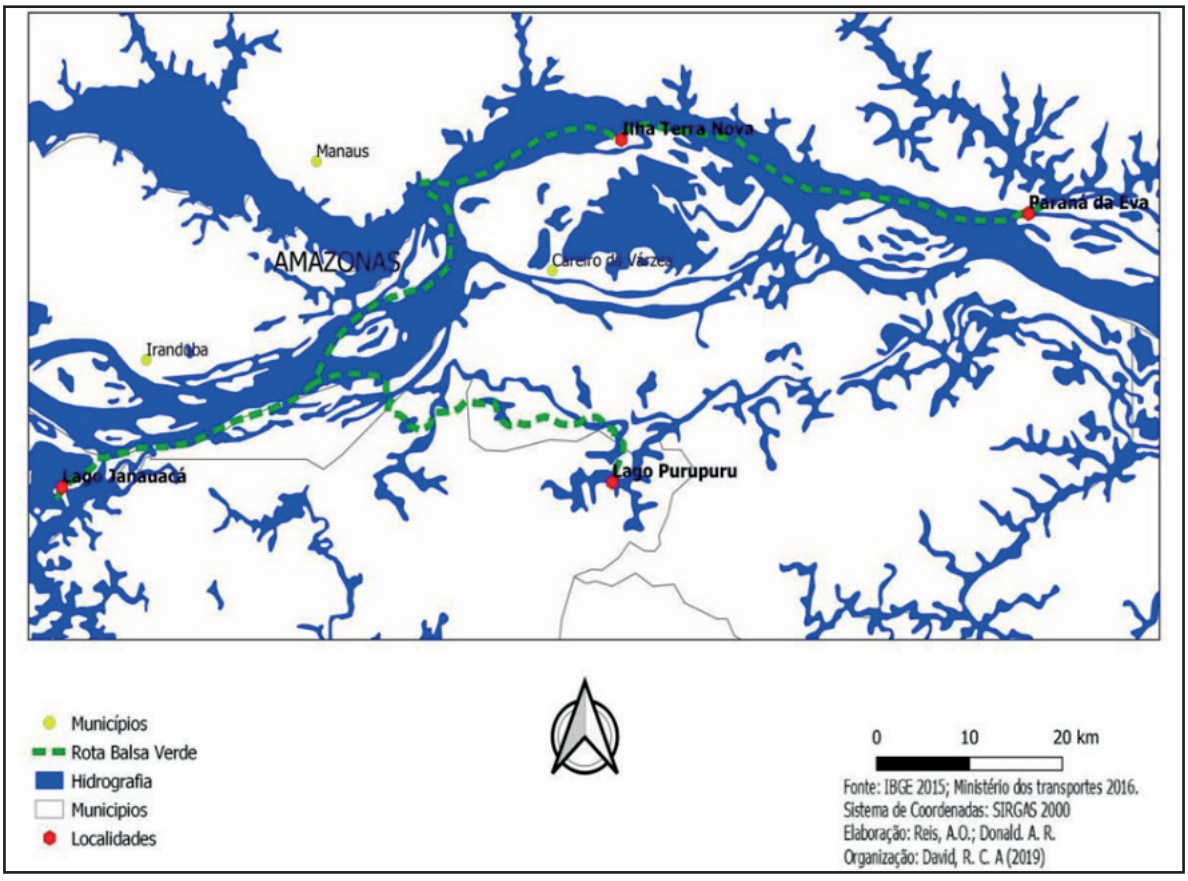
A Balsa Verde aumentou consideravelmente o número de embarcações do tipo Expresso. Em 2004 havia cinco barcos que atracavam nessa balsa. Essas embarcações

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

realizam viagens para Manaquiri, Careiro da Várzea e Comunidades como: Janauacá, Paroá e Purupuru. Em 2010, a partir das pesquisas realizadas na mesma balsa, na ocasião já denominada de Balsa Verde foram levantadas 17 embarcações realizando trajetos para os mesmos destinos (DAVID, 2010). A partir das pesquisas realizadas na Manaus Moderna entre 2017 e 2018, foram catalogadas 20 embarcações realizando trajetos para o município do Careiro da Várzea e localidades do município e Manaquiri.

Também, localizada na área da Manaus Moderna, a Balsa Amarela é de grande importância para a movimentação de Expressos para diversas cidades no Amazonas e vem apresentando a inserção embarcações ao longo dos anos (Figura 5). A Balsa Amarela apresenta as seguintes especificações técnicas: 90,0m de comprimento, 12,0m de largura 1,40m de altura. Algo que marca essa balsa é a diversidade de destinos das embarcações que atracam nela. Na Balsa Amarela encontramos embarcações que servem a diferentes destinos e calhas do estado como: Codajás, Coari e Parintins. Também favorece a interligação RMM, principalmente para a cidade de Manaquiri.

Figura 4. Rotas entre municípios da região metropolitana a partir da Balsa Verde.



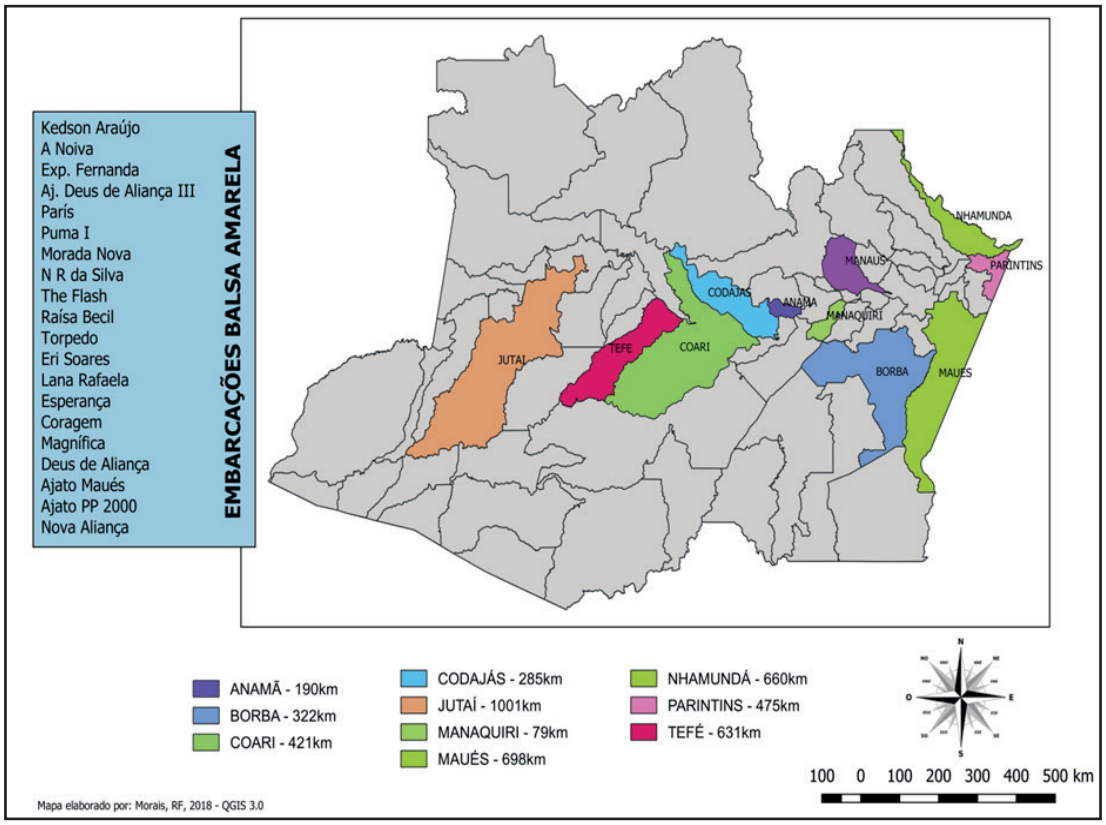
Fonte: Pesquisa de campo (2018).

Nem sempre todas as embarcações conseguem atracar, ocasionado uma espécie de competição entre os armadores. Alguns possuem, inclusive, lugares privilegiados por pagarem maiores valores. Destaca-se que, atualmente, na parte frontal da balsa predomina

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

a atracação de embarcação do tipo Expresso. Vale ressaltar que, além do embarque de passageiros e venda de passagens, as estruturas flutuantes são utilizadas para o transporte de diversas cargas, além de abrigar lanchonetes improvisadas de estruturas metálicas onde se vendem refeições e bebidas.

Figura 5. Destino de embarcações na Balsa Amarela.



Fonte: Pesquisa de campo (2018).

Nem sempre todas as embarcações conseguem atracar, ocasionado uma espécie de competição entre os armadores. Alguns possuem, inclusive, lugares privilegiados por pagarem maiores valores. Destaca-se que, atualmente, na parte frontal da balsa predomina a atracação de embarcação do tipo Expresso. Vale ressaltar que, além do embarque de passageiros e venda de passagens, as estruturas flutuantes são utilizadas para o transporte de diversas cargas, além de abrigar lanchonetes improvisadas de estruturas metálicas onde se vendem refeições e bebidas.

Na Balsa Amarela (Figura 6), há guichês especializados para venda de passagens para Expresso. Apesar da balsa não ser específica do segmento, o quantitativo de embarcações do tipo Expresso apresenta importante participação nos ganhos financeiros na balsa, que varia entre R$150,00 e R$ 300,00 por atracação diária, segundo os responsáveis.

A exemplo de outras balsas e do transporte misto, não há tabelamento de preço, a variação se dá pela dimensão da embarcação, embarcações que atracam rotineiramente podem

ter abatimentos nos valores. A frequência do pagamento também varia, algumas embarcações pagam não ato da atracação enquanto outros podem ser negociados semanalmente.

Figura 6. Barco Expresso atracado na Balsa denominada Amarela.



Fonte: Pesquisa de Campo (2018).

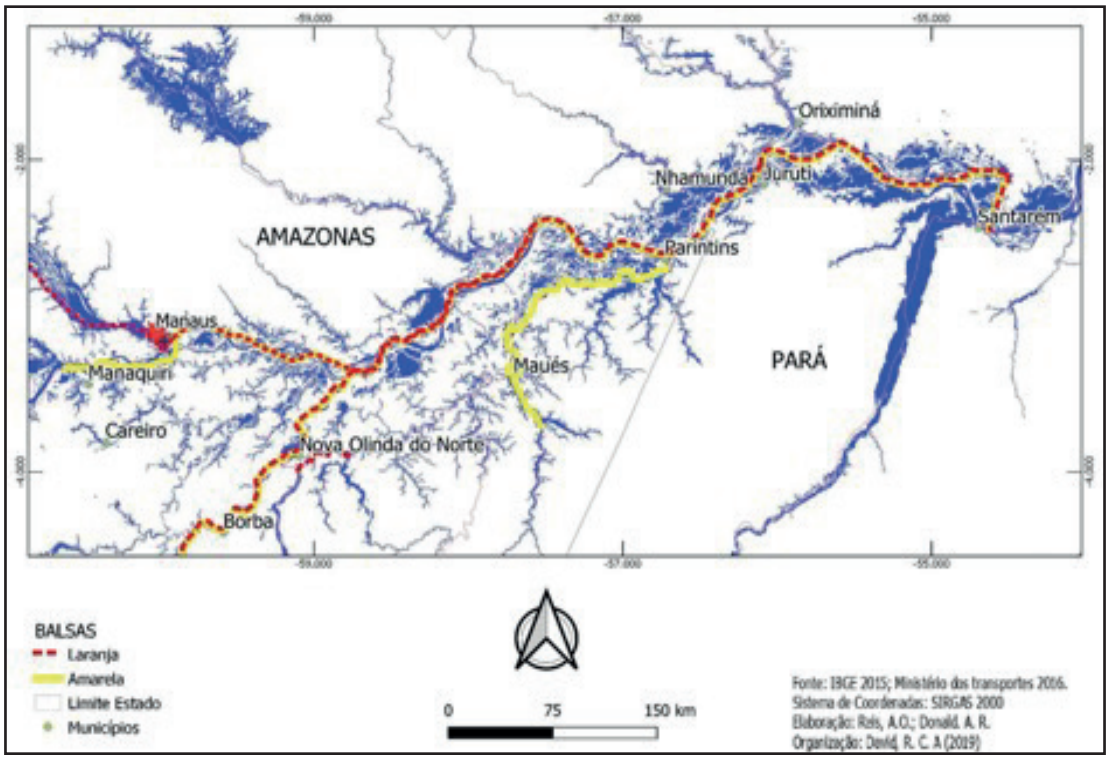
Os principais destinos finais das embarcações do tipo Expresso que atracam na balsa Amarela são as cidades de Manaquiri, Parintins e Coari. Além desses, que apresentam número maior de embarcações para o mesmo destino, são realizadas também viagens para as cidades de Jutaí e Borba, servindo como opção de acesso a calhas fora do movimentado eixo Solimões-Amazonas. Ver Figura 7.

Por conta do serviço ofertado pelas oito embarcações em direção a cidade de Manaus, há opções de horários a cada hora. Nessa rota, dentre os passageiros entrevistados 54% realizam viagem mais de uma vez na semana para capital, os motivos mais apontados nas entrevistas foram: resolução de problemas burocráticos, compras de produtos na capital, problemas de saúde e visita a parentes.

Expandindo suas atividades desde a sua implementação, a Balsa Amarela, também, recebe embarcações com maior capacidade de passageiros, principalmente, para a realização de viagens para as cidades de Coari e Parintins. Enquanto que, aquelas que realizam viagens para outros trechos, como é o caso de Coari e Janauacá, são menores e mais leves, apresentando capacidade média entre 40 e 60 passageiros.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 7. Rotas de embarcações Expresso – Calha Solimões.

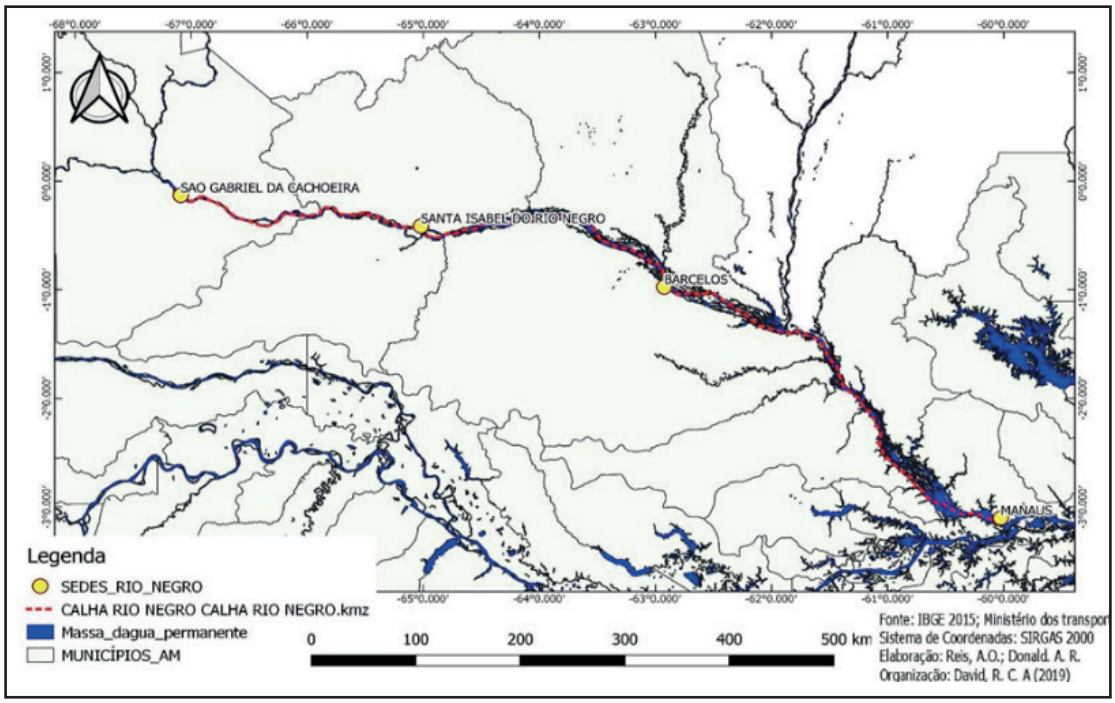


Fonte: Pesquisa de Campo (2019).

Além das balsas da Manaus Moderna, também, ocorre navegação por Expresso e transporte misto no Porto do São Raimundo para as cidades do Rio Negro. Nesse trecho tem-se quatro cidades, que apresentam menor quantitativo populacional, se comparada às calhas do Solimões e Amazonas. Além disso, Novo Airão, com 25718 habitantes, possui interligação a partir de estrada, que foi acentuada com a construção da Ponte do Rio Negro, havendo como próxima cidade localizada a margem do Rio Negro Barcelos, Santa Isabel do Rio Negro, com 18146 habitantes e, a mais populosa, São Gabriel da Cachoeira, com 37896 habitantes (IBGE, 2010). As viagens por Expresso no Rio Negro são constantes e apresentam o mesmo número de embarcações tradicionais que realizam o trecho.

Diferentemente da Manaus moderna onde as balsas são particulares, o Porto do São Raimundo é administrado pelo DNIT, que não realiza cobrança das embarcações para utilização das estruturas flutuantes, no caso duas, uma destinada aos barcos de transporte misto, e outra de onde parte o Expresso. Deste porto, navegam barcos para Novo Airão (no caso apenas de transporte misto), por não apresentar demanda suficiente para implementação do Expresso. Enquanto, Barcelos, Santa Isabel do Rio Negro e São Gabriel da Cachoeira, possuem Expresso como a mais importante opção de acesso, mesmo concorrendo em alguns trechos com o transporte aéreo (Figura 8). Dentre os barcos do segmento Expresso que trafegam em direção ao Rio Negro, pode-se destacar os seguintes: Lady Luiza, Gênesis, Deus de Aliança e Gustavo.

Figura 8. Estrutura flutuante para barcos Expresso com destino a calha do Rio Negro.



Fonte: Pesquisa de Campo (2018).

Uma prática comum nos barcos que realizam rota para o Rio Negro no Porto do São Raimundo é a atuação segmento Expresso e misto pelos mesmos proprietários. Alguns proprietários do trecho procurando diversificar sua atuação no segmento e evitar a competitividade de outras embarcações além daquelas que já têm a atuação nas balsas do terminal possuem Expresso e embarcações mistas. Essa prática se torna estratégica para inibir a concorrência e ampliar sua lucratividade, já que existe demanda para ambos os segmentos.

CONCLUSÃO

O transporte sempre se manifestou de grande importância para a manutenção de grupos sociais em determinados espaços e na relocação de pessoas em outros, visto que podem contribuir com o processo de abastecimento alimentício e na comercialização possibilitando fluidez e circulação entre regiões. Na contemporaneidade, os meios de transportes mais velozes possibilitam que os produtos chegam mais rápidos às residências e empresas. Para isso, há um imenso aparato logístico que atua de forma intermodal interligando diversos pontos (SANTOS, 1986).

Para viabilizar esse processo, houve transformações que ocasionaram maior entrada de produtos importados e acesso e tecnologias, como resultado ocorreu à expansão de diversos segmentos em toda Amazônia. Mesmo em diferentes graus, no interior e nas capitais houve a difusão de informações que alcançaram diversas áreas.

Para manter esse fluxo constante foi imperativo se investir em tecnologia visando que se mantenham os padrões de velocidade estabelecidos pelo mercado, e assim movimentar-se mais rapidamente no espaço, passando essa prática a fazer parte do cotidiano de diversas sociedades que outrora mantinham relações menos formalizadas. Nesse contexto, o transporte passa a exercer importante função no meio técnico-científico-informacional, possibilitando maior fluidez entre os mais longínquos pontos do espaço, levando e trazendo pessoas e mercadorias que se configuram como reprodutores de uma visão atrelada ao mercado, que por sua vez está em constante transformação buscando se adequar aos padrões reproduzidos no regional, gerando assim, formalização de relações e investimentos em propaganda e difusão de informações, utilizando-se dos meios disponíveis como aplicativos, redes sociais, comunicação visual e internet (SANTOS, 1999).

Em termos nacionais se intensificou a mobilidade entre as regiões, principalmente a partir das metrópoles que impulsionaram articulações entre cidades, buscando criar novos dinamismos, tendo no transporte importante ferramenta para esse processo. A Amazônia passa por mudanças no seu aspecto urbano. As capitais passam a agregar cada vez mais pessoas levando à macrocefalia urbana, e influenciando um redirecionamento do transporte regional para que se atendesse essa dinâmica, a partir reorganização dos fluxos (OLIVEIRA, 1997).

Cresceu bastante a articulação na rede fluvial regional nos últimos dez anos, de forma geral houve diversificação de segmentos buscando interligar as diversas cidades da região. Para que isso ocorresse houve melhorias no âmbito do transporte fluvial. Esses investimentos partiram dos armadores regionais que buscaram diversos meios para manter seu empreendimento e navegar com mais velocidade e qualidade, buscando se adequar a necessidade do mercado (DAVID 2019).

As balsas do Porto Manaus Moderna possuem especificidades no que se refere ao destino, frequência e infraestrutura. Essas estruturas flutuantes têm importante papel na distribuição de embarcações na rede fluvial do Amazonas. As balsas Verde e Amarela servem de porto para dezenas de embarcações do tipo Expresso e também do transporte misto, o que dificulta o embarque nesses portos, para amenizar a situação se fez necessário que houvesse reorganização dos locais de atracação pelos administradores das balsas objetivando facilitar a localização das embarcações do tipo Expresso, favorecendo o fluxo de passageiros. No entanto, o fato dos Expressos atracarem na parte inicial da balsa, não é uma questão de mobilidade, mas de marketing, pois os proprietários dos Expressos solicitam dos administradores das balsas que seus barcos tenham a maior visibilidade possível, alguns, exigem lugares cativos por conta do valor que pagam, tanto pela atracação do barco como também para manterem guichês específicos de venda de Expressos. Essa situação

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

não só modela a distribuição de barcos da balsa, mas também aponta para a evidência dos Expressos nas balsas que anteriormente eram utilizadas apenas no transporte misto.

Sendo a velocidade meio de diferenciação entre essas embarcações, o investimento na mesma é fator que pode definir a escolha entre Expressos que atuam na mesma rota. A velocidade é a primazia do Expresso, seu fator diferenciador no mercado regional. Transportar mais rápido representa estar na frente dos demais concorrentes, o aumento da velocidade demonstra que a embarcação está sempre se modernizando, interligar em menos, esse é o principal objetivo (NOGUEIRA, 1999).

Com a ampliação da demanda nos diversos municípios, muitos armadores que atuavam em rotas fluviais de transporte misto passaram a investir nos Expressos, alguns deles apresentam embarcações nos dois segmentos, transporte misto e transporte específico de passageiros, procurando, assim, obter as vantagens de cada um deles. Essa prática pode ser percebida em diversas rotas regionais. A navegação na Amazônia além de essencial a mobilidade pode ser também uma forma de rentabilidade, pois a interligação regional ocorre predominantemente por meio fluvial. Assim, o transporte de cargas e passageiros na região se condiciona como fundamental para o crescimento da mesma.

Os Expressos têm crescido para diversas rotas com diferentes níveis de investimento, atrelados a dinâmica da calha que fazem parte. As calhas Solimões-Amazonas apresentam a maior oferta de Expresso, no entanto outras rotas secundárias também têm apresentado crescimento, principalmente, a partir de Itacoatiara, Manacapuru, Tabatinga, Parintins e Tefé, interligando essas cidades a cidades vizinhas e comunidades próximas. Assim, há tendência de expansão do segmento, além disso, evidenciamos com a pesquisa vários barcos em construção para atuar em diferentes rotas, aumento a frota do segmento e intensificando a fluidez na rede fluvial da Amazônia.

REFERÊNCIAS

DAVID, R. C. A. **A dinâmica do transporte fluvial de passageiros no Estado do Amazonas**, 2010.

DAVID, R. C. A. **Esse rio é minha rua: perspectivas para o transporte fluvial de passageiros no Amazonas**, 2019.

FERREIRA, M. A. C. **Transporte fluvial por embarcações mistas no Amazonas: uma análise do trecho Manaus-Coari e Manaus-Parintins**, 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atualização do Censo Brasileiro de 2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

NOGUEIRA, R. **Amazonas, um Estado ribeirinho**. Manaus: EDUA,1999.

SANTOS, M. **A natureza do Espaço**. São Paulo: Hucitec, 1999.

SANTOS, M. **Espaço e Método**. São Paulo: Nobel,1986.

SINDARMA – SINDICATO DOS ARMADORES DO AMAZONAS**. Diagnóstico do transporte fluvial no Amazonas**. Manaus, 2014.

SNPH – SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DE NAVEGAÇÃO, PORTOS E HIDROVIAS**. Relatório técnico sobre portos e navegação na Amazônia**. Manaus, 2010.

18

Utilização do método híbrido ahp-topsis para a escolha modal do escoamento da produção de soja do polo Paragominas/PA

Rodrigo Nassar Cruz
Universidade Federal do Pará - UFPA

Marcus Vinícius Guerra Seráfico de Assis Carvalho
Universidade Federal do Pará - UFPA

doi 10.37885/220809785

RESUMO

A produção de soja do Polo Paragominas vem registrando ano após ano um crescimento considerável e seu escoamento se dá até o porto exportador pelo modal rodoviário. No entanto, há dois rios na região que em conjunto podem formar uma alternativa hidroviária. Portanto, este trabalho teve como objetivo identificar a melhor alternativa modal de transporte da produção de soja do Polo Paragominas utilizando como ferramenta de análise o método multicritério híbrido AHP-TOPSIS. Para este fim, foram identificados e caracterizados o polo produtor, as alternativas de rotas de escoamento e o seu destino portuário. Com estas informações, inicialmente validou-se e atribui-se pesos aos critérios de avaliação através de entrevistas feitas com os tomadores de decisão. Em seguida, os pesos destes critérios foram utilizados para realizar comparações das alternativas modais de transporte. Através da realização de duas análises, os resultados obtidos demonstraram na primeira um equilíbrio entre as alternativas estudadas, e na segunda a alternativa hidroviária obteve um melhor desempenho. Tais resultados levaram à conclusão de que o modal aquaviário se apresenta viável para o transporte da soja da região, e que o método híbrido AHP-TOPSIS é uma excelente ferramenta para subsidiar as tomadas de decisão no setor de logística do agronegócio.

Palavras-chave: AHP, Produção de Soja, TOPSIS, Logística de Transportes.

INTRODUÇÃO

Segundo Hirakuri (2013, p. 17), “No Brasil, a soja surge como a principal commodity agrícola, responsável pelo desenvolvimento econômico nacional e de diversas regiões produtoras [...]”. E de cordo com a APROSOJA Brasil (2019), “Nos últimos anos as exportações da soja tornou o país o maior exportador do grão e a soja o principal produto de toda a pauta de exportação brasileira, sendo a cada 100 dólares exportados, 14 são de soja.”

Mais especificamente sobre o Estado do Pará, a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas – FAPESPA informa que:

> Entre as Unidades Federativas (UF), o Pará possui a 11ª colocação tanto em área plantada quanto em quantidade produzida, o que lhe confere participação de 2% e 1%, respectivamente, da agricultura nacional, que encerrou 2016 com 472 milhões toneladas produzidas e 77 milhões de hectares de área plantada. Os percentuais de participação do estado equivalem a uma área plantada de 1.567.967h e a uma produção de 11.555.755t, sendo 68% do cultivo oriundo da lavoura Permanente e 32% da Temporária. Diante dessa configuração, ressalta-se que a produção agrícola estadual registrou redução de 1,54% em 2016, na comparação com 2015.
> Entre os cultivos, a mandioca continua sendo a cultura de maior produção, 36,89% do total agrícola produzido no estado, seguida pelo dendê (12,86%) e pela soja (11,29%). Essa última apresenta significativo destaque na expansão produtiva, uma vez que, em 2015, a participação era de 9,52% do total cultivado no Pará, ao passo que a mandioca manifestou comportamento contrário, visto que foi identificada parcela de 43,74% no mesmo ano. (FAPESPA, 2017, p. 36-37)

Quanto à produção de soja brasileira, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA afirma que:

> A produção dos EUA na safra 2018/2019 foi de 362,075 milhões de toneladas para uma área plantada de 125,691 milhões de hectares, obtendo uma produtividade em torno de 2.881 kg/há. Já o Brasil obteve uma produção de 114,843 milhões de toneladas para uma área plantada de 35,822 milhões de hectares, obtendo uma produtividade em torno de 3.206 kg/há. O maior produtor brasileiro de soja é o Estado do Mato Grosso, com uma produção de 32,455 milhões de toneladas para uma área plantada de 9,700 milhões de hectares, o que representa 28,26% da produção nacional. Em 2018, as exportações da soja chegaram à um total de 101,9 milhões de toneladas, se revertendo em U$ 40,9 bilhões. (EMBRAPA, 2018)

No entanto, considerando a competitividade internacional da soja brasileira, Lopes *et al* (2017) afirmam que:

> Em termos de custos de produção, o Brasil possui vantagens na produção de soja em relação aos seus competidores internacionais, sendo estas territorial, climática e tecnológica. No entanto, estas vantagens são reduzidas quando

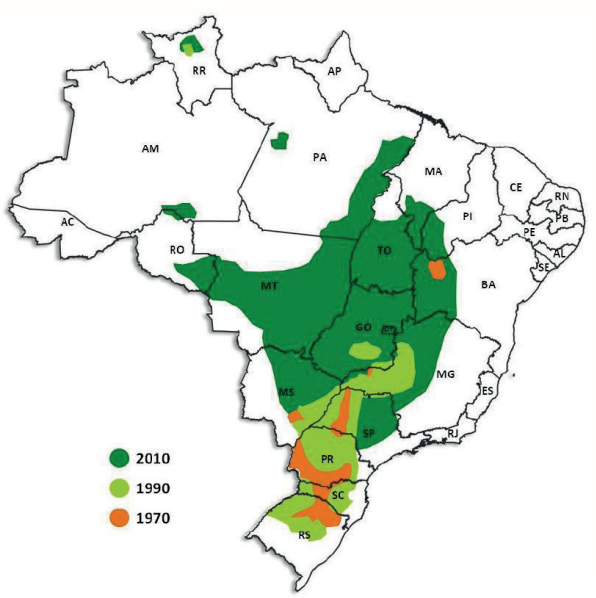
Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

> ocorre o escoamento da produção em um fluxo logístico ineficiente encontrado no Brasil. As ineficiências e insuficiências do transporte e armazenamento representam os principais problemas para o agronegócio, o que afeta significativamente a competitividade internacional da soja brasileira (LOPES et al, 2017, p. 66).

Segundo Hijjar (2004), as áreas de plantação de soja no Brasil estão localizadas principalmente nas Regiões Sul e Centro-Oeste. No entanto, as do Centro-Oeste são mais promissoras considerando a expansão de área plantada e aumento da produtividade por hectare. Esse crescimento demanda um aumento e melhoramento da infraestrutura logística brasileira, pois essas áreas estão no interior do país, distantes dos portos de exportação.

Isto pode de ser constatado através do mapa do avanço da área plantada no Brasil na Figura 1.

Figura 1. Avanço da área plantada no Brasil.



Fonte: CONAB (2016) apud MTPA (2017).

De acordo com a Federação da Agricultura e Pecuária do Pará – FAEPA, a produção paraense de soja compreende três grandes polos, sendo o do Nordeste de maior expressão, tendo o município de Paragominas como referência, seguido do Sul, tendo o município de Santana do Araguaia como referência, e, por fim, o do Oeste, tendo o município de Santarém como referência. Ainda segundo a FAEPA (2019), "[...] a soja, no Pará, vem apresentando ritmo significativo de crescimento, expandindo sua área cultivada, no período de 2010/2017, de 85,4 mil para 500,4 mil hectares, equivalente a 30% do total da área de lavouras [...]".

Retornando à questão da infraestrutura de transportes, "[...] atualmente o modal rodoviário representa 61,1% do total da matriz de transportes brasileira, o ferroviário 20,7%, o aquaviário 13,6%, o dutoviário 4,2% e o aeroviário apenas 0,4%" (CNT, 2018). Essa situação leva à perda de competitividade da produção nacional, já que os modais disponíveis

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

geram um alto custo operacional, assim tornando-se um obstáculo para o desenvolvimento regional e internacional do Brasil. (SOLIANI, 2015). “No entanto, 47% dos grãos (milho+soja) chegam aos portos por ferrovias, 42% por rodovias e 11% por hidrovias, sendo este o modal preferencial dos portos do Arco Norte, que vem aumentando ano a ano a sua participação” (EMBRAPA, 2016).

O país é dotado de vários corredores logísticos considerados estratégicos para a viabilização do transporte da produção nacional, incluindo entre os destaques a do agronegócio. No caso específico do Estado do Pará, os corredores logísticos presentes em seu território atendem principalmente ao escoamento produção de soja do Estado do Mato Grosso, a qual se utiliza da Rodovia BR-163 e dos Rios Tapajós e Amazonas. No entanto, a produção estadual também se vale dos corredores logísticos existentes para escoar a sua produção. O polo do Oeste é beneficiado diretamente pelo Rio Amazonas, o polo do sul é beneficiado pelo corredor rodoviário compostos pelas rodovias BR-158/BR-155/PA-150, e o polo do nordeste é beneficiado pelo corredor rodoviário compostos pelas rodovias BR-010/PA-252/Perna Sul/Alça Viária/PA-483. Os três polos têm a Zona Portuária de Vila do Conde como terminal para as viagens regionais de sua produção e transbordo para as viagens marítimas de longo curso.

Especificamente, a produção do Polo Paragominas é escoada principalmente pelo modal rodoviário, em caminhões bitrem com capacidade de carga de 57 toneladas, por uma extensão de um pouco mais de 280 km, até a zona portuária em Vila do Conde, no Município de Barcarena do Estado do Pará. Com esta predominância do transporte rodoviário, é comum haver conflitos que aumentam o tempo das viagens, como as passagens por trechos urbanos e travessia de rio por balsa. No entanto, diante da possibilidade de se viabilizar a Hidrovia Guamá-Capim, vislumbra-se o surgimento de uma alternativa intermodal entre o rodoviário e o aquaviário que possa se apresentar como uma melhor alternativa para o escoamento da produção de soja da região.

Portanto, considerando o cenário descrito acima, este estudo buscou identificar a melhor alternativa modal de transporte da produção de soja do Polo Paragominas utilizando como ferramenta de análise uma combinação híbrida do método multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP) com o método multiccritério Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Para se alcançar este objetivo, faz-se necessário identificar as características do transporte da soja do Polo Paragominas, identificar os critérios de análise que possam servir à tomada de decisão dos atores do agronegócio e logística que atuam no polo, e avaliar a utilidade do método AHP-TOPSIS como uma ferramenta de análise das alternativas de transporte em um dos corredores logísticos no Estado do Pará.

Portanto, este artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, nós revisamos principalmente os conhecimentos sobre o método AHP e o método TOPSIS, e a sua utilização híbrida. Na Seção 3, apresentamos a caracterização das vias que são ou podem ser utilizadas como rotas de escoamento da produção de soja do Polo Paragominas. Assim como, apresentamos as considerações feitas para a obtenção dos tempos e custos de viagens para cada uma das alternativas de transporte que atendem o polo. Na Seção 4, apresentamos os passos que foram realizados no desenvolvimento desta pesquisa, incluindo a descrição do procedimento de seleção dos critérios de análise e de sua validação, e o uso do método AHP-TOPSIS pautado por duas análises distintas considerando os pesos dos critérios que foram eleitos os mais importantes para a escolha modal do escoamento da produção de soja. Na Seção 5, apresentamos as principais conclusões deste estudo, considerando os métodos utilizados, bem como os fatores considerados na logística de escoamento da soja do Polo Paragominas.

OS MÉTODOS AHP E TOPSIS E SUA APLICAÇÃO HÍBRIDA

Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão

Diante das mais diversas alternativas de corredores e modais de transporte, cabe ao tomador de decisão analisar o ambiente político-geográfico em que se encontram a origem e o destino de sua viagem e as alternativas de transporte disponíveis para transportar a carga desejada. Para este fim, ferramentas de análise multicritério dos vários fatores que envolvem a atividade se apresentam muito úteis para a tomada de decisão.

Segundo Miranda (2008, p. 30), “Os métodos multicritérios conjugam aspectos objetivos (quantitativos) com subjetivos (qualidade), permitindo estruturar os problemas com um grande número de atributos (critérios de avaliação) que são organizados para apoiar a tomada de decisão.”

Para o estabelecimento de características básicas para uma análise multicritério, Lewe (2005, p. 244) propõe os seguintes elementos:

- Alternativas: representam as diferentes escolhas de ação disponíveis ao tomador de decisão. Geralmente, o conjunto de alternativas é assumido por ser finito, variando de unidades à centenas. Supõe-se que elas sejam selecionadas, priorizadas e eventualmente ranqueadas
- Atributos: os problemas de decisão multicritério são associados a múltiplos atributos. Os atributos representam as diferentes dimensões pelas quais as alternativas podem ser vistas. Os atributos também são referidos como “objetivos” ou “critérios”

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

- Unidades Incomensuráveis: diferentes atributos podem ser associados com diferentes unidades de medida. Por exemplo, no caso de comprar um carro usado, os atributos “custo” e “quilometragem” podem ser medidos em termos de valores monetários e milhares de quilômetros, respectivamente
- Medidas Híbridas: alguns atributos são avaliados de forma qualitativa (por exemplo: bom / razoável / ruim). Além disso, os problemas de decisão multicritério podem se apresentar com atributos qualitativos e quantitativos
- Matriz de Decisão: um problema de decisão multicritério pode ser facilmente expressado em um formato de matriz

Ainda segundo Lewe (2005), há muitas formas de se classificar os métodos de tomada de decisão multicritério, sendo alguns autores classificando-os de acordo com o tipo de dado, podendo ser determinístico, estocástico ou fuzzy. Estes métodos também podem ser utilizados de forma híbrida, combinando seus procedimentos analíticos de forma a melhor atender à demanda de tomada de decisão, como é o caso da utilização híbrida AHP-TOPSIS encontrada em produções acadêmicas aplicadas ao setor de transportes e trânsito, como no caso da tese do Miranda (2008, p. 68), onde ele utiliza essa ferramenta híbrida para analisar o escoamento de soja dos polos produtores do Estado do Mato Grosso:

> O procedimento a ser seguido na tese é o de aplicar ambos os métodos ao conjunto de notas de avaliação dadas pelos decisores, usando o AHP para ponderar os coeficientes alcançados no TOPSIS. Esse procedimento objetiva reduzir as diferenças mais expressivas que o TOPSIS não elimina, uma vez que as comparações para a par entre todos os critérios funciona como moderador, corrigindo inclusive, as ponderações feitas pelo conjunto dos decisores ou por um moderador. Nesta tese, a ponderação preliminar estabelecida para a aplicação do TOPSIS foi feita pelo pesquisador.
> [...]
> Por fim, o método facilita a introdução de pesos diferenciadores para cada critério considerado, como é o caso das vantagens competitivas que determinados corredores têm sobre os demais, pelo fato de utilizarem modalidades de transportes mais vantajosas. (MIRANDA, 2008, p.68)

Um outro caso é apresentado no artigo de Yu *et al.* (2013), onde os autores abordam que a avaliação de status de congestionamento de interseção de via urbana é na realidade um problema de decisão complexo e multiobjetivo. Assim, o estudo adotou a aplicação do AHP para estabelecer o sistema de indexação do congestionamento de tráfego de interseções de vias urbanas, então o status de tráfego das interseções foram avaliados e decididos pelo método TOPSIS.

Portanto, a adoção do método híbrido AHP-TOPSIS neste trabalho se justifica pela capacidade do AHP de fornecer um conjunto consistente de pesos para os critérios de análise

e pela capacidade do TOPSIS subsidiar a análise comparativa com a análise hierárquica, assim como permitindo no processo de análise o uso conjunto de dados quantitativos e avaliações qualitativas.

Método AHP

O AHP é um método desenvolvido por Thomas Saaty na década de 70 para auxiliar as pessoas na tomada de decisões complexas. Mais do que determinar qual a decisão correta, o AHP ajuda as pessoas a escolher e a justificar a sua escolha.

Segundo Saaty (1991), o fundamento do AHP é a decomposição e síntese das relações entre os critérios até que se chegue a uma priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho. Também no mesmo período, Saaty criou a escala que relaciona as opiniões aos números, o que facilita adaptação da manifestação qualitativa para uma medida quantitativa.

Quanto aos critérios e alternativas utilizados no método, Wolff (2008) explica que os critérios são definidos pelos tomadores de decisão, e são fatores que influenciam o objetivo geral, cada um com diferente relevância. Já as alternativas são as ações possíveis. Ou seja, ao término do processo decisório, o resultado será a priorização dessas alternativas para atingir o objetivo geral. Portanto, a alternativa apontada como a mais importante será a escolhida. No processo da metodologia AHP, um conjunto finito de alternativas é comparado em função de um conjunto finito de propriedades.

Em relação a estrutura hierárquica, Miranda (2008) afirma que:

> A existência de uma hierarquia de decisão é o ponto principal do método AHP. Normalmente, a hierarquia linear é a estrutura que melhor representa, em termos de simplicidade e funcionalidade, a dependência entre os níveis dos componentes de um sistema em relação a outro nível, de maneira seqüencial. É uma maneira conveniente de decompor em passos um problema complexo, na busca da explicação de causa e efeito, formando-se uma cadeia linear. (MIRANDA, 2008, p.44)

Para se fazer as comparações pelo método, Saaty (2008) explica que se precisa de uma escala de números que indique quantas vezes mais importante ou dominante um elemento é sobre um outro em relação ao critério ou à propriedade com respeito ao qual eles são comparados. Esta escala e suas descrições são apresentadas na Tabela 1.

Sendo assim, Wolff (2008) explica que a partir desse momento são feitas comparações paritárias entre os n elementos de um mesmo nível, tomando como critérios os elementos do nível imediatamente acima. Essas comparações permitem medir a contribuição de todos os critérios, inclusive dos critérios qualitativos. O decisor usa a sua experiência na área e sua intuição para comparar as alternativas.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Tabela 1. Escala Fundamental de Saaty.

Grau de Importância	Definição	Significado
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para os objetivos
3	Pequena importância de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem uma atividade levemente em relação à outra
5	Grande importância ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem uma atividade fortemente em ralação à outra
7	Forte importância	Uma atividade é fortemente favorecida em relação à outra e pode ser demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Saaty (2008).

De acordo com a estrutura hierárquica, o primeiro elemento considerado é o próprio Objetivo Geral, e ele funciona como critério de comparação para os elementos do nível seguinte, os n Critérios. Assim, o primeiro passo é comparar os n critérios entre si, dois a dois, em relação à contribuição de cada um para o objetivo geral. Fazer uma comparação, neste método, significa atribuir um valor da escala de 1 a 9 que represente o par em questão. O segundo passo seria descer um nível e se comparar analogamente cada alternativa com todas as outras, em relação à cada critério. No entanto, para este estudo, este passo não será realizado pois as alternativas são avaliadas através da aplicação do método TOPSIS. Por fim, cada comparação, com valores atribuídos a todos os pares, gera uma matriz de avaliação $n \times n$.

De acordo com Gomede e Barros, os pesos relativos a cada critério avaliado são obtidos normalizando-se a matriz comparativa construída nas etapas anteriores. A normalização é feita pela divisão entre cada valor da planilha com o total de cada coluna. A determinação da contribuição de cada critério no objetivo geral é calculada a partir do vetor de prioridade ou vetor de Eigen, o qual é obtido através da média aritmética dos valores de cada um dos critérios. O valor encontrado determina a participação daquele critério no resultado total do objetivo.

Por fim, verifica-se o índice de consistência do método, que tem como base o número principal de Eigen. Segundo Saaty (2005), ele é calculado através da somatória do produto de cada elemento do vetor de Eigen pelo total da respectiva coluna da matriz comparativa original, que é dado pela Equação (1).

$$CI = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (1)$$

CI = índice de consistência

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

n = quantidade de critérios avaliados.

Visando verificar se o valor encontrado do índice de consistência (CI) é adequado, Saaty (2005) ainda propôs o que foi chamado de taxa de consistência (CR), a qual é determinada pela razão entre o valor do índice de consistência (CI) e o índice de consistência aleatória (RI) dado pela Equação (2). A matriz será considerada consistente se a razão for menor que 10%.

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0{,}1 \sim 10\% \tag{2}$$

Método TOPSIS

O TOPSIS é uma ferramenta de análise de decisão comum para soluções finitas e modelagem multiobjetiva introduzida por Hwang and Yoon em 1981.

> Trata-se de um método multicritério no qual m alternativas são avaliadas segundo n atributos de avaliação de prioridades determinadas por um indicador derivado da combinação entre a aproximação à uma situação ideal (positiva) e ao distanciamento de uma situação não ideal (negativa). (Miranda, 2008, p. 33)

De acordo com Wang e Peng (2015), o método seleciona um grupo dos melhores indicadores e dados como a solução ideal positiva virtual e um grupo dos piores indicadores e dados como a solução ideal negativa virtual. Consequentemente, a comparação das soluções pode estabelecer a distância euclidiana entre os pontos ideais positivo e negativo. A distância euclidiana resultante então pode ser usada para avaliar se a solução é boa. A única condição necessária para o uso do método TOPSIS é que todas as funções de utilidade devam estar monotonicamente aumentando ou diminuindo.

Segundo Awasthi *et al.* (2011), a execução do método começa por se realizar a atribuição de avaliações aos critérios e alternativas no TOPSIS, assume-se que existam J possíveis candidatos chamados de $A=\{A_1,A_2,...,A_j\}$, os quais são avaliados contra n critérios, $C=\{C_1,C_2,...,C_i\}$. Os pesos dos critérios são denotados por w_i $(i=1,2...,m)$. As avaliações de performance de cada tomador de decisão D_k $(k=1,2,...,k)$ para cada alternativa A_j $(j=1,2,...,n)$ com respeito aos critérios C_i $(i=1,2,...,m)$ são denotados por $\tilde{R}_k = \tilde{x}_{ijk}$ $(i=1,2,...,m;\ j=1,2,...,n;\ k=1,2,...,k)$ com a função membro $\mu_{\tilde{R}k}(x)$.

Em seguida, computa-se as avaliações difusas agregadas aos critérios e alternativas através da Equação (3). Se as classificações difusas de todos os tomadores de decisão forem descritas como um número difuso triangular $\tilde{R}_k=(a_k,b_k,c_k), k=1,2,...,k$, então a classificação difusa agregada é dada por $\tilde{R}=(a,b,c), k=1,2,...,k$, onde:

$$a = mín_k\{a_k\}, \qquad b = \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{K} b_k, \qquad c = máx_k\{c_k\} \tag{3}$$

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Se a classificação difusa e o peso de importância do kº tomador de decisão forem $\tilde{x}_{ijk}$ $(a_{ijk},b_{ijk},c_{ijk})$ e $\tilde{w}_{ijk}$ $(w_{jk1},w_{jk2},w_{jk3})$, i=1,2,…,m, j=1,2,…,n respectivamente, então as classificações difusas agregadas ($\tilde{x}_{ij}$) das alternativas com respeito a cada critério são dadas na Equação (4), a seguir:

$$a_{ij} = mín_k\{a_{ijk}\}, \qquad b_{ij} = \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{K} b_{ijk}, \qquad c_{ij} = máx_k\{c_{ijk}\} \tag{4}$$

Os pesos difusos agregados ($\tilde{w}_{ij}$) de cada critério são calculados através da Equação (5) como $\tilde{w}_j=(w_{j1},w_{j2},w_{j3})$. No entanto, os pesos de cada critério a serem usados na aplicação do TOPSIS neste estudo são obtidos através do método AHP.

Por seguinte, faz-se necessária a composição da matriz de decisão do problema, portanto se estabelece a matriz com as alternativas e critérios montados conforme mostrada na Figura 2.

Figura 2. Matriz de decisão do problema.

$$\tilde{D} = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \end{array}, i = 1,2,\ldots,m;\ j = 1,2,\ldots,n$$

$$\tilde{W} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \ldots, \tilde{w}_n)$$

Fonte: Awasthi et al. (2011).

De acordo com Çalışkan *et al.* (2013), a partir da matriz de decisão do problema construída, o método TOPSIS é aplicado através de um conjunto de etapas, as quais são apresentadas a seguir:

- Etapa 1: A normalização da matriz de decisão é realizada usando a Equação (6).

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad j = 1,2,\ldots,n; \quad i = 1,2,\ldots,m \tag{6}$$

- Etapa 2: As colunas da matriz de decisão normalizada são multiplicadas pelos pesos associados (x_j), e a matriz de decisão normalizada e ponderada é obtida pela Equação (7).

$$V_{ij} = n_{ij}w_j \quad j = 1,2,\ldots,n; \quad i = 1,2,\ldots,m \tag{7}$$

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

- Etapa 3: As soluções ideal e ideal negativa são determinadas usando-se as Equações (8) e (9), respectivamente, onde K é o conjunto de índices dos critérios de benefício e K' é o conjunto de índices dos critérios de custo.

$$\{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} = \{(Máx_i V_{ij} | j \in K), (Mín_i V_{ij} | j \in K') | i = 1,2, \dots, m\} \quad (8)$$

$$\{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} = \{(Mín_i V_{ij} | j \in K), (Máx_i V_{ij} | j \in K') | i = 1,2, \dots, m\} \quad (9)$$

Etapa 4: As distâncias das soluções ideal e ideal negativa são medidas. As duas distâncias euclidianas para cada alternativa são computadas conforme dado nas Equações (10) e (11), respectivamente.

$$S_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^+)^2 \right\}^{0,5} \quad j = 1,2, \dots, n; \;\; i = 1,2, \dots, m \quad (10)$$

$$S_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^-)^2 \right\}^{0,5} \quad j = 1,2, \dots, n; \;\; i = 1,2, \dots, m \quad (11)$$

Etapa 5: A aproximação relativa à solução ideal é calculada conforme mostrado na Equação (12).

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad i = 1,2, \dots, m; \;\; 0 \leq C_i \leq 1 \quad (12)$$

Todas as alternativas são comparadas com a solução ideal positiva e com a solução ideal negativa. Se uma alternativa apresenta C_i=1, então ela mesma é a solução ideal, em contrapartida se C_i=0, essa alternativa é a solução ideal negativa. Quanto maior o valor da aproximação relativa C_i, mais próxima da solução ideal e mais afastada da solução ideal negativa está a fonte de dados V_i.

Média Aritmética dos Resultados e Outliers

Para se otimizar a análise dos dados a serem obtidos através da aplicação do método AHP-TOPSIS, considerando que as análises foram feitas individualmente por entrevistado, buscou-se neste trabalho encontrar a média aritmética entre os valores obtidos em uma primeira análise nas Soluções Ideais (TOPSIS) e em uma segunda análise nos Pesos dos

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Critérios (AHP). No entanto, para se obter uma média confiável, fez-se necessário checar se os resultados obtidos apresentam algum *outlier*.

Segundo Lima (2016), o termo outlier é uma palavra com origem na língua inglesa que é utilizada para identificar valores ou observações que são muito diferentes das demais. Em geral, quando se acha um outlier, há alguma explicação especial para esse ponto. Comumente, tal explicação pode ser identificada como defeito, erro de operação ou aumento na variabilidade do processo.

Para determinar se há outliers no conjunto dos resultados obtidos, utiliza-se o método da Amplitude Interquartil (IQR). A amplitude interquartil é a diferença entre o Quartil 1 ($Q1$) e o Quartil 3 ($Q3$) do conjunto de dados.30 Os quartis são valores que dividem um conjunto de elementos ordenados em quatro partes iguais, cada parte contendo 25% desses elementos, perfazendo então três quartis: Q1, Q2 e Q3.[31] Para calcular os quartis, utiliza-se o método de interpolação com base N-1. Neste estudo, o cálculo dos quartis foi feito através do programa computacional Excel, utilizando a função QUARTIL.EXC.

Em seguida, precisa-se determinar os limites inferior e superior para se definir se um ponto é ou não um outlier. Segundo Lima (2016), em função da média ($\tilde{x}$) do conjunto de dados os limites são encontrados aplicando as Equações 13 e 14 a seguir:

$$L_{sup} = \bar{x} + 1{,}5 \times IQR \qquad 13)$$

$$L_{inf} = \bar{x} - 1{,}5 \times IQR \qquad (14)$$

Portanto, com a aplicação do método da Amplitude Interquartil, obtêm-se resultados que permitem a construção de um gráfico que possibilita a identificação visual da presença ou não de outliers.

CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

Nesta sessão é feita uma caracterização sobre as vias que podem ser utilizadas como escoamento da produção de soja, a partir do Polo Paragominas. Além das distâncias e tempos de viagens até o porto exportador, são destacadas as condições operacionais das rodovias e hidrovias que servem como rotas para o escoamento da soja, destacando os principais gargalos destas vias à logística de exportação da referida comodity.

O ambiente em torno do Polo Paragominas foi identificado com base nos dados e informações que permitiram estruturar o conhecimento deste estudo, sendo essas informações de origem bibliográfica e documental, de estatística, planos, programas e projetos de entidades públicas e privadas e empresas que têm interface com a produção e o transporte no Pará, em todas as modalidades.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Localização Geográfica e Produção

De acordo com a Associação Brasileira dos Produtores de Soja do Pará – APROSOJA/PA (2017), o Estado do Pará possui 130 municípios produtores de grãos com aproximadamente 527 mil hectares de área plantada, divididos em polos, os quais são: Polo Sul do Pará, Polo Paragominas e o Polo Santarém.

O polo em foco neste estudo é o de Paragominas, cujos municípios integrantes são: Abel Figueiredo, Dom Eliseu, Ipixuna do Pará, Paragominas, Tailândia, Rondon do Pará e Ulianópolis.

Segundo a APROSOJA/PA (2017), em 2016 o polo possuía um total de 322 mil hectares de área plantada, o equivalente a 61,1% da área plantada no Estado do Pará. De acordo com os dados do IBGE (2018) a quantidade de soja produzida no ano de 2016 nos municípios do Polo Paragominas foi de 851.393 toneladas, tendo Paragominas, Dom Eliseu, Rondon do Pará e Ulianópolis como seus maiores produtores, com 98,65% da produção.

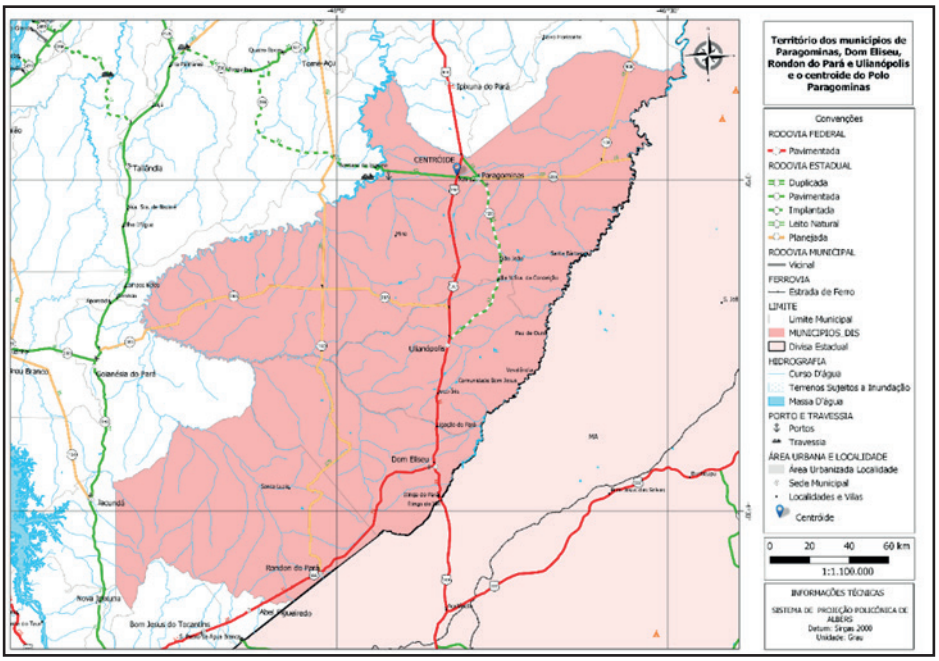
Com relação à produção agrícola municipal referente aos anos de 2017 e 2018, o IBGE disponibiliza somente dados regionais. No entanto, segundo informações coletadas com a APROSOJA/PA, a produção de soja no Polo Paragominas nos referidos anos foi de aproximadamente 780 mil e 910 mil toneladas respectivamente.

Portanto, considerando a concentração de produção do polo e as proximidades geográficas, este estudo se foca no escoamento da produção da soja dos municípios de Paragominas, Dom Eliseu, Rondon do Pará e Ulianópolis, os quais são ilustrados na Figura 3.

Também, adotou-se como ponto de origem referencial a interseção da rodovia BR-010 com a rodovia PA-256, no Município de Paragominas, pois a rodovia BR-010 é o principal corredor de transporte para o escoamento da produção do Polo Paragominas, e a partir desta interseção a alternativa hidroviária Guamá-Capim propicia uma rota diferente da que é adotada pelo modal rodoviário atualmente utilizada.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Figura 3. Territórios de Paragominas, Dom Eliseu, Rondon do Pará e Ulianópolis.



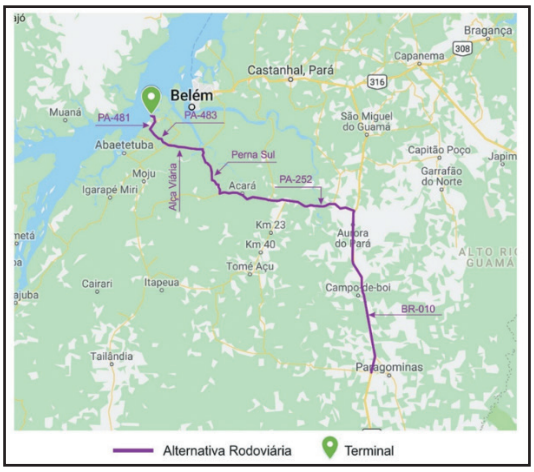
Fonte: Produzido pelo autor.

Alternativas de Rotas de Transporte

Para o escoamento da produção de soja do Polo Paragominas, o principal corredor logístico utilizado é o da BR-010, formando junto com as rodovias PA-252, Perna Sul, Alça Viária e PA-483 a rota de escoamento da produção tendo como destino a zona portuária de Vila do Conde, o qual é ilustrado na Figura 4. As rodovias utilizadas para o escoamento da soja foram levantadas através do programa de computador Google Earth e se obteve uma extensão total de 281,68 km. Quanto às velocidades, foram adotadas as médias relatadas pelos transportadores da região.

A rodovia BR-010, de gestão do Governo Federal, é uma pista simples, com duas faixas de tráfego em sentidos opostos. Possui uma largura rodável em torno de 7 metros e acostamentos de 3 metros em ambos os lados, perfazendo um total de 13 metros de pista pavimentada em Concreto Betuminoso Usinado a Quente – CBUQ em bom estado de conservação. Quanto às rodovias PA-252, Perna Sul, Alça Viária, PA-483 e PA-481, elas são de gestão do Governo do Estado do Pará, todas em pista simples, com duas faixas de tráfego em sentidos opostos. Possuem uma largura rodável em torno de 7 metros, porém somente a Alça Viária possui acostamentos de 3 metros em ambos os lados, perfazendo um total de 13 metros de pista pavimentada. Todas são pavimentadas em CBUQ, sendo a PA-252 em estado de conservação regular, a Perna Sul em estado ruim, a Alça Viária em estado bom e a PA-483 em estado regular.

Figura 4. Alternativa rodoviária.



Fonte: Adaptado do Google My Maps.

Com exceção da rodovia Alça Viária, as demais rodovias estaduais são antigas e não foram planejadas para receber o tráfego de veículos pesados como os do tipo bitrem. Como consequência, é frequente o surgimento de buracos e outros defeitos na pista de rolamento. Além disso, os trechos urbanos desta alternativa causam um retardo significativo nas viagens em função das velocidades regulamentadas para as vias de zonas urbanas, da influência do trânsito local, incluindo principalmente os pedestres, e da presença de uma grande quantidade de ondulações transversais (lombada física), assim causando a redução da velocidade. Em especial atenção para o caso do trecho que corta a cidade do Acará, que além de ser um trecho urbano, tem a travessia de balsa do Rio Acará que força um tempo de espera às viagens rodoviárias.

É importante registrar que, segundo relatado por um dos entrevistados deste estudo, os transportadores rodoviários da região não realizam o transporte durante a noite em função de insegurança, tanto na trafegabilidade das rodovias quanto no risco de assalto, limitando-se a rodar somente durante o dia. Portanto, para fins de cálculo do número de viagens necessárias para transportar a safra de soja da região, foi considerado somente o período de 06 a 18 horas do dia, perfazendo um total de 12 horas em que serão realizadas as viagens rodoviárias por dia.

Quanto à alternativa hidroviária, a presença na região do Rio Capim, que em conjunto com o Rio Guamá, possui o potencial de servir como alternativa à demanda de corredor de transporte para a produção de soja do polo. Esta rota é ilustrada na Figura 5.

Figura 5. Alternativa hidroviária.



Fonte: Adaptado do Google My Maps.

Tal como foi feito para as rodovias, as distâncias da alternativa hidroviária foram levantadas através do programa de computador Google Earth e se obteve uma extensão total de 461,21 km. Quanto à velocidade do comboio, adotou-se as velocidades de cruzeiro em águas paradas apresentadas no projeto da Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental – AHIMOR (2000). No que se refere às velocidades dos rios, adotou-se velocidades médias baseadas em dados contidos em cartas de correntes de maré do Centro de Hidrografia da Marinha – CHM (1962) e na velocidade de corrente contido no projeto da AHIMOR.

Quanto à viabilidade do modal hidroviário para o Polo Paragominas, a AHIMOR apresentou em 2000 um projeto para a hidrovia Guamá-Capim, que teve como objetivo definir, a nível executivo, as obras e serviços a serem realizados na hidrovia a fim de garantir a navegação de caráter comercial segura e contínua. Já em 2017, o DNIT (2018) autorizou o início do Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) da hidrovia Guamá-Capim no Pará, cujo objetivo é o de investigar as principais rotas de transporte possíveis e a conexão hidroviária com os demais rios navegáveis da região, bem como prospectar os projetos passíveis de carrear significativos volumes de cargas à hidrovia.

Portanto, para representar a alternativa hidroviária, será considerada ficticiamente implantada a Hidrovia Guamá-Capim, e assim considerados os dados e levantamentos apresentados pelo projeto básico da AHIMOR que prevê o melhoramento das condições de navegação da hidrovia, concentrando-se nas melhorias necessárias no Rio Capim. Os melhoramentos previstos no projetado preveem preservar o rio em corrente livre, limitando-se a dragagens dos passos arenosos que dificultam a navegação.

Quanto à alternativa ferroviária, o Governo do Estado do Pará possui o projeto de implantação de uma ferrovia estadual, o qual já possui um Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) e um Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). No entanto, encontra-se em fase de elaboração do processo licitatório, sem previsão de divulgação do

seu edital. O vencedor do certame deverá elaborar o projeto executivo da ferrovia, o que poderá resultar em mudanças no traçado inicialmente planejado. Portanto, optou-se em não adotar o modal ferroviário como alternativa neste estudo devido à indefinição de seu traçado e a falta de dados e informações de infraestrutura e logística que possibilitem uma comparação com as demais alternativas rodoviária e hidroviária.

Portanto, de posse dos dados levantados, é possível calcular o tempo de percurso para o deslocamento do veículo tipo em cada alternativa. No entanto, este trabalho se propôs a estudar o tempo total de percurso de ida e de volta à origem, com o objetivo de se estimar o tempo de percurso redondo e a frota de veículos tipo necessária para realizar o escoamento de toda a produção.

Para se chegar ao total de tempo gasto em todo o processo de escoamento da produção até o seu destino e retornar à origem, é preciso levar em consideração também os tempos gastos de carga e descarga (transbordo) e de espera.

Destinos Portuários de Exportação

No caso em estudo, o destino do escoamento da soja é a zona portuária de Vila do Conde, no município de Barcarena, Estado do Pará, onde existem três portos especializados em granéis agrícolas, os quais são: Terminal de Uso Privado (TUP) Vila do Conde, Terminal Portuário Fronteira Norte (TERFRON) e Terminal de Grãos Ponta da Montanha (TGPM). Todos são terminais de uso privado, administrados por algumas das principais companhias de comércio internacional do agronegócio global que atuam no Brasil, e servem de porto polarizador da produção de soja da região, através dos quais é feita a conexão com a navegação de longo curso, direcionada para o comércio exterior.

> O porto é o local para onde convergem as atenções dos embarcadores, agentes e operadores logísticos, e sua importância é tal que a produção dos centroides, bem como o perfil da frota, pode ser orientada em função das suas características e peculiaridades, seja em termos de infraestrutura ou da logística empregada. (Miranda, 2008, p. 86)

No que se refere às características operacionais dos terminais identificados, este estudo se dedica mais ao de transbordo da carga e o tempo demandado para a sua operação, já que todas as alternativas de rotas existentes, a partir do Polo Paragominas, têm como destino somente a zona portuária de Vila do Conde, o que não possibilitará uma análise comparativa com uma alternativa portuária polarizadora.

Tempo de Transbordo

Para se identificar o tempo gasto no transbordo da soja nos terminais de exportação, fez-se necessário considerar os equipamentos existentes e suas performances para este fim, como os tombadores para os veículos rodoviários e os descarregadores para os veículos hidroviários. Para fins deste estudo, as operações de cada terminal foram somadas para se obter e utilizar seus números totais. Na Tabela 2 são apresentadas informações da estrutura de transbordo de carga dos terminais citados, fornecidos pela Companhia de Docas do Pará – CDP (2015) e Hidrovias do Brasil (2018).

Para a alternativa rodoviária, há somente uma operação de descarga nos terminais de Vila do Conde. Já para a alternativa hidroviária, se prevê a operação de descarga e carga em uma Estação de Transbordo de Carga (ETC) na confluência da rodovia PA-256 com o Rio Capim, onde os veículos rodoviários farão a descarga da produção e posteriormente será feito a sua carga nas barcaças, e no final da viagem hidroviária se prevê uma operação de descarga nos terminais de Vila do Conde. Para a ETC, será adotada como referência a ETC Miriituba da Hidrovias do Brasil.

Tabela 2. Estrutura dos terminais de grãos da zona portuária de Vila do Conde.

Infraestrutura	TUP Vila do Conde	TERFRON	TGPM	Total
Tombadores de carreta (ton./h)	630	400	600	1.630
Armazém (capacidade estática em ton.)	120.000	75.000	10.300	205.300
Pier de atracação de navios	1	1	1	3
Ship loader (ton./h)	2.000	1.000	1.100	7.200
Descarregadores de barcaças (ton./h)	1.426	1.500	850	3.776

Fonte: Produzido pelo autor.

Portanto, considerando a produção de soja de 2018 no Polo de Paragominas de 910 mil toneladas, são apresentados na Tabela 3 os tempos estimados de carga e descarga necessários na ETC e nos Terminais de Vila do Conde, assim como o seu total se caracterizando como o tempo de transbordo da soja para fins deste estudo.

Tabela 3. Tempo de transbordo da soja em horas na estação e terminais.

Alternativas	Descarga ETC (h)	Carga ETC (h)	Descarga TERMINAIS (h)	Total (h)
Rodoviária	-	-	558	558
Hidroviária	722	506	206	1.434

Fonte: Produzido pelo autor.

Tempo de Percurso

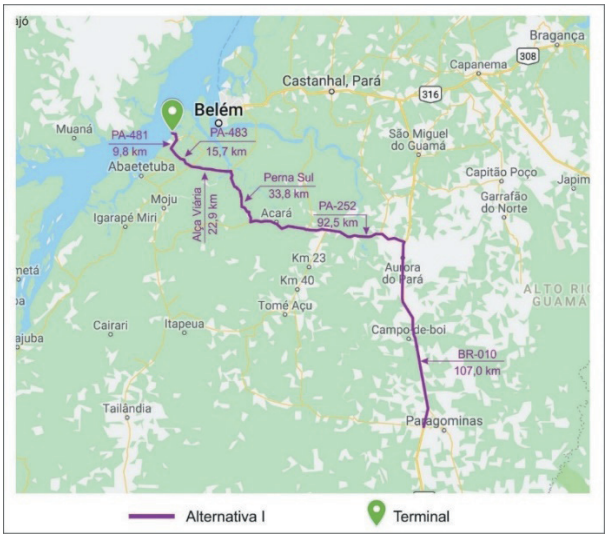
Para o levantamento do tempo de percurso das viagens, já foram identificadas anteriormente as distâncias e velocidades médias de deslocamento para cada alternativa. No entanto,

é importante levar em consideração os retardos que influenciam no aumento do tempo de percurso de cada alternativa. Com estes dados foi possível estimar o tempo de percurso, que neste trabalho será adotado como tempo de percurso redondo.

> Para se calcular o tempo de percurso redondo dos deslocamentos dos veículos tipo partindo de uma origem até um destino, e depois retornar à origem para realizar uma nova viagem, basicamente deve-se somar os tempos de deslocamento nas vias tanto de ida quanto de volta com os tempos dos processos de transbordo nos terminais. (Moraes, 2017)

Para este estudo foram levantados dados de três alternativas consideradas viáveis para a análise comparativa pelo método AHP-TOPSIS. A primeira, a Alternativa I, representa a alternativa rodoviária identificada neste estudo. Seu traçado é ilustrado na Figura 6.

Figura 6. Mapa ilustrativo da Alternativa I.



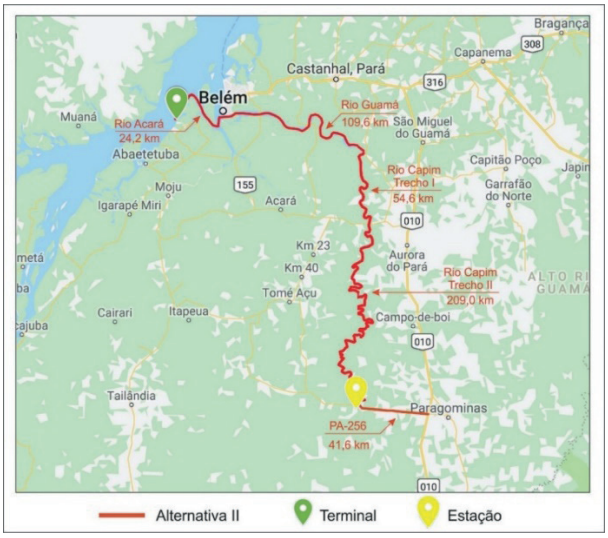
Fonte: Adaptado do Google My Maps.

Para o cálculo do tempo de percurso redondo da Alternativa I foram utilizados dados referentes ao tempo de deslocamento rodoviário e ao tempo de transbordo nos terminais. Foi adotado como veículo tipo o caminhão bitrem, veículo este comumente utilizado no transporte da soja na região. O bitrem possui a capacidade de carga de 57 toneladas.

A Alternativa II representa a primeira alternativa hidroviária identificada anteriormente. Nesta alternativa se prevê uma intermodalidade entre os modais rodoviário e hidroviário, compreendendo o transporte rodoviário a partir de Paragominas até a interseção do Rio Capim com a rodovia PA-256, onde haveria o transbordo da carga para o transporte hidroviário em um ETC, que seguiria a viagem até os terminais na Zona Portuária de Vila do Conde. Seu traçado é ilustrado na Figura 7.

Para o cálculo do tempo de percurso redondo da Alternativa II foram utilizados dados referentes aos tempos de deslocamento rodoviário e aquaviário da alternativa, e ao tempo de transbordo na estação e nos terminais.

Figura 7. Mapa ilustrativo da Alternativa II.



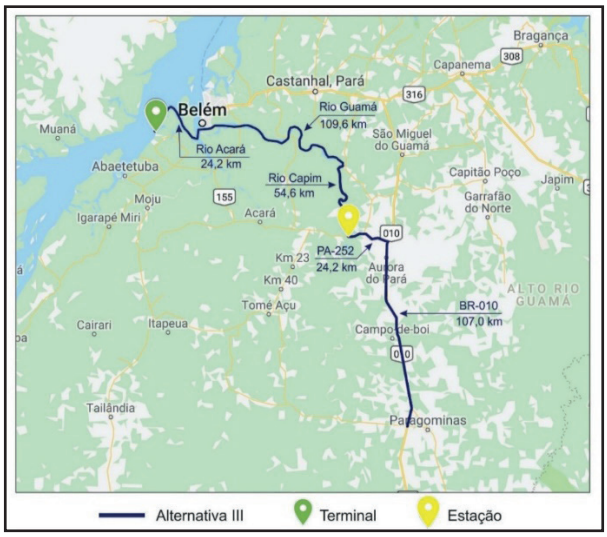
Fonte: Adaptado do Google My Maps.

Para vencer esta alternativa hidroviária, foi considerado para fins de cálculo um número de viagens e frota necessários para transportar o equivalente à capacidade de carga do comboio tipo recomendado pela AHIMOR para a navegação nos rios Capim e Guamá, que é um comboio de empurra com 4 barcaças, duas a duas, e um empurrador com potência de 1.250 HP, sendo cada comboio possuindo um comprimento de 126 m, boca de 22 m e um calado máximo de 1,50 m, para uma capacidade de carga de 2.800 toneladas. O projeto da AHIMOR teve como objetivo garantir a navegação de caráter comercial segura e contínua desta embarcação tipo em 90% do ano seco (período de recorrência de 10 anos), o que cobre o período de escoamento da safra do Polo Paragominas.

Por fim, a Alternativa III representa a segunda alternativa hidroviária identificada neste estudo. Nesta alternativa se prevê uma intermodalidade entre os modais rodoviário e hidroviário, compreendendo o transporte rodoviário a partir de Paragominas até a interseção do Rio Capim com a rodovia PA-252, onde haveria o transbordo da carga para o transporte hidroviário em um ETC, que seguiria a viagem até os terminais na Zona Portuária de Vila do Conde. Seu traçado é ilustrado na Figura 8.

Para o cálculo do tempo de percurso redondo da Alternativa III foram utilizados dados referentes aos tempos de deslocamento rodoviário e aquaviário da alternativa, e ao tempo de transbordo na estação e nos terminais. O comboio adotado também foi o mesmo para a Alternativa II.

Figura 8. Mapa ilustrativo da Alternativa III.



Fonte: Adaptado do Google My Maps.

Portanto, considerando a produção de soja de 2018 de 910 mil toneladas, considerando o período necessário para realizar o escoamento da safra de 184 dias, estimou-se para cada uma das alternativas a quantidade de viagens necessárias para transportar a safra, assim como a respectiva frota veículos-tipo. Os dados levantados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados do tempo de percurso das alternativas.

Alternativas	Tempo de Viagem Redonda (hs)	Nº Viagens		Frota Veículo Tipo (und.)	
		Bitrem	Comboio	Bitrem	Comboio
Alternativa I	17,71	15.965	-	87	-
Alternativa II	75,94	90	64	9	5
Alternativa III	46,01	87	113	29	3

Fonte: Produzido pelo autor.

Custo de Transporte

Custo do Frete

O custo do frete varia para cada modal, tendo como fatores determinantes as rotas praticadas, a infraestrutura disponível e o tipo de veículo utilizado. Segundo Hijjar (2008), “Além das comparações com dados reais de preço pago pelas empresas, são calculadas, de forma teórica, as tarifas referenciais de frete para cada perfil de transporte. O valor é baseado nos custos cobrados pelos transportadores para movimentar a carga.”

Para a definição do frete rodoviário, o Governo Federal instituiu em 2018 a Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas (ANTT, 2018), e desde então vem estabelecendo tabelas para aferição dos pisos mínimos referentes ao quilômetro rodado na realização de fretes, por eixo carregado.

Portanto, se utilizando das tabelas referentes aos pisos mínimos de frete e adotando as quantidades de viagens e suas respectivas frotas de veículos tipo estimadas na sessão anterior, obteve-se um valor total de custo de frete rodoviário para transportar a safra de soja registrada em 2018, para cada alternativa estudada.

Já para a definição do frete hidroviário, não há um plano federal estabelecendo tetos mínimos de frete de transporte de carga hidroviário. Portanto, os valores de frete são definidos pelas próprias transportadoras do setor. No entanto, para se obter uma estimativa de custo de frete hidroviário para este estudo, foi adotado uma metodologia de cálculo do custo da tonelada transportada apresentada por Moraes (2017) através da Equação 15.

$$Custo\ Tonelada\ Transportada = \frac{Somatória\ de\ todos\ os\ custos \times Frota}{Demanda} \quad (15)$$

Portanto, foram calculados os fretes rodoviários e hidroviários para cada alternativa, os quais são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Custos totais com frete.

Modal	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III
Frete Total Rodoviário	R$ 112.330.400,00	R$ 34.634.600,00	R$ 59.550.400,00
Frete Total Hidroviário	-	R$ 56.096.525,40	R$ 32.634.331,89
Total	R$ 112.330.400,00	R$ 90.731.125,40	R$ 92.184.731,89

Fonte: Produzido pelo autor.

Custo de Transbordo e Transferência Modal

Considerando que o escoamento da soja do Polo Paragominas tem como o mesmo destino a zona portuária de Vila do Conde, independente do modal a ser adotado, este estudo dará mais foco ao custo em torno do movimento de transbordo de grãos nos terminais intermodais, pois as alternativas em análise apresentam entre si diferenças na quantidade de movimentos de transbordo, o que afeta o custo portuário final de cada uma das alternativas.

Segundo Kussano e Batalha (2012), o custo de transbordo engloba a taxa de transbordo e a perda de mercadoria durante o processo. A taxa de transbordo é a cobrada pelos terminais e portos para transbordo do produto e é negociável e varia conforme o tipo de produto, quantidade, etc. Já o custo da perda de mercadoria na operação de transbordo obtém-se através da multiplicação da quantidade perdida (%) pelo valor da mercadoria.

Ainda segundo os autores, as estações e os terminais disponibilizam uma capacidade de armazenagem já embutido nas taxas de transbordo, pois, na maioria das vezes, a ligação entre um ponto de origem de carga e o terminal hidroviário ou ferroviário é feita por

caminhões, que transportam volumes menores. Desta forma, esta capacidade de armazenagem possui a função de acúmulo de carga para completar as cargas das barcaças e trens.

Com isso, foram adotadas como referência para este estudo as taxas de transbordo disponibilizadas pela Hidrovias do Brasil.48 Estes valores são estabelecidos por tonelada, que incluem uma capacidade de armazenagem de formação de carga e não incluem impostos.

Quanto à perda de mercadoria na operação de transbordo, de acordo com Kussano e Batalha (2012), ela gira em torno de 0,20% em volume. Portanto, considerando a produção de soja para 2018 de 910 mil toneladas, a perda aproximada de mercadoria na operação de transbordo é de 1.820 toneladas. Adotando-se o preço médio da soja em grãos (saca 60 kg) no Estado do Pará no mês de setembro de 2018, através de uma consulta feita na home page da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), temos então a estimativa de custo da perda. Os dados finais de custo levantados são, portanto, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Custos de transbordo por tonelada transportada para a safra de 2018.

Alternativa	Taxa de Transbordo	Perda no Transbordo	Custo Total de Transbordo	Custo de Transbordo da Safra
Alternativa I	R$ 45,00	R$ 2,66	R$ 47,66	R$ 43.370.600,00
Alternativa II	R$ 70,00	R$ 5,32	R$ 75,32	R$ 68.541.200,00
Alternativa III	R$ 70,00	R$ 5,32	R$ 75,32	R$ 68.541.200,00

Fonte: Produzido pelo autor.

Resumo dos Dados

Como resultado dos levantamentos e cálculos feitos nos tópicos anteriores obteve-se a Tabela 7, ondes são apresentados os valores quantitativos referentes à cada alternativa adotada neste estudo. Nota-se que um conjunto de critérios de avaliação foi formado para analisar as alternativas, o que também serviu para formar a matriz inicial para a análise do método multicritério híbrido AHP-TOPSIS.

Tabela 7. Quadro resumo dos dados levantados.

Alternativas	Critérios				
	Distância Percorrida (km)	Tempo de Viagem Redonda (horas)	Custo de Transporte (R$)	Custo de Transbordo e Transferência Modal (R$)	Capacidade de Carga do Veículo Tipo (ton.)
Alternativa I	563,36	17,71	112.330.400,00	43.370.600,00	57
Alternativa II	922,42	75,94	90.731.125,40	68.541.200,00	2.800
Alternativa III	676,22	46,01	92.184.731,89	68.541.200,00	2.800

Fonte: Produzido pelo autor.

APLICAÇÃO DO MÉTODO, ANÁLISES DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentada a aplicação método AHP-TOPSIS ao cenário do escoamento da produção de soja do Polo Paragominas e então apresentados as análises dos resultados obtidos. São destacados os fatores mais importantes para a escolha modal, do escoamento de soja do Polo Paragominas, segundo a visão dos atores envolvidos com o problema. Os resultados encontrados são confrontados com as atuais características logísticas de transporte da região.

Seleção e Validação dos Critérios

Seleção dos Critérios

Os critérios para a tomada de decisão identificados neste estudo tiveram como base a tese do Miranda (2008) e o artigo de Kussano e Batalha (2012). Ambos os estudos abordaram o cenário da logística de transportes da produção de soja do Estado do Matogrosso.

Em seu estudo, Miranda (2008) listou nove critérios considerados os mais importantes por seus entrevistados. Estes critérios podem basicamente se resumir à distância percorrida, tempo do percurso, características físicas do porto e custos logísticos. Além disso, todos os critérios são de natureza quantitativa, o que para fins deste estudo permite a sua quantificação e análise comparativa.

Já no estudo de Kussano e Batalha (2012), foram adotados critérios de análise onde aborda-se os custos logísticos agroindustriais sob a avaliação do escoamento da soja. Os autores adotaram as variáveis de Custos de Transporte, Custos de Armazenagem, Custos de Estoque, Custos de Transbordo, Custos Portuários e Custos Tributários. Algumas destas variáveis corroboram com os critérios adotados por Miranda em sua tese.

Portanto, para a análise das alternativas de escoamento da soja do Polo Paragominas são inicialmente adotados critérios que se baseiam nos estudos mencionados, os quais são identificados como: distância percorrida, tempo de viagem redonda, custo de transporte, custo de transbordo e transferência modal, e capacidade de carga do veículo tipo.

Os critérios relacionados com as características físicas do porto não foram adotados pois no caso da exportação da produção do Polo Paragominas todas as alternativas de rotas existentes no corredor de transporte têm como destino somente a zona portuária de Vila do Conde, o que não possibilitará uma análise comparativa com uma alternativa portuária.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Entrevistas

Segundo Miranda (2008, p. 102) de uma forma geral, “A função da análise multi-critério é revelar e ordenar alternativas geradas por interesses em conflito, apresentadas por vários setores com diferentes experiências, compreensão e percepção dos objetivos dos investimentos.”

Portanto, para dirimir esta questão, fez-se necessário introduzir um questionário/entrevista, o qual foi feito com tomadores de decisão que atuam na produção e transporte da produção de soja do Polo Paragominas, objetivando identificar o peso de importância dos critérios inicialmente adotados.

Nesse contexto identificou-se três tipos de atores no processo de tomada de decisão, os quais são:

- Produtores de soja da região;
- Transportadores autônomos e empresas de transporte;
- Operadores de terminais e operadores logísticos, envolvendo armazéns, estações fluviais e terminais marítimos.

Portanto, neste estudo se realizou entrevistas com pelo menos dois de cada ator envolvido no processo de tomada de decisão do caso em estudo, perfazendo um total de seis entrevistados.

Aplicação do Método AHP

Na aplicação das entrevistas, a participação dos entrevistados foi muito satisfatória, o que propiciou alcançar os objetivos de confirmar os critérios de análise adotados neste estudo e de obter os pesos destes critérios aplicando o método AHP, o qual foi feito através do programa computacional Excel.

Inicialmente, os entrevistados classificaram em nível de importância os critérios adotados, os quais são apresentados resumidamente a Tabela 8.

Tabela 8. Quadro resumo da classificação dos critérios em nível de importância.

Critérios	Entrevistados					
	A	B	C	D	E	F
Custo de transporte	1º	1º	2º	1º	1º	1º
Custo de transbordo e transferência modal	2º	2º	3º	2º	2º	2º
Distância percorrida	3º	5º	1º	4º	4º	5º
Tempo de viagem redonda	4º	4º	5º	3º	3ª	4º
Capacidade de carga do veículo tipo	5º	3º	4º	5º	5º	3º

Fonte: Produzido pelo autor.

Após estabelecer o nível de importância, os entrevistados avaliaram a relação entre os critérios através da aplicação do método AHP e todos obtiveram uma Taxa de Consistência de suas respectivas análises abaixo de 10,0%. Logo, todas as matrizes resultantes de cada um foram consideradas consistentes, assim os pesos relativos encontrados para cada critério por entrevistado foram considerados adequados para a análise, os quais são apresentados resumidamente na Tabela 9.

Conforme destacado de cinza na tabela, o critério Custo de Transporte foi apontado por cinco entre os seis entrevistados participantes como o critério com maior peso relativo do estudo. Mesmo com um dos entrevistados apontando o critério Distância Percorrida com o maior peso, o Custo de Transporte aparece como o critério com o segundo maior peso para este entrevistado. Portanto, conclui-se que o Custo de Transporte é o critério mais importante entre os entrevistados. Os dois outros critérios mais importantes para os tomadores de decisão foram o Custo de Transbordo e Transferência Modal e a Distância Percorrida. O critério que ficou com o menor conjunto de pesos na tomada de decisão foi a Capacidade de Carga do Veículo Tipo.

Tabela 9. Resumo dos pesos relativos dos critérios de análise.

Critério	Entrevistados					
	A	B	C	D	E	F
Custo de transporte	0,309	0,457	0,289	0,448	0,413	0,398
Custo de transbordo e transferência modal	0,284	0,170	0,187	0,201	0,413	0,256
Distância percorrida	0,212	0,059	0,384	0,110	0,057	0,185
Tempo de viagem redonda	0,130	0,092	0,070	0,203	0,074	0,114
Capacidade de carga do veículo tipo	0,065	0,222	0,070	0,038	0,043	0,047

Fonte: Produzido pelo autor.

Aplicação do Método TOPSIS

A aplicação do método TOPSIS, realizada através do uso do programa computacional Excel, teve início com a utilização da matriz de desempenho apresentada anteriormente na Tabela 7, a qual foi normalizada (Tabela 10), em base unitária, com os dados levantados de cada alternativa.

Depois de calculada a matriz normalizada, o próximo passo foi a obtenção da matriz ponderada, que funciona como parâmetro moderador e diminui as diferenças entre os dados levantados para cada alternativa. Para tanto, foram utilizados os pesos relativos obtidos na seção anterior, através das entrevistas e da aplicação do método AHP. Como resultado, foram construídas seis matrizes de ponderação, considerando cada conjunto de pesos obtidos nas entrevistas. Como exemplificação, a seguir apresentamos nas Tabelas 11, 12, 13

e 14 as etapas de aplicação do método (ponderação, soluções ideais positiva e negativa, e distâncias entre as alternativas e as soluções ideais) para a avaliação do Entrevistado A.

Tabela 10. Matriz normalizada no método TOPSIS.

Alternativas	Critérios				
	Custo de Transporte	Custo de Transbordo e Transferência Modal	Capacidade de Carga do Veículo Tipo	Tempo de Viagem Redonda	Distância Percorrida
Alternativa I	1,0000	0,6328	0,0204	0,2332	0,6107
Alternativa II	0,8077	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Alternativa III	0,8207	1,0000	1,0000	0,6059	0,7331

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 11. Pesos relativos e matriz ponderada do Entrevistado A.

	Critérios				
	Custo de Transporte	Custo de Transbordo e Transferência Modal	Capacidade de Carga do Veículo Tipo	Tempo de Viagem Redonda	Distância Percorrida
Pesos	0,309	0,284	0,065	0,130	0,212
Alternativas	Matriz Ponderada				
Alternativa I	0,3085	0,1794	0,0013	0,0304	0,1296
Alternativa II	0,2492	0,2835	0,0654	0,1305	0,2122
Alternativa III	0,2532	0,2835	0,0654	0,0790	0,1555

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 12. Soluções ideais positiva e negativa do Entrevistado A.

Soluções	Critérios				
	Custo de Transporte	Custo de Transbordo e Transferência Modal	Capacidade de Carga do Veículo Tipo	Tempo de Viagem Redonda	Distância Percorrida
Solução ideal positiva	0,2492	0,1794	0,0654	0,0304	0,1296
Solução ideal negativa	0,3085	0,2835	0,0013	0,1305	0,2122

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 13. Distâncias entre as alternativas e a solução ideal positiva do Entrevistado A.

Alternativas	Critérios					Σ
	Custo de Transporte	Custo de Transbordo e Transferência Modal	Capacidade Carga do Veículo Tipo	Tempo de Viagem Redonda	Distância Percorrida	
	Distância Ideal Positiva					
Alternativa I	0,0035	0,0000	0,0041	0,0000	0,0000	0,0873
Alternativa II	0,0000	0,0108	0,0000	0,0100	0,0068	0,1663
Alternativa III	0,0000	0,0108	0,0000	0,0024	0,0007	0,1179

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 14. Distâncias entre as alternativas e a solução ideal negativa do Entrevistado A.

Alternativas	Critérios					Σ
	Custo de Transporte	Custo de Transbordo e Transferência Modal	Capacidade Carga do Veículo Tipo	Tempo de Viagem Redonda	Distância Percorrida	
			Distância Ideal Negativa			
Alternativa I	0,0000	0,0108	0,0000	0,0100	0,0068	0,1663
Alternativa II	0,0035	0,0000	0,0041	0,0000	0,0000	0,0873
Alternativa III	0,0031	0,0000	0,0041	0,0026	0,0032	0,1141

Fonte: Produzido pelo autor.

O resultado, ou seja, a relação entre os resultados obtidos entre as distâncias ideais e as soluções ideais está mostrado nas Tabelas 15 e 16, classificado com base nos critérios de avaliação considerados, que expressa a avaliação das alternativas estudadas para cada um dos entrevistados.

Como resultado da aplicação do método TOPSIS, se chegou às soluções ideias para cada entrevistado. Entre os seis entrevistados, quatro tiveram a Alternativa I como sua solução ideal e somente dois tiveram a Alternativa III como sua solução ideal. A alternativa II foi a que obteve a pior avaliação, segundo quatro dos seis entrevistados.

No entanto, os valores de solução ideal obtidos para cada alternativa são diferentes para cada entrevistado. Portanto, cabe aplicar a média aritmética entre os resultados para se encontrar um resultado médio entre as soluções ideias.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Tabela 15. Solução ideal entre as Alternativas para os Entrevistados A, B, C e D.

Alternativas	S_i^+	S_i^-	C_i	Classificação
Entrevistado A				
Alternativa I	0,0873	0,1663	0,6559	1º
Alternativa II	0,1663	0,0873	0,3441	3º
Alternativa III	0,1179	0,1141	0,4918	2º
Entrevistado B				
Alternativa I	0,2346	0,0970	0,2925	3º
Alternativa II	0,0970	0,2346	0,7075	2º
Alternativa III	0,0718	0,2357	0,7665	1º
Entrevistado C				
Alternativa I	0,0881	0,1731	0,6627	1º
Alternativa II	0,1731	0,0881	0,3373	3º
Alternativa III	0,0872	0,1365	0,6101	2º
Entrevistado D				
Alternativa I	0,6547	0,6547	0,6547	1º
Alternativa II	0,3453	0,3453	0,3453	3º
Alternativa III	0,5350	0,5350	0,5350	2º
Entrevistado E				
Alternativa I	0,6450	0,6450	0,6450	1º
Alternativa II	0,3550	0,3550	0,3550	3º
Alternativa III	0,3717	0,3717	0,3717	2º
Entrevistado F				
Alternativa I	0,1967	0,1297	0,3973	3º
Alternativa II	0,1297	0,1967	0,6027	2º
Alternativa III	0,1035	0,2003	0,6594	1º

Fonte: Produzido pelo autor.

Média Aritmética das Soluções Ideais e Outliers

Para se otimizar a análise dos dados encontrados na aplicação do método TOPSIS, buscou-se encontrar a média aritmética entre os valores obtidos nas Soluções Ideais de cada entrevistado. No entanto, para se obter uma média confiável, fez-se necessário checar se o resultados obtidos apresentam algum outlier.

Portanto, com a aplicação do método da Amplitude Interquartil, obteve-se os seguintes resultados apresentados nas Tabelas 17, 18 e 19, e nas Figura 14, Figura 15 e Figura 16.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

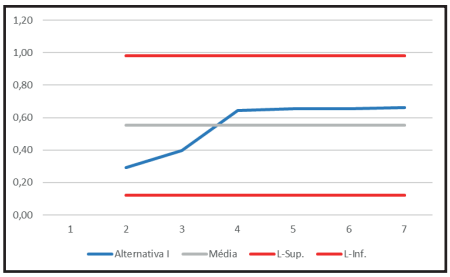
Tabela 17. Cálculo da IQR para a Alternativa I.

Alternativa I	
Soluções Ideais (TOPSIS)	Média = 0,5514
0,2925	$Q1$ = 0,3711
0,3973	$Q3$ = 0,6576
0,6450	IQR = 0,2865
0,6547	L_{sup} = 0,9811
0,6559	L_{inf} = 0,1216
0,6627	

Fonte: Produzido pelo

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 9. Identificação de Outliers na Alternativa I.



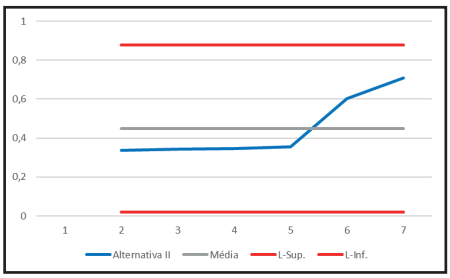
Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 18. Cálculo da IQR para a Alternativa II.

Alternativa II	
Soluções Ideais (TOPSIS)	Média = 0,4487
0,3373	$Q1$ = 0,3424
0,3441	$Q3$ = 0,6289
0,3453	IQR = 0,2865
0,3550	L_{sup} = 0,8784
0,6027	L_{inf} = 0,0189
0,7075	

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 10. Identificação de Outliers na Alternativa II.



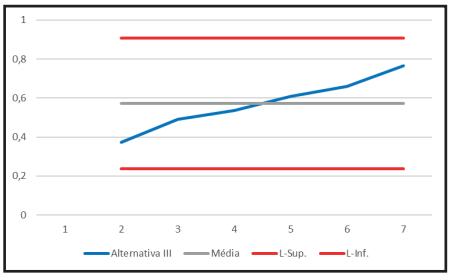
Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 19. Cálculo da IQR para a Alternativa III.

Alternativa III	
Soluções Ideais (TOPSIS)	Média = 0,5724
Média = 0,5724	
0,3717	$Q1$ = 0,4618
0,4918	$Q3$ = 0,6862
0,5350	IQR = 0,2244
0,6101	L_{sup} = 0,9090
0,6594	L_{inf} = 0,2358
0,7665	

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 11. Identificação de Outliers na Alternativa III.



Fonte: Produzido pelo autor.

Considerando que não foram identificados nenhum outlier, foi possível fazer a análise final das Soluções Ideais através de suas médias. Portanto, na Tabela 20 é apresentada a média geral das soluções ideais encontradas.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Tabela 20. Média das soluções ideias.

Alternativas	Entrevistados						Média
	A	B	C	D	E	F	
Alternativa I	0,6559	0,2925	0,6627	0,6547	0,6450	0,3973	0,5514
Alternativa II	0,3441	0,7075	0,3373	0,3453	0,3550	0,6027	0,4487
Alternativa III	0,4918	0,7665	0,6101	0,5350	0,3717	0,6594	0,5724

Fonte: Produzido pelo autor.

Como pode ser observado, a Alternativa III, uma alternativa intermodal rodo-hidroviária, foi a que obteve a melhor solução ideal. No entanto, a diferença para com as Alternativas I (exclusivamente rodoviária) e II (intermodal rodo-hidroviária) é bem pequena.

Também, como observado na metodologia de análise TOPSIS, quanto mais o resultado obtido for próximo de 1, ele mais se apresenta como a solução ideal, e mais afastada da solução ideal negativa. Logo, considerando que os resultados obtidos para todas as alternativas foram muito próximos entre si e concentrados em torno da metade de 1, mesmo havendo uma alternativa se apresentando como a solução ideal, essa ainda se encontra em equilíbrio de vantagens e desvantagens em relação às demais.

Tendo como referência a produção de soja obtida no Polo Paragominas para o ano de 2018, se for considerado somente os custos de transporte e de transbordo da tonelada transportada, a Alternativa I possui uma vantagem em relação às demais alternativas. Porém, esta vantagem não é grande. Mas quando são levadas em consideração os demais dados inerentes à logística, como a frota de veículos tipo a ser mantida e a quantidade de viagens redondas a serem realizadas, surge a vantagem das Alternativas II e III (Tabela 21).

Tabela 21. Dados logísticos das alternativas estudadas.

Alternativas	Custo de Transporte e Transbordo (R$/ton.)	Frota Veículo Tipo	Nº Viagens Redondas
Alternativa I	171,10	87 bitrens	15.965
Alternativa II	175,02	9 bitrens e 5 comboios	64
Alternativa III	176,62	29 bitrens e 3 comboios	113

Fonte: Produzido pelo autor.

Portanto, considerando os resultados obtidos através do método AHP-TOPSIS, o modal hidroviário, complementado pelo rodoviário, se apresenta como uma alternativa viável ao transporte da soja do Polo Paragominas.

CONCLUSÕES

Com o uso do método multicritério híbrido AHP-TOPSIS, foi possível se chegar à resultados que possibilitaram a análise das alternativas de modais de transporte disponíveis para o escoamento da produção de soja do Polo Paragominas.

Na análise feita, aplicando-se o método ao conjunto de pesos de critérios apontados por cada entrevistado e ao final obtendo-se um valor médio das soluções ideais entre eles, chegou-se ao resultado de que a Alternativa III, uma alternativa intermodal entre os modais rodoviário e aquaviário, possui a melhor solução ideal de 0,5724. Ou seja, é a melhor alternativa para o transporte da soja do Polo Paragominas. No entanto, o valor de 0,5514 obtido para a Alternativa I, então com a segunda melhor solução ideal, e de modal unicamente rodoviário, demonstra que a diferença em relação a Alternativa III é muito pequena.

Esta pequena diferença se explica em função da distância percorrida identificada para o modal rodoviário de 563,36 km. Esta distância inclui a ida e a volta do veículo tipo, ou seja, a distância entre a origem e o destino é de 281,68 km. O modal rodoviário vem a ser mais adequado para o transporte de cargas em distâncias consideradas curtas, ou seja, para trajetos de até 300 km. Todavia, no estudo de caso em questão, a Alternativa I apresenta uma quantidade significativa de interferências nas viagens que causam um aumento considerável no tempo de viagem, como a passagem por trechos urbanos em velocidades médias de 40 km/h e a travessia de balsa no Rio Capim que pode chegar até à uma duração de espera de oito horas, o que faz diminuir a vantagem da sua curta distância.

A aplicação do método de identificação de outliers nos valores das soluções ideais obtidas trouxe mais confiabilidade aos valores médios obtidos para as soluções ideais de cada alternativa, pois nenhum outlier foi identificado no processo desta primeira análise.

Uma importante observação a ser feita é que na análise realizada os critérios de custo tiveram uma influência determinante nos resultados obtidos das soluções ideias. Principalmente o critério Custo de Transporte, pois este foi apontado como o critério de maior peso por cinco dos seis entrevistados, com um percentual de influência variando de 28,9% a 45,7%, seguido pelo Custo de Transbordo e Transferência Modal (17,0% a 41,3%), Distância Percorrida (5,7% a 38,4%), Tempo de Viagem Redonda (7,0% a 20,3%) e Capacidade de Carga do Veículo Tipo (3,8% a 22,2%). Logo, conclui-se que o critério do custo de transporte é um fator determinante para a tomada de decisão dos atores do Polo Paragominas.

Considerando somente os dados levantados para o critério custo de transporte, a distância aferida para Alternativa I, mesmo sendo economicamente mais vantajosa para o modal rodoviário, não foi o suficiente para superar a competitividade dos custos de transporte das Alternativas II e III, respectivamente 19,2% e 17,9% mais baratos, alternativas estas onde ocorre a intermodalidade com o modal aquaviário. No entanto, essa competitividade se reduz quando se passa a considerar os demais dados dos critérios adotados para a análise, principalmente os dados do custo de transbordo, assim gerando o equilíbrio entre as soluções ideias encontradas no método TOPSIS.

Terra do Mar Doce: contribuições da academia para a navegação na Amazônia - ISBN 978-65-5360-261-8 - Vol. 2 - Ano 2023 - Editora Científica Digital - www.editoracientifica.com.br

Portanto, a aplicação do método multicritério híbrido AHP-TOPSIS neste estudo foi satisfatório, se mostrando muito útil para realizar análises de alternativas de transporte em um corredor logístico, e assim servindo como uma ferramenta para a tomada de decisão. A obtenção dos pesos dos critérios através da avaliação dos atores tomadores de decisão atuantes no cenário do estudo de caso, e com estes pesos realizar a análise com dados quantitativos reais foi fundamental para alcançar esta satisfação. Desta forma, os dados levantados e resultados obtidos foram também satisfatórios para subsidiar a tomada de decisão sobre qual alternativa a ser usada para o escoamento da soja da região. Portanto, estas satisfações com o método possibilitam vislumbres de sua aplicação em outros casos de escoamento de produção agrícola ou mineral do Estado e os corredores logísticos por eles utilizados.

Porém, considerando a matriz de transportes brasileira, o modal aquaviário ainda é pouco explorado, e a utilização das hidrovias fica ainda menor quando se trata do transporte de grãos. No entanto, a Região Norte tem grande potencial para aumentar a participação do modal aquaviário através da viabilização de hidrovias e da navegação de interior, tal como vimos neste estudo sobre a hidrovia Guamá-Capim. Para este fim, planos de transporte e investimentos na infraestrutura dos rios se fazem necessários.

REFERÊNCIAS

HIRAKURI, Marcelo Hiroshi. **Avaliação econômica da produção de soja para a safra 2013/14**. Embrapa Soja. Londrina, 2013.

APROSOJA Brasil – Associação Brasileira dos Produtores de Soja. **A Soja: Economia**. Disponível em: < https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/economia/>. Acesso em: julho 2019.

FAPESPA – Fundação Amazônia de Amparo e Estudos e Pesquisas. **Boletim Agropecuário do Estado do Pará 2017**. Belém, 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1>. Acesso: julho 2019.

Lopes, Harlenn dos Santos; Lima, Renato da Silva; LEAL, Fabiano; Nelson, Aline de Carvalho. **Scenario analysis of Brazilian soybean exports via discrete event simulation applied to soybean transportation: The case of Mato Grosso State**. Research in Transportation Business & Management, Volume 25, December 2017, Pages 66-75.

HIJJAR, M. F. **Logística, soja e comércio internacional**. ILOS – Especialistas em Logística e Suplly Chain, 2004. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/logistica-soja-e-comercio-internacional/>. Acesso em: fevereiro 2019.

MTPA – Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Corredores Logísticos Estratégicos: Complexo de Soja e Milho**. 2 v.: gráfs., Il. Brasília, 2017.

CNT – Confederação Nacional do Transportes. **Anuário CNT do Transporte 2018: Estatísticas Consolidadas**. Disponível em: <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/Inicial> Acesso em: maio 2019.

SOLIANI, Rodrigo Duarte. **An overview of agribusiness logistics in Brazil**. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, pages 410-422. Setembro 2015.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Caminhos da safra da produção e exportação de grãos 2015/16**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/macrologistica/caminhos-da-safra>. Acesso: maio 2019.

Gomes, Luiz Flavio Autran Monteiro; Araya, Marcela Cecilia González; Carignano, Claudia. **Tomada de decisões em cenários complexos: Introdução aos Métodos Discretos do Apoio Multicritério à Decisão**. Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2004.

MIRANDA, Luiz Miguel. de. **Contribuição a um Modelo de Análise Multicritério para Apoio à Decisão da Escolha do Corredor de Transporte para Escoamento da Produção de Granéis Agrícolas de Mato Grosso**. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2008.

LEWE, Jung-Ho. **An Integrated Decision-Making Framework for Transportation Architectures: Application to Aviation Systems Design**. School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology. Abril 2005.

YU, Jingfei; WANG, Li; GONG, Xiuling. **Study on the Status Evaluation of Urban Road Intersections Traffic Congestion Base on AHP-TOPSIS Modal**. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 96, p. 609-616. November 2013.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. N. York, USA: McGraw-Hill, 1991.

WOLFF, Cristina Santos. **O método AHP – revisão conceitual e proposta de simplificação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

SAATY, T. L. **Decision making with the analytic hierarchy process**. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, 2008.

SAATY, T. L. **Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks**. RWS Publications. Pittsburgh, 2005.

WANG, Xiaohui; PENG, Bo. **Determining the value of the port transport waters: Based on improved TOPSIS model by multiple regression weighting**. Ocean & Coastal Management. Volume 107, Pages 37-45. April 2015.

AWASTHI, Anjali; CHAUHAN, Satyaveer S.; OMRANI, Hichem. **Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems**. Expert Systems with Applications. Volume 38, Issue 10, Pages 12270-12280. September 2011.

ÇALIŞKAN, Halil; KURŞUNCU, Bilal; KURBANOĞLU, Cahit; GÜVEN, Şevki Yılmaz. **Material selection for the tool holder working under hard milling conditions using different multi criteria decision making methods**. Materials and Design. Volume 45, Pages 473-479. March 2013.

LIMA, Rafael. **Identificação de Outliers em Conjuntos de Dados**. Aprendendo Gestão. Disponível em: <http://aprendendogestao.com.br/identificacao-de-outliers/>. Agosto 2016.

APROSOJA/PA – Associação Brasileira dos Produtores de Soja do Pará. **Dados Regionais**. Paragominas, 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal: Produto das lavouras temporárias e permanentes - Soja (em grão)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/>. Acesso em: agosto 2018.

AHIMOR – Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental. **Projeto executivo de dragagem e balizamento dos rios Capim e Guamá, no Estado do Pará. Relatório final**. Companhia Docas do Pará. Internave Engenharia, contrato nº 98/006/00. São Paulo, julho de 2000.

CHM – Centro de Hidrografia da Marinha. **Cartas de Correntes de Maré**. 1962.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT dá ordem de serviço para estudo de viabilidade da hidrovia Guamá-Capim/PA**. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/noticias/dnit-da-ordem-de-servico-para-o-estudos-de-viabilidade-da-hidrovia-guama-capim-em-belem-no-para>. Acesso: novembro 2018.

CDP – Companhia de Docas do Pará. **Plano de Desenvolvimento e Zoneamento Portuário 2015: Porto Organizado de Vila do Conde/PA**. Belém, 2015.

HIDROVIAS DO BRASIL. **Operação Norte: Estação de Transbordo de Carga (ETC) Mirituba e Terminal de Uso Privado (TUP) Vila do Conde**. Disponível em: <http://hbsa.com.br/projetos-logisticos>. Acesso em: agosto 2018.

MORAES, Hito Braga de. **Notas de Aula da Disciplina Transporte Aquaviário**. Belém, 2017.

HIJJAR, Maria Fernanda. **Preços de Frete Rodoviário no Brasil**. Especialistas em Logística e Supply Chain. 2008. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/web/artigos-precos-de-frete-rodoviario-no-brasil/>. Acesso em: abril 2019.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres, **Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas (2018)**. <http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos_old/Tabelas_de_Precos_Minimos_do_Transporte_Rodoviario_de_Cargas> Acesso em: abril 2019.

KUSSANO, M. R.; BATALHA, M. O. **Custos logísticos agroindustriais: avaliação do escoamento da soja em grão do Mato Grosso para o mercado externo**. Revista Gestão & Produção. São Carlos, v. 19, n. 3, p. 619-632, 2012.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Maisa Sales Gama Tobias

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade da Amazônia (1988) e em Licenciatura Plena Matemática pela Universidade Federal do Pará (1988), Especialista em Gerenciamento do Transporte Fluvial pela Universidade Federal do Pará (1992), Mestre em Engenharia Civil, com ênfase em Geotecnia e Transportes pela Universidade Federal da Paraíba (1990), Doutora em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo (2000), com ênfase em Planejamento e Operações de Transportes. Pós-Doutora em Planejamento Territorial e Urbano, em 2010, pela Universidade do Minho. Pós-doutora em Engenharia Industrial e Sistemas pela Universidade do Minho, em 2020. Atualmente é professora Titular da Universidade Federal do Pará na Graduação em Engenharia Civil e na Pós-Graduação em Engenharia Naval. Coordena projetos de pesquisa nas linhas de Logística de Transportes, Transporte Urbano e de Acessibilidade e em Economia de Transportes. Como Engenheira Civil e de Transportes, atuou na cidade de Belém do Pará-Brasil como Diretora Superintendente da Superintendência Executiva de Mobilidade Urbana de Belém. Tem experiência em ensino, extensão e pesquisa, além de consultoria na área de Engenharia de Transportes, com ênfase em Planejamento e Organização do Sistema de Transporte, principalmente, nos seguintes temas: transporte urbano coletivo, fluvial, transporte não motorizado, engenharia de tráfego, estudos de demanda de transporte, planejamento de transporte e acessibilidade e mobilidade urbana, além de logística de transporte de carga e de passageiros.

Lattes: http://lattes.cnpq.br/9635266655242384

Pedro Igor Dias Lameira

Graduado em Engenharia Naval pela UFPA - Universidade Federal do Pará (2011 - graduado em primeiro lugar do referido ano), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (2015) e doutorado em Engenharia Naval e Oceânica pela USP - Universidade de São Paulo (2019). Atualmente é Vice-Diretor da FENAV - Faculdade de Engenharia Naval da UFPA - Universidade Federal do Pará e Professor Adjunto da Faculdade de Engenharia Naval da UFPA e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, responsável pelo desenvolvimento das áreas relacionadas a Tecnologia de Construção Naval, Projeto de navios e sistemas oceânicos, Gerência de Produção, Métodos Multicritério e Análise Econômica. Orienta alunos de graduação e pós-graduação. Possui experiência em: Construção de Embarcações, Reparo de Embarcações, PPCP e assuntos correlatos. Projetos de Navios e sistemas oceânicos. Realiza pesquisa e elabora estudos de análises de riscos para terminais portuários e estaleiros de construção naval. Desenvolve projetos de Construção Naval e Engenharia portuária, com principal área de atuação em tecnologia de construção naval, gerência de produção e processos de fabricação. Também realiza estudos logísticos, de viabilidade e de produtividade naval. Membro associado pleno da SOBENA (Sociedade Brasileira de Engenharia Naval). Coordenador do LABCONAV (Laboratório de Construção Naval da FENAV) e é Líder do GTNAV (Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Construção Naval). Participou do projeto e da construção de embarcações e sistemas flutuantes fluviais e oceânicos no Brasil e na Europa, no estaleiro Holandês Concordia Damen Shipyards. Pesquisador, participando de grandes projetos com agências de fomento e empresas, incluindo a FADESP, Companhia Docas do Pará, ANTAQ, DNIT e FINEP. Prestou consultorias e participou de convênios P&D com várias empresas e entidades do setor naval e portuário. Colabora periodicamente com o desenvolvimento científico nacional por meio de publicações em periódicos, congressos e capítulos de livros técnicos.

Lattes: http://lattes.cnpq.br/5391645898597252

ÍNDICE REMISSIVO

A

AHP: 188, 322, 325, 326, 327, 328, 331, 332, 333, 340, 344, 345, 346, 347, 352, 354, 355

Amazônia: 16, 24, 26, 32, 39, 41, 42, 43, 64, 65, 66, 67, 68, 78, 79, 99, 135, 137, 140, 200, 201, 202, 242, 292, 304, 305, 308, 310, 311, 317, 318, 319, 320, 323, 337, 354, 356

Análise Paramétrica: 98

Arco Norte: 14, 15, 16, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 40, 41, 42, 43, 44, 139, 173, 175, 200, 284, 325

Arquitetura Naval: 220

B

Barcaça Regional: 102

C

Capacidade de Carga: 240, 346, 347

Carga: 133, 251, 279, 280, 283, 293, 297, 299, 339, 344, 347, 348, 349, 353, 356

Cenários: 249, 250

Colisão: 46, 48, 291, 299

Comboio Fluvial: 14

Conflitos de Usos Múltiplos da Água: 240

Corredores: 33, 43, 264, 267, 268, 354

Cost Analysis: 84

D

Defensas Flutuantes: 46

Dissipação de Energia: 46

E

Ecodesign: 135

Elevação d'Água: 152

Embarcação: 117, 132, 133

Estruturas Flutuantes: 63, 64

Exportação de Soja: 172

Expressos: 303, 304, 305, 306, 308, 311, 312, 313, 318, 319

F

Força de Impacto: 46, 59

G

Geração de Energia: 240, 245, 251, 252, 253, 255

H

HEC-RAS: 200, 202, 209, 210, 217

Hidrovias Interiores: 46

L

Laminação Manual: 117, 121, 129, 130

Linear Programming: 84, 89, 90

Logística: 42, 95, 176, 179, 189, 270, 284, 285, 286, 287, 354, 356

M

Manaus: 29, 69, 81, 135, 231, 269, 271, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 312, 313, 315, 316, 318, 319, 320

Maxsurf: 98, 101, 103, 104, 105, 113

Modelagem Hidrodinâmica: 200

Modelo Digital de Elevação: 200, 201, 202, 206, 208

Motores Auxiliares: 14

N

Navegação: 20, 231, 240, 246, 250, 251, 292

O

Operações ao Largo: 279

Otimização: 32, 44, 172, 242, 247, 259

P

Port Logistics: 84

Porto de Santana: 25, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 38, 39, 40, 41, 42

Portos: 29, 34, 41, 43, 279, 292, 309, 312, 354

Programação Linear: 172

S

SED: 192, 195, 196

Segurança Operacional: 279

Soja: 26, 32, 41, 42, 43, 44, 95, 172, 189, 197, 334, 354, 355, 356

T

Tapajós: 86, 87, 88, 137, 138, 139, 140, 141, 148, 149, 239, 240, 242, 248, 249, 251, 284, 325

TOPSIS: 188, 322, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 340, 344, 345, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 354, 355

Transbordo: 178, 279, 280, 283, 292, 301, 339, 343, 344, 345, 347, 348, 349, 352, 353, 356

Transhipment: 279, 282, 301

Transporte Fluvial: 303

Transporte Intermodal: 172

Transportes: 24, 43, 70, 174, 176, 178, 218, 263, 264, 267, 354, 355, 356

U

Usos Múltiplos da Água: 240

V

Velocidade: 17, 303

Viabilidade: 26, 337

científica digital

ISBN 978-655360261-8

VENDA PROIBIDA - ACESSO LIVRE - OPEN ACCESS

www.editoracientifica.com.br | contato@editoracientifica.com.br