



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

ROBERT WILLIAN QUEIROZ FARIAS

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO NA
PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO AMAPÁ (AMAZÔNIA
ORIENTAL - BRASIL)**

BELÉM - PA
2023

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO NA
PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO AMAPÁ (AMAZÔNIA
ORIENTAL - BRASIL)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval, na área de Transporte Aquaviário.

ORIENTADOR:
Prof. Dr. Maâmar El – Robrini

ROBERT WILLIAN QUEIROZ FARIAS

BELÉM - PA
2023

ROBERT WILLIAN QUEIROZ FARIAS

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO NA
PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO AMAPÁ (AMAZÔNIA
ORIENTAL - BRASIL)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval, na área de Transporte Aquaviário.

DATA DA AVALIAÇÃO: 30 / 06 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Maâmar El-Robrini - Orientador
Doutor em Geologia Marinha
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Hito Braga de Moraes – Membro Interno
Doutor em Engenharia Oceânica
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Mounsif Said – Membro Interno
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Pará

Profª Dra. Maria de Lourdes Souza Santos - Membro Externo
Doutora em Oceanografia
Universidade Federal Rural da Amazônia

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos
pelo(a) autor(a)**

F224m Farias, Robert Willian Queiroz.
Modelagem Hidrodinâmica do Potencial Energético
na Plataforma Continental Interna do Amapá (Amazônia
Oriental - Brasil) / Robert Willian Queiroz Farias. — 2023.
127 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Maâmar El - Robrini
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do
Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Naval, Belém, 2023.

1. PCIA. 2. Canal do Varador. 3. Simulações
hidrodinâmicas. 4. SisBaHia. 5. Potencial energético.
I. Título.

CDD 386.309811

A Deus que sempre me proporcionou viver o que parecia impossível. À minha tia amada, Rosana Farias, que me apoiou e cuidou de mim nos momentos que mais precisei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me proporcionou resiliência e sabedoria para trilhar meu caminho da melhor maneira possível. Foi quem esteve comigo nos momentos mais felizes e intensos, assim como nos mais difíceis, onde pude encontrar consolo e força. Sou grato por me capacitar em cada fase de minha vida e fazer de mim quem sou hoje.

Agradeço à minha família, em especial minha tia Rosana Farias, meus irmãos Guilherme e Roberta, por todo o amor, apoio emocional, ensinamentos e sacrifícios que possibilitaram chegar até aqui e aos meus avós Antônio e Maria da Paixão por seus ensinamentos e investimento em minha educação.

Ao meu orientador Maâmar El-Robrini pela paciente orientação, e por toda ajuda e conhecimento repassado.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Instituto de Tecnologia (ITEC), à Faculdade de Engenharia Naval (FENAV) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval (PPGENAV) pela oportunidade de desenvolvimento da minha formação profissional e acadêmica. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento de recurso para que pudesse dar continuidade ao mestrado e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia Fluvial e Oceânica (INEOF) pelo apoio financeiro fornecido durante este curso de pós-graduação.

À toda equipe de professores que compõe o PPGENAV, por todo o conhecimento transferido, em especial ao Professor Dr. Marcos Rocha (in memoriam).

Aos amigos que fiz durante o curso de Mestrado, em especial meu amigo Guiler, por sua parceria e exemplo de persistência.

Ao Professor Dr. Paulo Rosman (COPPE/UFRJ) por seus direcionamentos no estudo e seus orientandos, sem os quais não seria possível a elaboração deste estudo.

“Como é feliz o homem que acha a sabedoria, o homem que obtém o entendimento”.

PROVÉBIOS 3:13 (BÍBLIA, 2017).

RESUMO

O presente estudo centrou-se na análise e dinâmica das correntes de maré visando à geração de energia natural em estuários, com base em um estudo de caso realizado em uma região costeira com influência significativa das marés. Portanto, a investigação hidrodinâmica desempenha um papel crucial na previsão e produção de energia a partir do fluxo natural das correntes. Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo foi a geração de cenários hidrodinâmicos na Plataforma Continental Interna do Amapá (PCIA) com base na criação de padrões de correntes ao longo de um ciclo lunar (sizígia e quadratura) que inclui $\frac{1}{2}$ maré vazante, $\frac{1}{2}$ maré enchente, o estofo de preamar e de baixamar. A metodologia empregada consistiu nas seguintes etapas: realização de uma revisão bibliográfica abrangente, determinação das características geomorfológicas do leito do Canal do Varador por meio da utilização de um modelo SRTM para a análise do relevo, criação de cenários hidrodinâmicos na PCIA com base no uso do modelo hidrodinâmico 2DH (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHia), digitalização dos contornos costeiros e marítimos utilizando o software Surfer para a criação das malhas e domínios necessários para a elaboração do modelo hidrodinâmico, tratamento dos dados de vento, constantes harmônicas e parâmetros de rugosidade no ambiente Excel e sua subsequente incorporação ao modelo hidrodinâmico, validação dos dados para garantir a representação precisa das simulações, identificação das áreas na PCIA com potencial energético por meio das correntes de maré, cálculo do potencial energético das correntes de maré e identificação das tecnologias apropriadas para a geração de energia elétrica com base nas características locais. Por meio da simulação realizada no SisBaHia, foi possível obter uma representação da elevação do nível do mar ao longo de um período de 30 dias a partir de 01/04/2021. Isso permitiu identificar os momentos correspondentes a $\frac{1}{2}$ maré vazante, $\frac{1}{2}$ maré enchente, o estofo de preamar e de baixamar nos ciclos de maré de sizígia e quadratura. Os resultados das simulações para os ciclos de sizígia e quadratura revelaram duas áreas promissoras localizadas no Canal do Varador, onde as velocidades das correntes de maré variaram de 0,9 a 1,80 m.s⁻¹ e a densidade energética variou de 373,61 W.m⁻² a 1835 W.m⁻². A densidade energética atingiu seu valor máximo no trecho superior do canal, próximo ao Igarapé do Inferno (ilha de Maracá), onde as correntes de maré são mais vigorosas.

Palavras-chave: PCIA. Canal do Varador. Simulações hidrodinâmicas. SisBahia. Potencial energético.

ABSTRACT

The present study focused on the analysis and dynamics of tidal currents with the aim of generating natural energy in estuaries, based on a case study conducted in a coastal region with significant tidal influence. Therefore, hydrodynamic research plays a crucial role in forecasting and producing energy from the natural flow of currents. In this context, the primary objective of this study was to generate hydrodynamic scenarios in the Inner Continental Shelf of Amapá (ICSA) based on the creation of current patterns over a lunar cycle (spring and neap tides) that includes half ebb tide, half flood tide, high tide, and low tide. The methodology employed consisted of the following stages: conducting a comprehensive literature review, determining the geomorphological characteristics of the Varador Channel bed using an SRTM model for terrain analysis, creating hydrodynamic scenarios in the ICSA based on the use of the 2DH hydrodynamic model (Base System for Environmental Hydrodynamics - SisBaHia), digitizing coastal and maritime contours using Surfer software to create the necessary grids and domains for the hydrodynamic model, processing wind data, harmonic constants, and roughness parameters in Excel, and subsequently incorporating them into the hydrodynamic model, validating the data to ensure accurate representation of simulations, identifying areas in the ICSA with energy potential through tidal currents, calculating the energy potential of tidal currents, and identifying appropriate technologies for electricity generation based on local characteristics. Through the simulation conducted in SisBaHia, it was possible to obtain a representation of sea level elevation over a period of 30 days starting from 01/04/2021. This allowed the identification of moments corresponding to half ebb tide, half flood tide, high tide, and low tide in the spring and neap tide cycles. The results of simulations for spring and neap tide cycles revealed two promising areas located in the Varador Channel, where tidal current velocities ranged from 0.9 to 1.80 m.s⁻¹ and energy density ranged from 373.61 W.m⁻² to 1835 W.m⁻². The energy density reached its maximum value in the upper stretch of the channel, near the Igarapé do Inferno (Maracá Island), where tidal currents are strongest.

Keywords: ICSA. Varador Channel. Hydrodynamic simulations. SisBahia. Energy potential.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CAPACIDADE MUNDIAL DE ELETRICIDADE RENOVÁVEL, 2012–2021.	18
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA MUNDIAIS.	19
FIGURA 3 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE.	20
FIGURA 4 - PARTICIPAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA (OIE).	22
FIGURA 5 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO E ACESSO À PCIA E AO CANAL DO VARADOR.	25
FIGURA 6 - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAGUARI.	26
FIGURA 7 - GRÁFICO CLIMATOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO.	27
FIGURA 8 - VAZÃO DO RIO ARAGUARI NA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO DE PLATON, DE JANEIRO DE 1952 A AGOSTO DE 1958 E DE JUNHO DE 1972 A NOVEMBRO DE 2015.	30
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DE LAMA FLUIDA AO LONGO DOS QUATRO CRUZEIROS DO PROJETO AMASSEDS DE ACORDO COM A DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.	31
FIGURA 10 – MOSAICO DE IMAGENS DE RADAR DE SATÉLITE JERS (1995) E DO NOAA (NOV/1999). SISTEMA DE DISPERSÃO DO RIO AMAZONAS E A INFLUÊNCIA DE SUA PLUMA ATÉ O DELTA DO ORENOCO NA VENEZUELA.	34
FIGURA 11 - SEÇÃO LONGITUDINAL DE UM ESTUÁRIO COM OS TRÊS SETORES: ZONA MARINHA OU COSTEIRA (NTZ), ZONA DE MISTURA (MZ) E ZONA FLUVIAL DO RIO (TRZ). VAZÃO DO RIO (QF).	35
FIGURA 12 - CLASSIFICAÇÃO ESTUARINA CONFORME PADRÕES DE CIRCULAÇÃO E ESTRUTURA DE SALINIDADE. OS VALORES REPRESENTAM NÍVEIS TÍPICOS DE SALINIDADE COM PADRÕES GERAIS DE CIRCULAÇÃO.	37
FIGURA 13 - DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DE HANSEN E RATTRAY (1966) SOBREPOSTO AO DIAGRAMA DE CIRCULAÇÃO - ESTRATIFICAÇÃO AJUSTADOS.	40
FIGURA 14 - COMPONENTES DAS MARÉS.	43
FIGURA 15 - MARÉS DE SIZÍGIA E DE QUADRATURA.	43
FIGURA 16 - MAPA GLOBAL DA VARIAÇÃO DA ALTURA DE MARÉ NOS OCEANOS.	45
FIGURA 17 - MAPA BASE DA PCIA.	47
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE MODELAGEM NO SISBAHIA.	49
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS ATUANTES NA DIREÇÃO X. O PRODUTO DAS TENSÕES PELA ÁREA NO PLANO DE CONTATO REPRESENTA AS FORÇAS DE CONTATO.	52
FIGURA 20 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA O REFERIDO ESTUDO.	57
FIGURA 21 - IMAGEM A) SRTM DO SETOR NORTE DA IHA DE MARACÁ. CARTA NA – 22 – X – C. B) SRTM DO SETOR SUL DA IHA DE MARACÁ. CARTA NA – 22 – Z – A.	59
FIGURA 22 - MOSAICO ALTIMÉTRICO E BATIMÉTRICO DA PCIA, INCLUINDO O CANAL DO VARADOR.	59
FIGURA 23 – A) PERFIS LONGITUDINAIS E B) PERFIS TRANSVERSAL NO CANAL DO VARADOR.	63
FIGURA 24 – TRECHO AO NORTE DA ILHA DE MARACÁ PRÓXIMO À FOZ DO RIO CALÇOENE, P1 E P2. TRECHO PRÓXIMO AO CANAL DO INFERNO – ILHA DE MARACÁ, P3 E P4.	64
FIGURA 25 – TRECHO PRÓXIMO À FOZ DO RIO MACARI /OCEANO ATLÂNTICO P5, P6 E P7. PARTE NORTE DA ILHA DE MARACÁ. TRECHOS LONGITUDINAIS DO CANAL DO VARADOR. T1 – NAS PROXIMIDADES DA FOZ DO RIO CALÇOENE. T2 – PRÓXIMO À FOZ DO RIO MACARI E CANAL DO INFERNO; T3 – OCEANO.	65

FIGURA 26 - ELEVAÇÃO DE MARÉ NO TRECHO INFERIOR DO CANAL DO VARADOR: MÁXIMA DE 6,8 M E MÍNIMO DE -0,2 M PARA A PRIMEIRA MARÉ DE SIZÍGIA DO PERÍODO E MÁXIMA DE 7,55 M E MÍNIMA DE 0,40 M PARA A SEGUNDA MARÉ DE SIZÍGIA DO PERÍODO ANALISADO.....	66
FIGURA 27 – A) U (VELOCIDADE LONGITUDINAL) E A V (VELOCIDADE TRANSVERSAL) NO NÓ 64. B) INSTANTE DE ALTURA DE MARÉ DE SIZÍGIA (½ MARÉ ENCHENTE, ESTOFO DE PREAMAR, ½ MARÉ VAZANTE, ESTOFO DE BAIXAMAR) INDICADOS PELOS TRIÂNGULOS.....	69
FIGURA 28 – SIZÍGIA: ELEVAÇÃO E PADRÕES DE CORRENTES DE MARÉ NOS INSTANTES A) ½ MARÉ ENCHENTE. B) ESTOFO DE PREAMAR. C) ½ MARÉ VAZANTE. D) ESTOFO DE BAIXAMAR NA PCIA. A1 – ÁREA 1, A2 – ÁREA 2.	70
FIGURA 29 – QUADRATURA – ELEVAÇÃO DE MARÉ E PADRÕES DE CORRENTES NOS INSTANTES A) ½ MARÉ VAZANTE. B) ESTOFO DE BAIXAMAR. C) ½ MARÉ ENCHENTE. D) ESTOFO DE PREAMAR. B1 – ÁREA B1, C1 – ÁREA C1.....	72
FIGURA 30 - DIVISÃO DO CANAL DO VARADOR, PCIA: A) TRECHO SUPERIOR (TS), B) TRECHO MÉDIO (TM), C) TRECHO INFERIOR (TI).....	76
FIGURA 31 – REGIÕES ADEQUADAS PARA MAREMOTRIZ.....	79
FIGURA 32 – ETAPAS DO PROCESSO DE APROVEITAMENTO DE CORRENTES DE MARÉ.	84
FIGURA 33 – ESQUEMA DE TURBINA DE EIXO HORIZONTAL.	85
FIGURA 34 – TURBINA DE MARÉ DE EIXO HORIZONTAL.....	85
FIGURA 35 – ESQUEMA DE TURBINA DE EIXO VERTICAL.	86
FIGURA 36 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PADRÃO DE UMA TURBINA SAVONIUS.....	87
FIGURA 37 - VISÃO ISOMÉTRICA DA TURBINA (A), VISÃO ISOMÉTRICA DO DEFLETOR (B), VISÃO FRONTAL DO DEFLETOR E DA TURBINA NO TUBO (C), E VISÃO ISOMÉTRICA DO DEFLETOR E DA TURBINA NO TUBO (D).....	87
FIGURA 38 – HISTÓRICO DE TEMPO DA POTÊNCIA DE SAÍDA DA TURBINA À VELOCIDADE 1,5 M.S ⁻¹ (TURBINA SEM DEFLETOR). 94	94
FIGURA 39 - HISTÓRICO DE TEMPO DA POTÊNCIA DE SAÍDA DA TURBINA À VELOCIDADE ATUAL 1,50 M.S ⁻¹ (TURBINA COM DEFLETOR).....	94
FIGURA 40 – COMPARAÇÃO DAS DUAS MAIORES POTÊNCIAS DA TURBINA EM CASOS COM E SEM DEFLETOR (VELOCIDADE ATUAL 1,50 M.S ⁻¹).....	94
FIGURA 41 – FLUXOGRAMA GERAL PARA DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA NO SISBAHIA.....	117
FIGURA 42 - MALHA DA PCIA CONFECCIONADA NO SISBAHIA É EXPORTADA PARA O SURFER.....	119
FIGURA 43 - TELA DE MALHAS E DOMÍNIOS DE MODELAGEM NA ABA DE NÓS, ONDE É POSSÍVEL EXTRAIR AS COORDENADAS “X” E “Y” EM UTM DOS NÓS DA MALHA, E OS DADOS DE BATIMETRIA E RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE FUNDO EM METROS.	120
FIGURA 44 - REDUÇÃO DAS SONDAS BATIMÉTRICAS. CARTA NÁUTICA Nº 21200.....	120
FIGURA 45 - ESTAÇÕES DE DADOS FES.	121
FIGURA 46 - MARÉ ASTRONÔMICA – ESTAÇÃO 1 FES.....	123
FIGURA 47 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE EXTRAÇÃO DOS DADOS DE NÍVEL DO MAR PELO HYCOM.	123
FIGURA 48 - SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL (M), EM METROS, EXTRAÍDA PARA AS ESTAÇÕES DO HYCOM (PRETO), NÍVEL MÉDIO DO PONTO DE EXTRAÇÃO (VERMELHO) NO PERÍODO DE CHEIA.....	124
FIGURA 49 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE EXTRAÇÃO DOS DADOS DE MAGNITUDE E DIREÇÃO DOS VENTOS PELO ERAS 5 NA PCIA.....	126

FIGURA 50 - ROSA DIRECIONAL (VENTOS) – PERÍODO DE CHEIA - ESTAÇÃO 1.	126
FIGURA 51 - ROSA DIRECIONAL (VENTOS) – PERÍODO DE CHEIA - ESTAÇÃO 2.	127
FIGURA 52 - ROSA DIRECIONAL (VENTOS) – PERÍODO DE CHEIA - ESTAÇÃO 3.	127

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CASOS DE VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM DECORRÊNCIA DAS MARÉS E SUAS RESPECTIVAS ESCALAS TEMPORAIS.	44
TABELA 2 - COMPONENTES DA QUANTIDADE MOVIMENTO 2 DH.	53
TABELA 3 - VALORES SUGERIDOS PARA A AMPLITUDE EFETIVA DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE FUNDO.	54
TABELA 4 - REFERÊNCIA DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO HIDRODINÂMICO.	60
TABELA 5 - COMPARAÇÃO DAS PROFUNDIDADES E CORRENTES DE MARÉ NA REGIÃO DA PCIA.	67
TABELA 6 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO COM REFERÊNCIA À CONSTANTE HARMÔNICA DE MARÉ M ₂	67
TABELA 7 - DADOS DE ELEVAÇÃO DE MARÉ PARA ½ MARÉ ENCHENTE DE QUADRATURA E O ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (EQM) ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E MODELADOS.	67
TABELA 8 - DADOS DE PARÂMETROS DE ENTRADA UTILIZADOS PARA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA NO SISBAHIA.	68
TABELA 9 - VARIAÇÕES DO CICLO DE MARÉ EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO TEMPO DURANTE A MARÉ DE SIZÍGIA.	69
TABELA 10 - VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS DO CICLO DE MARÉ OBTIDOS DURANTE A MARÉ DE QUADRATURA.	73
TABELA 11 - DENSIDADES ENERGÉTICAS DETECTADAS NOS TRECHOS DA PCIA DURANTE AS SIMULAÇÕES DE MARÉ E SUAS RESPECTIVAS VELOCIDADES DE CORRENTES DE MARÉ.	75
TABELA 12 - COMPARAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO COM OUTROS LOCAIS DO MUNDO.	78
TABELA 13 - PERFORMANCE DE ALGUNS TIPOS DE TURBINAS DE CORRENTES DE MARÉ.	82
TABELA 14 - ALGUMAS DAS ORGANIZAÇÕES, TECNOLOGIAS DESENVOLVIDAS E LOCALIZAÇÕES.	89
TABELA 15 - EXEMPLO DE TECNOLOGIA DE APLICADOS EM CORRENTES DE MARÉ DE BAIXA VELOCIDADE.	92
TABELA 16 – CARACTERIZAÇÃO DA TURBINA DESENVOLVIDA POR WENEHENUBUN, SAPUTRA E SUTANO (2015).	93
TABELA 17 - INFORMAÇÕES SOBRE AS MALHAS DE ELEMENTOS QUADRANGULARES E TRIANGULARES UTILIZADAS NA PCIA.	118
TABELA 18 - CONSTANTES HARMÔNICAS.	122
TABELA 19 - VAZÃO DO RIO AMAZONAS, MENSAL MÁXIMA, MÍNIMA E MÉDIA.	125

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIE - Agência Internacional de Energia

AMASSEDS – A Multidisciplinary Amazon Shelf SEDiment Study

ANA - Agência Nacional de Águas

BCH - Baixa do Chaco

CNB - Corrente Norte Brasileira

CSS - Concentração de Sedimentos Suspensos

EJ – Exajoule

ENCT - Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EQM – Erro quadrático médio

Fc - Força Centrífuga

Fg - Força de Atração Gravitacional

GEMC - Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros

GW - Gigawatt

IALA - Associação Internacional de Autoridades em Sinalização Náutica

IEPA - Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá

IMO - Organização Marítima Internacional

INCT - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MW - Mega watt

MWh - Megawatt-hora

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OES IA - Acordo de Implementação de um Programa cooperativo em Sistemas de Energia Oceânica

OET - Tecnologia de Energia Oceânica

OHI - Organização Hidrográfica Internacional

ONU - Organização das Nações Unidas

OTEC - Sistemas de Conversão de Energia Térmica Oceânica

PCIA – Plataforma Continental Interna do Amapá

PPCDAP - Plano de Preservação e Controle do Desmatamento e Queimadas do Estado do Amapá

SEMA - Secretaria Estadual de Meio Ambiente

SisBaHia - Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental

SNCTI - Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCEA - Zona Costeira do Estado do Amapá

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 HIPÓTESE	23
1.2 JUSTIFICATIVA	23
1.3 OBJETIVOS.....	24
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	24
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	24
1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSO À PCIA	25
1.5 CARACTERIZAÇÃO DA PCIA	25
1.5.1 <i>Bacia hidrográfica</i>	25
1.5.2 <i>Condições climáticas e parâmetros meteorológicos</i>	26
1.5.3 <i>Precipitação</i>	27
1.5.4 <i>Ventos</i>	29
1.5.5 <i>Hidrologia</i>	29
1.6 GEOMORFOLOGIA DA PCIA	31
1.7 PARÂMETROS OCEANOGRÁFICOS	32
1.7.1 <i>Maré</i>	32
1.7.2 <i>Corrente de maré</i>	32
1.7.3 <i>Pororoca</i>	32
1.7.4 <i>Ondas</i>	33
1.7.5 <i>Pluma estuarina</i>	33
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	35
2.1 ESTUÁRIOS	35
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ESTUÁRIOS	35
2.2.1 <i>Com base Geomorfológica</i>	36
2.2.2 <i>Com base na Estratificação de Salinidade</i>	36
2.2.3 <i>Com Base no Diagrama de Circulação - Estratificação</i>	39
2.2.4 <i>Com base na amplitude de maré</i>	41
2.2.5 <i>Com base na sedimentação</i>	41
2.3. MARÉS E PADRÕES HIDRODINÂMICOS	42
2.3.1 <i>Marés de Sizígia e de Quadratura</i>	42
2.4 TRABALHOS SOBRE PROSPECÇÃO DE ÁREAS COM POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE CORRENTES DE MARÉ	46
2.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	47
2.5.1 <i>Descrição do modelo Sisbahia</i>	51
2.5.2 <i>Modelos de circulação Hidrodinâmica</i>	55
2.5.3 <i>Classificação dos modelos hidrodinâmicos</i>	55

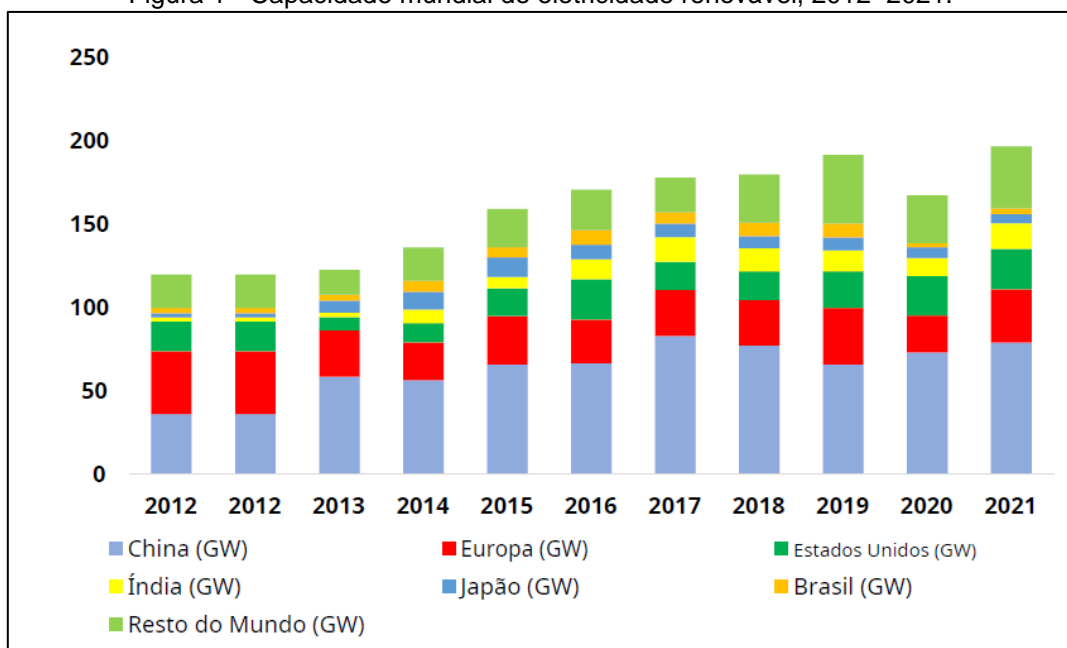
3. METODOLOGIA	57
3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	57
3.2. DETERMINAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DE FUNDO DO CANAL DO VARADOR MEDIANTE USO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO – MDE / SRTM	58
3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS	59
3.3.1 <i>Integralização dos dados</i>	61
3.3.2 <i>Simulações da circulação hidrodinâmica</i>	61
3.4 CÁLCULO DA DENSIDADE ENERGÉTICA	62
3.5 IDENTIFICAÇÃO DA(S) MELHOR(ES) TECNOLOGIA(S) PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DAS CORRENTES DE MARÉ	62
4. RESULTADOS.....	63
4.1 GEOMORFOLOGIA DO CANAL DO VARADOR.....	63
4.2. SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS NA PCIA	66
4.2.1 <i>Validação do modelo</i>	66
4.2.2 <i>Simulações hidrodinâmicas (sizigia/quadratura)</i>	68
4.2.3 <i>Maré de Sizígia</i>	69
4.2.4 <i>Maré de Quadratura</i>	72
4.3 IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS COM POTENCIAL ENERGÉTICO POR CORRENTES DE MARÉ	74
4.4 DENSIDADE ENERGÉTICA	74
4.4.1 <i>Comparação do potencial energético da PCIA com outras regiões do Brasil e mundo</i>	76
4.5 IDENTIFICAÇÃO DA(S) MELHOR(ES) TECNOLOGIA(S) PARA EXTRAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA	78
4.5.1 <i>Tecnologias adequadas à PCIA</i>	92
5. CONCLUSÃO	96
6. REFERÊNCIAS.....	97
ANEXO 1.....	117
ANEXO 2.....	118

1. INTRODUÇÃO

Diante das necessidades das indústrias e do desenvolvimento econômico é possível compreender a grande demanda de recursos energéticos no cenário global, o qual conta principalmente com a queima de combustíveis fósseis que além de causar impactos ambientais, o que denota a necessidade urgente de mitigar os danos ambientais e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis a partir da busca por alternativas de fontes de energia renováveis mais sustentáveis como: de ondas, marés, de correntes marinhas, gradiente de salinidade e térmico, dentre outras. (ZAINOL; ISMAIL; ZAINOL, 2017).

Dessa maneira, parte-se do pressuposto de que a substituição da energia, advinda de combustíveis fósseis pelas fontes limpas de energia renovável é crucial para a sustentabilidade ambiental e podem ser um meio para evitar os severos impactos ao meio ambiente e saúde (figura 1) (ZASTEMPOWSKI, 2023; YI et al., 2023)

Figura 1 - Capacidade mundial de eletricidade renovável, 2012–2021.



Fonte: Chowdhury et al. (2021 apud IEA, 2020).

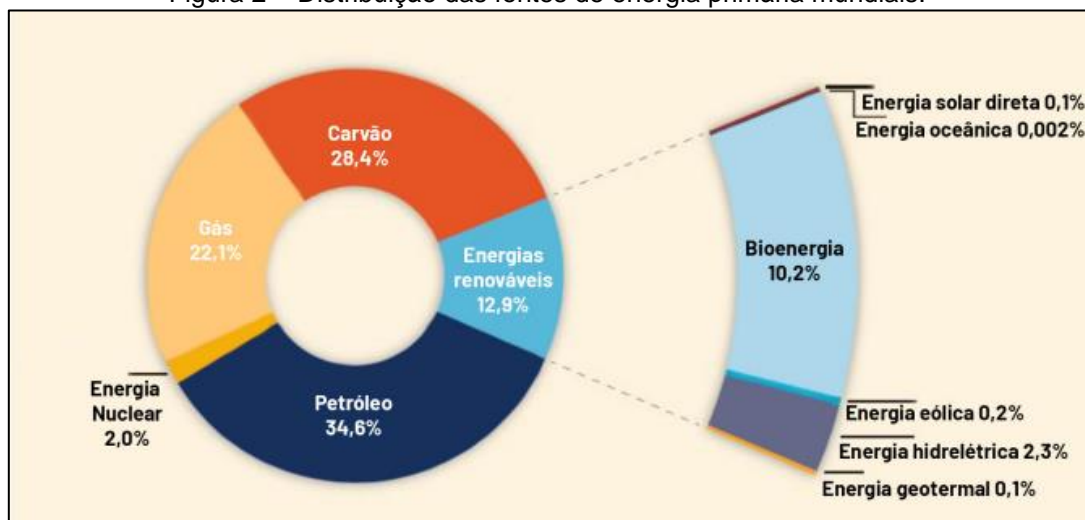
É importante que essa troca de fonte de energia ocorra de uma forma concomitante ao contínuo aumento de energia global e, como alternativas de recursos energéticos renováveis, vale citar a energia solar, fotovoltaica, biomassa, eólica, energia hidrelétrica, geotérmica e energia da maré (CHOWDHURY et al., 2021).

As energias renováveis provenientes das correntes de maré têm despertado um interesse crescente na comunidade científica e nos setores industriais devido ao seu potencial para fornecer uma fonte limpa e, por se tratar de uma conversão de energia gravitacional, é possível prever a energia das marés com uma ampla escala temporal, apresentando, deste modo, maior confiabilidade do potencial energético renovável (ESTEBAN et al., 2020; MAGAGNA et al., 2020; BARBOSA et al., 2021).

A energia renovável oceânica é avaliada em 76 milhões de MW. Ainda, a Tecnologia de Energia Oceânica (TEO) apresenta diversos pontos positivos à exemplo do melhoramento econômico, segurança de abastecimento e moderação das emissões de CO₂, indicando que as tecnologias de energia oceânica expõem vantagens no mercado global de energia. As nações costeiras exibem localização privilegiada para utilização de energia limpa com resguardo energético (CHOWDHURY et al., 2021).

Neste contexto, a abordagem de desenvolvimento de energia sustentável é importante no cenário global, uma vez que os recursos naturais outrora se encontravam em demasia, mas com o passar dos anos demonstram carência. Esta situação traz em evidência a captação de energia advinda dos oceanos e, segundo Castello, Estefen e Soares (2020), em comparação às fontes tradicionais, a extração de energia a partir dos oceanos tem muito a ser explorada (figura 2).

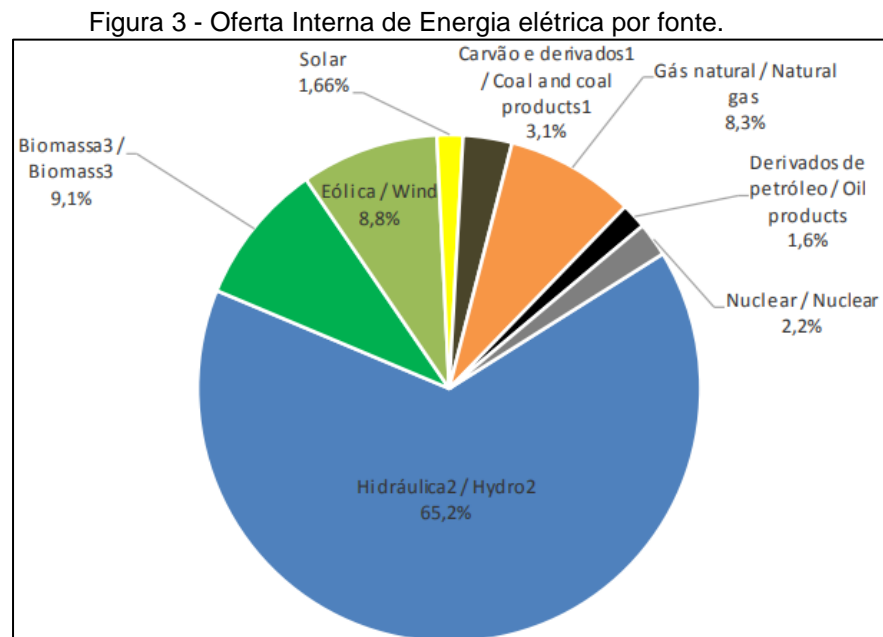
Figura 2 - Distribuição das fontes de energia primária mundiais.



Fonte: Edenhofer et al. (2011).

Em concordância com IPCC (2011), o potencial técnico¹ global anual máximo de energia dos oceanos está em torno de 331E18 Joules, enquanto que o potencial teórico² em torno de 7.400 (EJ)³, de modo que esses resultados excedem o consumo total mundial, confirmando a relevância e tendência em explorar o potencial energético sustentável. Estima-se que no Brasil o potencial teórico de energia dos oceanos está em torno de 114 GW, considerando apenas marés e ondas (FERNANDES, 2012; CASTELLO; ESTEFEN; SOARES, 2020).

O Brasil apresenta relevante potencial energético, dispondo de uma matriz elétrica consideravelmente renovável, uma vez que exhibe notável visibilidade quanto à fonte hídrica com 65,2 % de oferta interna (figura 3) e um total de 84,8 %, que corresponde às parcelas referentes à produção nacional e as importações de base renovável (EPE, 2021).



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021).

¹ “Potencial técnico de energia renovável é obtido pela total implementação das tecnologias atualmente praticadas, mas sem levar em conta os custos ou barreiras políticas de uso. Contudo, geralmente são consideradas as restrições técnicas e práticas de uso das tecnologias” (CASTELLO; ESTEFEN; SOARES, 2020, p. 159).

² “O potencial teórico de energia renovável é calculado levando em consideração os parâmetros naturais e climáticos (e.g., irradiação solar na superfície do continente).” (CASTELLO; ESTEFEN; SOARES, 2020, p. 159).

³ “1 Exajoule = 10¹⁸ joules = 23,88 milhões de toneladas equivalentes de petróleo” (IPCC, 2011, p. 09).

Em meio a este cenário, na visão de desenvolver um futuro sustentável, a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou em 2017 que no período de 2021 a 2030 seria efetuada a “*Década da Ciência Oceânica*” (Década Oceânica), de modo que, a determinação tem atuação caracterizada pelo conhecimento científico como essência, a fim de proporcionar melhoria no âmbito social, ambiental, econômico e cultural de maneira integrada (FERNANDES, 2021).

A Década do Oceano visa aplicar 17 objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU como metas (ONU, 2023). Entre estes ODS, destacam-se os números: 7 – que tem como alvo garantir o acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos; e o objetivo 14 com a proposta de conservar e utilizar de forma sustentável os oceanos, mares e recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável. O ODS 7 engloba importantes pontos como:

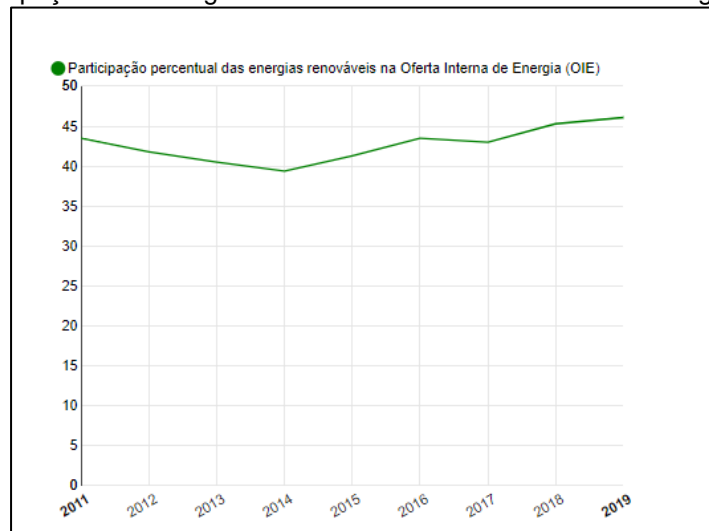
Meta 7.1 - Até 2030, assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia;

Meta 7.2 - Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global;

Meta 7.a - Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa (IPEA, 2019).

É possível notar que as metas estão inseridas em âmbitos estratégicos para garantir a acessibilidade dos serviços a todos, assim como evidenciar o aumento da participação de energias renováveis na matriz energética nacional, instituindo, dentre os objetivos, a cooperação internacional em prol do escopo. Estudos indicam que o Brasil apresenta relevância no quesito energias renováveis na matriz energética Nacional, com 41,2 % em participação, em 2015 (figura 4)(EPE, 2021).

Figura 4 - Participação das energias renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE).



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2021).

Assim, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) tem o intuito de colaborar na obtenção das metas da Década do Oceano, dentre os objetivos, destacam-se alguns:

- Lançar chamadas públicas de projetos de pesquisa sobre as prioridades nacionais até 2030;
- Estabelecer redes de especialistas em áreas do conhecimento estratégicas para o desenvolvimento sustentável nacional conforme demanda;
- Incentivar a inovação e tecnologia orientada a soluções para o desenvolvimento sustentável (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2021).

Neste contexto, os Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia – INCT no objetivo de ampliar as opções de financiamento de projetos mais abrangentes e oportunos de pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico mediante redes de pesquisa em todo território nacional (INCT, 2023), tem como parte de seu planejamento a investigação e busca por novos conhecimentos e descobertas de recursos a fim de tomar decisões informadas e procurar novas possibilidades.

Nessa perspectiva, como um dos locais de pesquisa do INCT, a Plataforma Continental Interna do Amapá – PCIA, canal do Varador, apresenta-se como uma região pertinente à investigação e identificação de possíveis áreas com potencial energético de correntes de maré, pois possui caráter estuarino (bem misturado) com forte influência de maré. Além disso, nesta área, entre a costa Atlântica do Amapá e a ilha de Maracá, canal

do Varador, a hipermaré atinge altura de 11 m (Canal do Inferno), com características pertinentes para produção de energia a partir das altas amplitudes de marés e da velocidade das correntes (TORRES; EL – ROBRINI; COSTA, 2018).

Desse modo, depreende-se a seguinte problemática: o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHia é uma ferramenta adequada para a modelagem hidrodinâmica para identificação de possíveis áreas com potencial energético de correntes de maré?

1.1 HIPÓTESE

O potencial de geração de energia elétrica a partir de estuários e canais de maré é alto, além de ser um recurso sustentável, representa uma alternativa de geração de energia com vantagens em comparação às demais energias renováveis, assim, almejam-se obter resultados vantajosos de potencial energético (correntes de maré) na PCIA e assertiva análise das tecnologias adequadas para captação e conversão da energia de maré.

1.2 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda global por energia, juntamente com as preocupações ambientais associadas à geração de energia a partir de fontes não renováveis, torna crucial explorar e desenvolver alternativas viáveis e sustentáveis. Nesse sentido, a utilização das correntes de maré como fonte de energia renovável apresenta diversas vantagens que justificam a realização de estudos aprofundados nessa área a partir dos seguintes itens:

I. **Potencial energético:** as correntes de maré possuem um imenso potencial energético, que ainda está praticamente inexplorado. Os oceanos cobrem mais de 70 % da superfície da Terra, e muitas áreas costeiras apresentam correntes de maré fortes e constantes. Aproveitar essa energia inexplorada pode contribuir significativamente para a produção de eletricidade de forma sustentável (JUNIOR; FIRMINO, 2022);

II. **Fonte de energia renovável e previsível:** as correntes de maré são uma fonte de energia renovável e previsível. Ao contrário de outras fontes renováveis, como a solar e a eólica, que são intermitentes, as correntes de maré são influenciadas pela atração gravitacional da Lua e do Sol, o que permite prever com

precisão o padrão de marés. Isso garante uma produção constante e confiável de energia ao longo do tempo (MÜLLER-NAVARRA et al., 2020);

III. **Baixo impacto ambiental:** a utilização das correntes de maré como fonte de energia possui um baixo impacto ambiental se comparado a outras formas de geração de energia. Ao contrário das usinas hidrelétricas convencionais, que podem causar grandes impactos socioambientais, como a inundação de áreas extensas, as turbinas de maré têm um impacto localizado e menor interferência nos ecossistemas marinhos (LEIJON et al., 2021);

IV. **Potencial para diversificação da matriz energética:** a incorporação da energia proveniente das correntes de maré na matriz energética pode contribuir para a diversificação da fonte de energia utilizada em determinada região. Isso reduziria a dependência de fontes não renováveis, como o carvão e o petróleo, aumentando a segurança energética e promovendo a transição para um sistema mais sustentável (LEWIS et al., 2019; JACOBSON et al., 2020).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a circulação hidrodinâmica e avaliar o potencial energético (correntes de maré) na PCIA como alternativa para geração de energia sustentável.

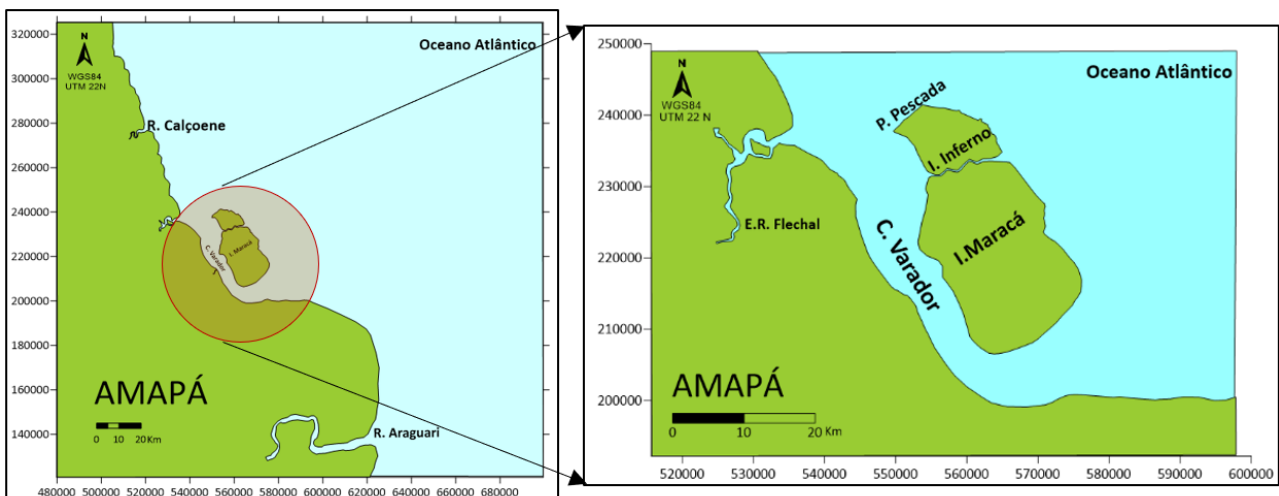
1.3.2 Objetivos específicos

- a. Determinar as características geomorfológicas de fundo do Canal do Varador;
- b. Simular cenários de circulação hidrodinâmica na PCIA nos momentos de marés de sizígia e de quadratura;
- c. Determinar a variação da maré e a magnitude das correntes durante estes períodos;
- d. Identificar e avaliar as áreas (km²) com potencial energético (W.m⁻²) por correntes de maré na PCIA;
- e. Identificar a(s) melhor(es) tecnologia(s) para extração de energia elétrica a partir das correntes de maré na PCIA.

1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSO À PCIA

O acesso à PCIA dá-se mediante o rio Amazonas a partir de São Sebastião de Viçosa em direção à Bailique e Sucuriçu. A PCIA engloba o Canal do Varador (figura 23), que se estende 800 km à montante da foz do rio Amazonas, entre a costa do Amapá e a ilha de Maracá ($2^{\circ}11'$ e $1^{\circ}50'$ Norte e $50^{\circ}37'$ e $50^{\circ}11'$ Oeste) (figura 5). O acesso terrestre dá-se partindo da BR - 156 até a AP - 116 de Amapá, onde se passa a utilizar o acesso fluvial mediante embarcações a partir do rio Flechal (www.brasilchannel.com.br, 2022).

Figura 5 - Mapa de localização e acesso à PCIA e ao canal do varador



Fonte: Autor (2023).

1.5 CARACTERIZAÇÃO DA PCIA

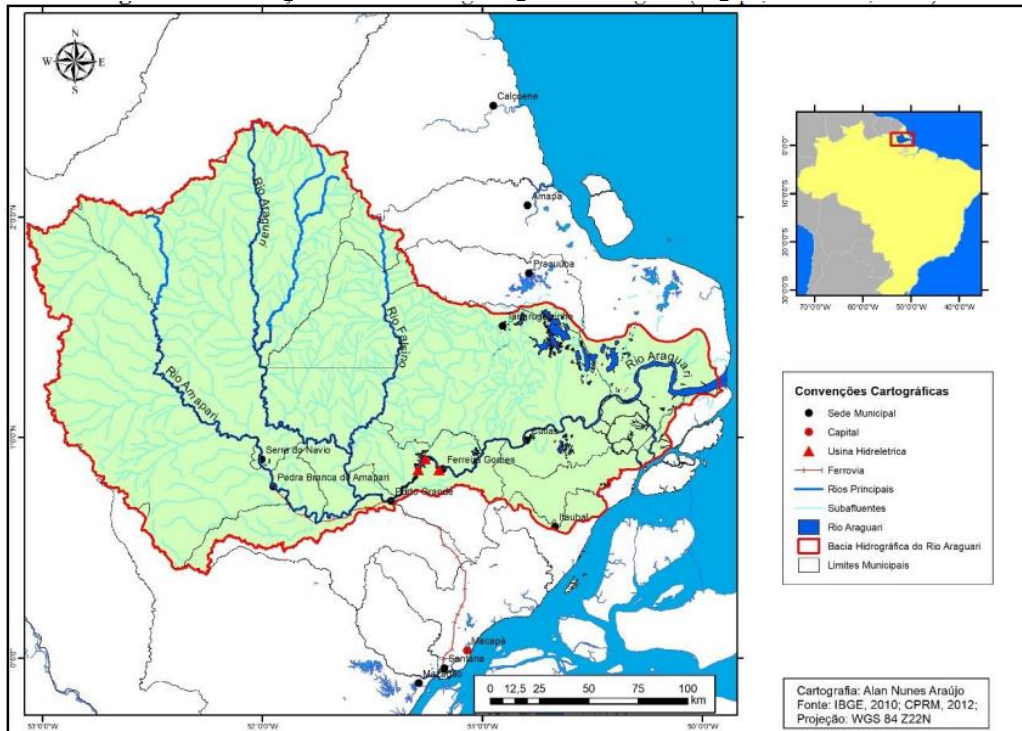
1.5.1 Bacia hidrográfica

Na área de estudo, ocorre a bacia hidrográfica do Araguari, com área total de 36.781,39 km² (NASCIMENTO, 2021). A oscilação de precipitação na bacia do rio Araguari está sujeita à versatilidade do clima da Amazônia Oriental, que acaba por ocasionar períodos de elevadas secas e cheias (SOUZA; CUNHA, 2010; SOUZA et al., 2009; NEVES et al., 2011).

Ainda o rio Araguari, com área de drenagem de 42 mil km², é considerado o principal e maior rio do Amapá, com comprimento de 617 km e pode ser segmentado em três trechos: curso superior (Porto Grande e confluência do rio Tajai); curso médio, o que perpassa pelo Porto Grande, caracterizado por ser um trecho juvenil; e curso inferior, que percorre Ferreria Gomes e Cutias do Araguari, o qual sofre influência de maré (CUNHA et al., 2014).

Na área de estudo, tem-se ainda a bacia do rio Calçoene próxima do Canal do Varador, Amapá, a qual conta com as bacias do Rio Flechal, Rio Novo, Rio Cassiporé, Igarapé Grande Crique, Rio Cunani e Igarapé Marecal, estas as quais compõem uma parcela da bacia hidrográfica do Rio Araguari (figura 6)(PMSB, 2020).

Figura 6 - Bacia hidrográfica do rio Araguari.

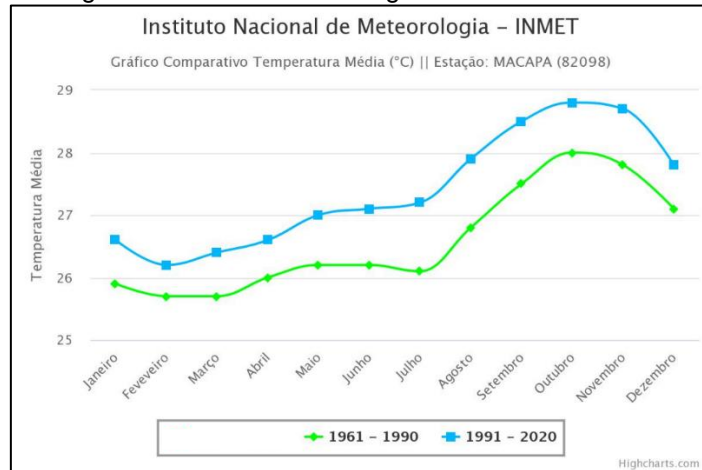


Fonte: IBGE, (2010); ARAÚJO, (2019).

1.5.2 Condições climáticas e parâmetros meteorológicos

A área de estudo encontra-se na faixa equatorial e exibe um clima úmido e quente bem definido, onde o período menos chuvoso/seco ocorre nos meses de agosto/novembro e setembro/outubro, respectivamente, com índices de chuvas de 40,6 mm e 39,4 mm para o seco. Entretanto, a temperatura média anual (°C) na região segue tendência com máximas variando entre os meses de setembro e novembro e mínimas nos meses de janeiro a março, com temperaturas entre 26 °C e 29 °C (figura 7) (INMET, 2022). Conforme Fernandes (1997), entre os meses de maio de 1995 e abril de 1996, a área de estudo apresentou média de precipitação de 366 mm com temperatura média de 27,3 °C e amplitude de 0,6 °C.

Figura 7 - Gráfico Climatológico da área de estudo.



Fonte: INMET (2022).

A Zona de Convergência Intertropical – ZCIT se forma a partir do encontro de ventos alísios dos hemisférios na superfície, o que ocasiona chuvas moderadas a fortes no Amapá e influencia no regime de chuvas na região (TOZZO, 2022). Além disso, seu controle sobre o clima tropical interfere nas descargas sólida e líquida dos rios e junto das bandas de nuvens responsáveis pelas chuvas, resultam em uma excepcional nebulosidade na costa do Amapá (VITOR, 2022).

1.5.3 Precipitação

A precipitação é diversificada na costa amazônica, onde na foz do rio Amazonas ocorre o maior índice pluviométrico ($3.000 \text{ mm.ano}^{-1}$), de modo que a área de estudo distingue-se por estar submetida à chuvas ao longo de vários meses no ano, com menor precipitação nos meses de setembro e outubro (SANTOS, 2006).

Segundo Oliveira et al. (2007), a média anual de chuva é de 4.238,88 mm com concentração de chuvas nos meses de dezembro a julho e pico nos meses de abril e maio, 665,1 mm e 687,8 mm.

- Eventos Extremos

Na bacia do Amazonas ocorrem eventos hidrológicos extremos de secas ou enchentes extremas El – Niño⁴ e La - Niña⁵, os quais influenciam diretamente no regime de chuva e temperatura (MARENGO, 2003). De acordo com Correa (2019), os eventos de

⁴ **El – Niño**: fenômeno onde ocorre o aquecimento anormal das águas do Pacífico Tropical Centro – Leste.

⁵ **La – Niña**: fenômeno caracterizado pelo resfriamento anormal das águas do Pacífico Tropical (SAMPAIO, 2012, p. 22).

seca na Amazônia são comumente relacionados aos valores positivos da temperatura superficial do oceano Atlântico Tropical e com o fenômeno El – Niño; sob outra perspectiva, os eventos de cheia são ligados com os eventos de La – Niña (DE LINAGE; FAMIGLIETTI; RANDERSON, 2014; MARENGO; ESPINOZA, 2016), o qual entre 2021 e 2022, tem contribuído para chuvas acima da média na região norte do Brasil (PEREIRA, 2022).

A região amazônica está sujeita a uma influência atmosférica diferenciada, devido os ciclos de precipitação modificarem-se em meio aos eventos de intensos ventos do El – Niño (MARENGO; DIAS, 2006). Ainda, a circulação da atmosfera nos baixos e altos níveis, altera-se a partir dos aquecimento da água do mar, influenciando, dessa forma, o posicionamento latitudinal da ZCIT, enfraquecendo os ventos alísios leste – oeste na região equatorial. Todas estas variações regem as modificações dos parâmetros de deslocamento de umidade e, como consequência, promovendo a diminuição do volume de água a qual apresenta propensão à seca.

A importância deste evento para a moderação da oscilação interanual do clima sobre a Amazônia, ocasiona vazão de pico nos meses de Junho e Julho na estação pluviométrica de Óbidos, além disso, a precipitação está em torno de $2.000 \text{ mm.ano}^{-1}$, de modo que, o trecho da foz do rio Amazonas e o setor noroeste da Amazônia exibem precipitação anual $> 3.000 \text{ mm}$ e de acordo com Limberger e Silva (2016), a precipitação enfraquece no sentido do Equador às regiões subtropicais com índices abaixo de 1.000 mm .

A região amazônica apresenta regime de precipitação do tipo monção bem estabelecido, visto que apresenta alguns aspectos como: períodos de inverno seco e verão chuvoso, circulação leste-oeste produzindo uma ampla brisa, o estabelecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul, corrente de jato em baixos níveis, dentre outras características. A circulação de monção é causada a partir de um específico aquecimento entre o continente e os oceanos adjacentes em razão de suas distintas propriedades termodinâmicas (GAN et al., 2009).

As monções podem ser definidas como células de circulação de brisa, as quais dão-se em larga escala, de tal forma que o continente exhibe maior temperatura em relação ao oceano para o mesmo quantitativo de insolação, configurando um cenário de anomalias de convergência do ar com baixos níveis de uma baixa pressão acometida sobre o continente nos períodos de primavera e notadamente no verão do hemisfério (GAN et al. op cit.)

Os eventos de acentuada precipitação podem surgir a partir dos diversos fenômenos meteorológicos, com notoriedade aos casos de tempestades isoladas, as linhas de instabilidade, os complexos convectivos de mesoescala, as frentes frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS (SEABRA, 2004). A ZCAS tem significativo papel na escala intrasazonal que ocorre ao longo do verão na América do Sul em meio às ocorrências de estiagem longa assim como cheias que afetam várias áreas do país.

Em meio ao verão, um seguimento de nebulosidade distinguida por convergência de ar na baixa troposfera, abrange-se desde a Amazônia até o sudeste do Brasil em direção noroeste – sudeste, chegando ao oceano Atlântico Sul Tropical e compõe a Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS, que por consequência, acarreta elevados índices pluviométricos durante o verão mediante a intensa atividade convectiva sobre o sudeste da bacia amazônica (CARVALHO et al., 2010).

1.5.4 Ventos

A PCIA é marcada pela influência de ventos alísios de Nordeste (NE) e de Sudeste (SE), os quais predominam na região equatorial e convergem na ZCIT, a qual muda latitudinalmente ao longo do ano entre os meses de agosto – setembro, mais ao norte, e entre março – abril perto ao Equador (WATANABE, 2014), com velocidades entre 5 e 10 m.s⁻¹, com máximo no período de dezembro a abril quando se somam aos alísios de SE (CANDELA et al., 1990; GEYER et al., 1991).

Os ventos sinóticos e locais são sensíveis à variação da ZCIT, o que promove a mudança de direção e intensidade do vento, assim como sistemas meteorológicos e as marés, dirigindo-se da costa amazônica à PCIA com aspectos de onda estacionária (SEGUNDO, 2007).

1.5.5 Hidrologia

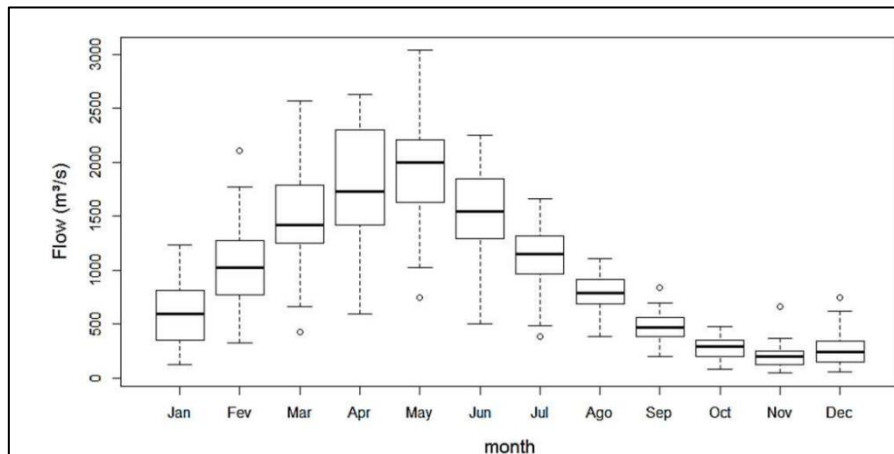
A bacia amazônica possui extensão de 6,3 10⁶ km² de área de drenagem, onde ocorre oscilação da vazão do rio Amazonas, devido a dependência transitória de seus rios tributários e da variação pluviométrica das áreas de alto, médio e baixo curso do rio, com descarga de 209.000 m³.s⁻¹ em sua foz (FILIZOLA; GUYOT, 2011; TARTARI, 2017; CORREA, 2019).

- Descarga Hídrica

O rio Amazonas aporta uma descarga hídrica de $5.7 \times 10^{12} \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$, com média de $180.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e pode alcançar máximas e mínimas, respectivamente, de $220.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ em maio e $100.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ em novembro. O Canal Norte do rio Amazonas pode desempenhar uma descarga máxima de $160.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, significando cerca de 65 % do fluxo de descarga (TORRES; EL – ROBRINI; COSTA, 2018).

A Zona Costeira do Estado do Amapá (ZCEA) recebe os efeitos fluviais do rio Amazonas e exibe extensão de 400 km e compreendida entre a foz dos estuários dos rios Oiapoque e Araguari. A descarga hídrica do rio Araguari é alimentada de dois afluentes predominantes: o rio Amapari, o qual contribui ao rio Araguari 1/3 de sua vazão; e o rio Falsino, colaborando com 1/4 da vazão do rio Araguari, os demais afluentes fornecem cerca de 10 % da vazão em sua totalidade a jusante (CUNHA et al., 2014; SANTOS; CUNHA, 2021). A vazão do rio Araguari apresenta valor mínimo de $155,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (dezembro) e máximo de $3.415,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (maio) (figura 8) (SANTOS; CUNHA, 2021).

Figura 8 - Vazão do rio Araguari na Estação Fluviométrica de Porto de Platon, de Janeiro de 1952 a Agosto de 1958 e de Junho de 1972 a Novembro de 2015.



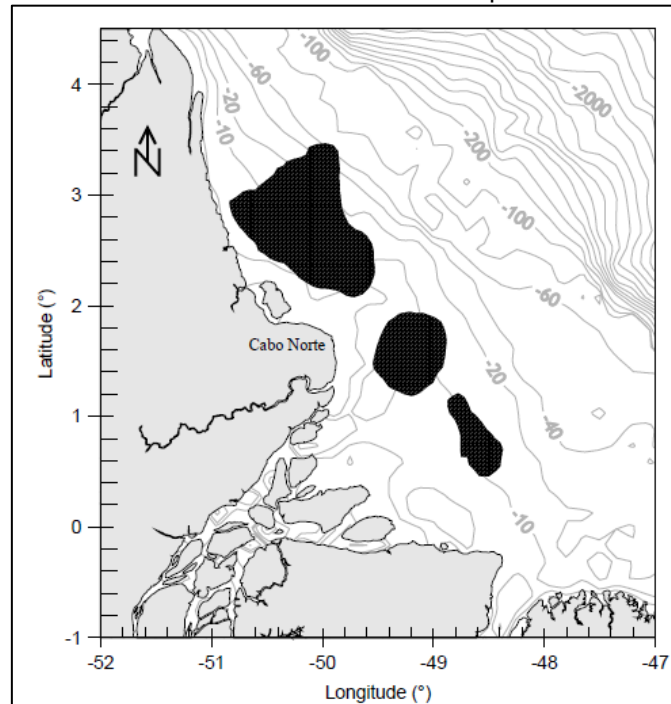
Fonte: Santos e Cunha (2021).

- Descarga Sólida

A bacia amazônica contribui em torno de 82 % da substância sólida em suspensão trazida pelo rio Amazonas até à foz e o provimento de seu material em suspensão à Plataforma continental do Amazonas é estimada em $1,1$ a $1,3 \times 10^9 \text{ ton.ano}^{-1}$ (LIMA, 2003; CUNHA et al., 2021).

O rio Amazonas atua na formação de uma das costas lamosas, com 1600 km, compreendida entre a foz dos rios Amazonas e Orinoco, onde 85 % a 95 % do material despejado pelo Amazonas é constituído de silte e argila, com considerável parcela movida em suspensão (figura 9) e contribui com uma carga sedimentar entre 7 % e 9 % para os oceanos (TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018; ANTHONY et al., 2021).

Figura 9 - Distribuição de Lama Fluida ao longo dos quatro cruzeiros do Projeto Amassed de acordo com a dinâmica de sedimentos em suspensão.



Fonte: Vilela (2011).

1.6 GEOMORFOLOGIA DA PCIA

A PCIA está limitada pela isóbata de 40 m, é plana com gradiente de 1: 4000 e é recoberta por sedimentos lamosos sujeita às taxas de sedimentação com índice de 10 cm.ano⁻¹, expressando a elevada descarga hídrica/sólida do rio Amazonas. Nas áreas do setor costeiro oceânico e da PCIA a sedimentação pode apresentar taxa de acumulação de ≥ 2 cm/d, com erosão periódica da camada superficial (NITTROUER; DEMASTER, 1996; GUIMARÃES et al., 2017; TORRES; EL-ROBRINI; COSTA., 2018).

As forçantes como as descargas hídrica/sólida do rio Amazonas influenciam diretamente ao tipo de sedimento no Canal do Varador, de modo que a hidrodinâmica do rio Amazonas desempenha importante papel na caracterização da zona em torno à ilha de

Maracá, influenciando nos processos de erosão e deposição, onde verifica-se a existência de sistemas de paleodrenagens de direção NNE-SSW (SANTOS et al., 2016).

1.7 PARÂMETROS OCEANOGRÁFICOS

1.7.1 *Maré*

A PCIA é influenciada por marés semidiurna com maior ação da M2 (período de 12,42 horas), de modo que, associada às demais principais componentes semi - diurnas, isto é, S2 (período de 12 horas) e N2 (período de 12,66 horas), atuam na variação de elevação do nível do mar na área de estudo em torno de 85 % (GURGEL, 2015). De acordo com este autor, em decorrência da ressonância, a maré M2 aproxima-se de uma onda estacionária amortecida com elevadas amplitudes de 1,5 m à 3,5 m nas proximidades da ilha de Maracá.

Inserido na PCIA, tem-se o Canal do Varador que se estende desde ao norte próximo à foz do rio Amapá Grande até ao sul nas proximidades de Cabo Norte, 800 km a montante da foz do rio Amazonas, onde também são observadas perturbações na linha d'água devido à maré (SANTANA, 2011). No Canal do Inferno (Ilha do Maracá), a maré pode variar entre 9 m e 12 m, com diminuição rumo à foz do estuário do Oiapoque e a parte interna do estuário do rio Amazonas, durante a sizígia, a hipermaré (MUEHE, 2018).

1.7.2 *Corrente de maré*

As correntes de maré na PCIA são caracterizadas por duas componentes, isto é, o fluxo de submaré ao longo da costa e o fluxo de maré semidiurno, barotrópico, além disso, dispõe de velocidade máxima de 2 m.s^{-1} para maré de sizígia e $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ em meio a maré de quadratura, onde o fluxo de submaré está submetido à cisalhamento mediante as intensas correntes superficiais de direção noroeste; em contrapartida, o fluxo de submaré de fundo é fraco, de forma que ambos os fluxos alcançam velocidades de até $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ e $0 - 0,2 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente (GEYER et al., 1991; TORRES; EL-ROBRINI; COSTA, 2018).

1.7.3 *Pororoca*

Durante os períodos de maré de sizígia as águas do mar elevam-se de forma considerável e avançam em direção ao estuário amazônico. As águas fluviais divergem ao

sentido da maré montante ao início da preamar, apresentando resistência e elevação do nível das águas fluviais até o rompimento do equilíbrio das forças contrárias. Esta dinâmica origina o que se chama de “onda de maré”, a qual inverte a correnteza na superfície do rio (SOARES, 1997). A zona estuarina amapaense apresenta ocorrência de pororoca na foz dos estuários dos rios Cassiporé, Cunami, Amapá Grande, Araguari, Calçoene, Gurijuba e Amazonas (COSTA; TORRES, 2000; ANTHONY et al., 2021).

1.7.4 Ondas

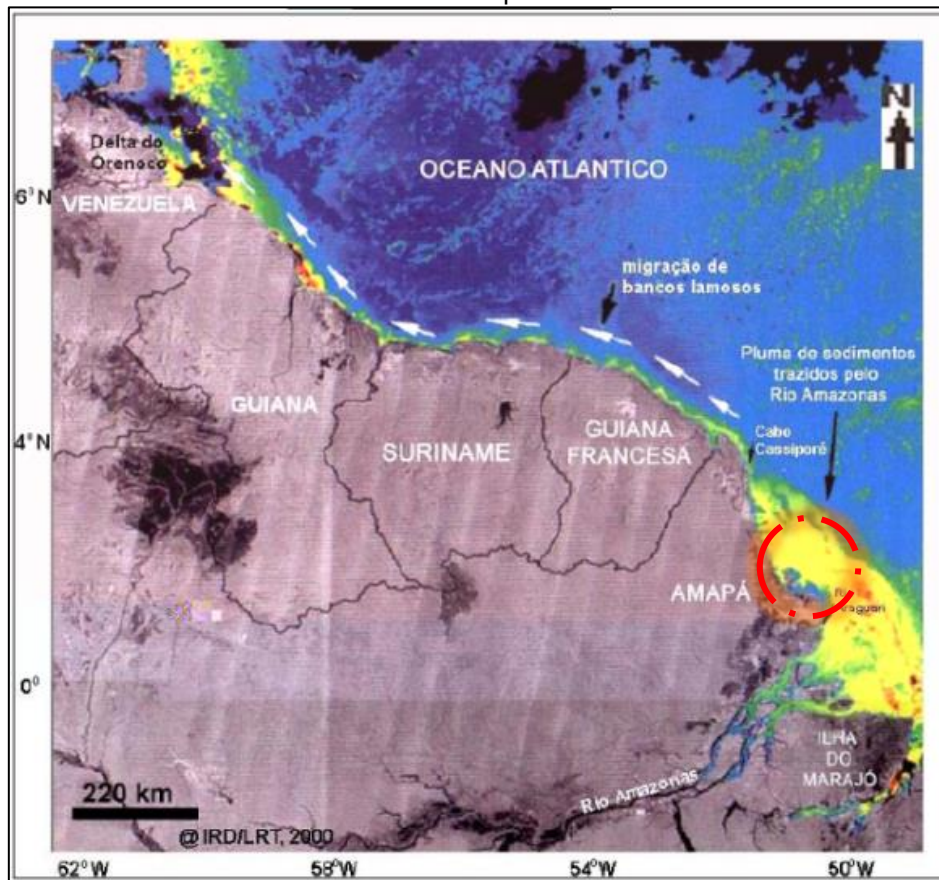
Na foz do estuário do rio Amazonas, as ondas superficiais são geradas a partir de ventos alísios de nordeste (NITTROUER et al., 1986), com amplitude média entre 1 e 2 m e até 3 m em fevereiro e velocidade de 30 cm.s^{-1} (TORRES; EL – ROBRINI; COSTA, 2018). Segundo Trombeta (2019), os ventos alísios de sudeste e nordeste podem ocasionar ondas inferiores a 1,5 m e de 3 m na zona oceânica do Amapá e 0,6 m próximo da costa durante o verão (CACHIONE et al., 1995; GUIMARÃES et al., 2019; TROMBETTA, 2019).

1.7.5 Pluma estuarina

A descarga sólida do rio Amazonas e o retrabalhamento energético de fundo acarreta em uma certa abrangência sedimentar em processos ambientais como o que é levado pelas correntes, estando sujeitos à distribuição das lamas fluidas (ANTHONY et al., 2021). A pluma de sedimentos e água doce abrange uma área de 100 a 200 km da costa, com alteração consoante ao tempo e espaço em detrimento da mutuabilidade da descarga do rio, da Corrente Norte do Brasil e das marés. Logo, o sistema de dispersão amazônico fornece sedimentos lamosos que alimentam toda a extensão da costa do Amapá. (SANTOS, 2006).

A pluma de sedimentos do rio Amazonas na PCIA é orientada conforme a Corrente Norte Brasileira (CNB) (figura 10), e faz que sejam depositados na extensão da costa ocidental, isto é, varia consoante a vazão do rio (figura 15)(SANTOS, op cit.; VILELA, 2011). Segundo Torres, El – Robrini e Costa (2018), a pluma estuarina é composta de material particulado e permuta-se horizontalmente de 2300 mg/L até chegar à 10 mg/L abastecendo de sedimentos a PCIA. Em conformidade com Lentz e Limeburner (1995), a pluma fluvial, decorrente da descarga do rio Amazonas, apresenta baixa salinidade. Verificou-se que a pluma dispõe de 3 – 10 m de espessura e 20 – 200 km de largura.

Figura 10 – Mosaico de Imagens de radar de Satélite Jers (1995) e do NOAA (nov/1999). Sistema de dispersão do rio Amazonas e a influência de sua pluma até o Delta do Orenoco na Venezuela.



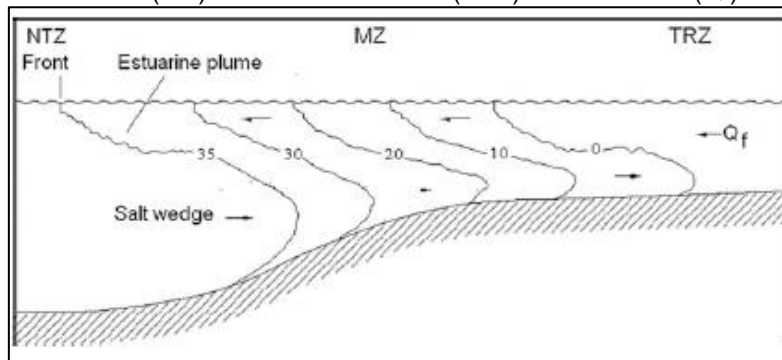
Fonte: Santos (2006).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTUÁRIOS

O termo estuário tem origem do latim “aestuarium” e quer dizer pântano ou canal, além disso, “aestus” significa maré ou movimento ondulante e é largamente utilizado e indispensável devido seu valor comercial, ambiental e científico (WOLANSKI et al., 2012; VALENTIM, 2016). Entende-se por estuário, um corpo de água semifechado na região costeira, com livre interação com o oceano, isto é, como uma “entrada” do mar, tornando-se dentro do vale do rio o quão distante a maré percorre o limite superior do rio, subdividindo ou classificando o estuário em três setores (figura 11) (DABORN; REDDEN, 2018).

Figura 11 - Seção longitudinal de um estuário com os três setores: zona marinha ou costeira (NTZ), zona de mistura (MZ) e zona fluvial do rio (TRZ). Vazão do rio (Q_f).



Fonte: MIRANDA et al. (2017).

Quanto à classificação, podem ser distinguidas como: i) marinha ou de baixo estuário com livre conexão ao mar aberto; ii) médio estuário, suscetível à mistura entre água salina e doce; e iii) zona superior ou fluvial, diferenciada pelo predomínio de água doce mas sujeita à ação diária da maré (LESSA et al., 2018).

Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com acesso livre para o mar aberto, por onde a água do mar adentra e é diluída com a água doce advinda da drenagem terrestre, definida como uma entrada do mar que se estende até o vale de um rio até o limite superior da elevação das marés, sendo geralmente divisível em três setores: a) inferior, com acesso para o mar aberto; b) estuário médio sujeito à mistura de água doce com a água salgada; e c) estuário superior ou fluvial (ELLIOTT; MCLUSKY, 2002).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ESTUÁRIOS

Um estuário advém das interações entre a água doce terrestre e a água oceânica, onde essa dinâmica é influenciada por fatores como: geomorfologia do estuário; variação

sazonal no fluxo do rio, precipitação e temperatura; e mudanças temporais dos ventos e marés, o que resulta em estuários de características únicas (DABORN; REDDEN, 2018). De acordo como estes autores, uma classificação simples baseia-se no quantitativo de água doce que entra no estuário e na quantidade de água cedida devido a evaporação. O estuário pode ser do tipo positivo (mais água doce entra do que evapora em um determinado momento), onde a salinidade em todo o estuário é menor em relação ao oceano adjacente. Para um estuário negativo, ocorre o oposto, a evaporação ultrapassa o influxo de água doce (MIRANDA et al., 2017; DABORN; REDDEN, 2018).

2.2.1 Com base Geomorfológica

Conforme os processos geomorfológicos, os quais constituem o estuário, a classificação subdivide-se em: i) estuário de vales inundados; ii) estuário do tipo Fiorde; iii) estuário de frente de barreira arenosa e; iv) estuário de origem tectônica (MIRANDA et al., 2017; LESSA et al., 2018).

i) Estuário de vale inundado, também pode ser designado como estuário de planície costeira. Vale mencionar que a principal característica deste tipo de estuário é ser levemente raso, não excedendo 30 m de profundidade. Além disso, o fundo é constituído por sedimentos finos no trecho superior (LESSA et al., op cit.).

ii) Estuário do tipo Fiorde: é um estuário de alta latitude, situado em regiões montanhosas (Pleistoceno). Caracteriza-se por apresentar profundidade considerável e, por outro lado, possui relação largura/profundidade baixa se comparado ao estuário de vale inundado. Este tipo de estuário possui fundo em forma de U com depósitos morênicos na foz (DABORN; REDDEN, 2018).

iii) Estuário de frente de barreira arenosa: Este tipo de estuário expõe área extensa e rasa, a qual é separada do oceano por uma ilha barreira arenosa, paralela à costa, com uma ou várias conexões ("inlets") (DABORN; REDDEN, 2018).

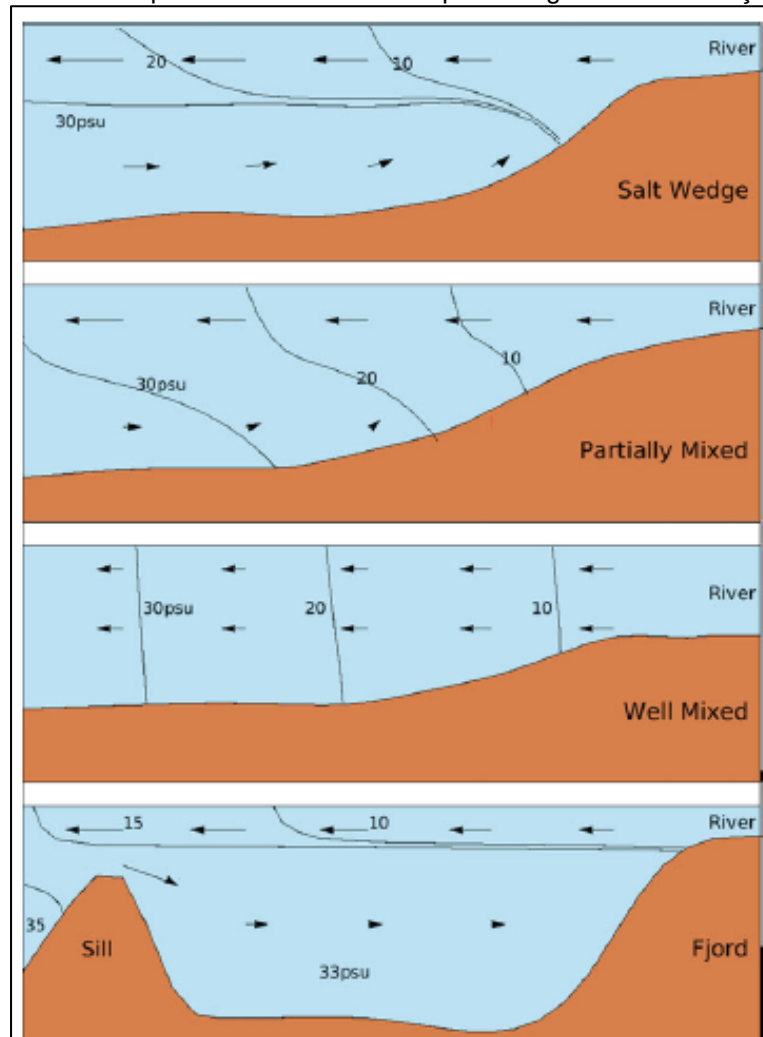
2.2.2 Com base na Estratificação de Salinidade

Os estuários de acordo com a salinidade podem ser do tipo: intensamente estratificado, parcialmente misturado, verticalmente e lateralmente homogêneo (LESSA et al., 2018). O modelo de classificação por estratificação e circulação decorrem dos resultados de estudos

teóricos, os quais são diretamente dependentes da verificação dos coeficientes turbulentos de viscosidade e difusidade.

A determinação da salinidade e as distribuições de correntes de maré em estuários relativamente mistos e bem misturados, em planície costeira, podem ser definidas com auxílio de relações entre os parâmetros de massa de correntes de maré, fluxo de rio, geomorfologia e coeficientes (figura 12) (DABORN; REDDEN, 2018).

Figura 12 - Classificação estuarina conforme padrões de circulação e estrutura de salinidade. Os valores representam níveis típicos de salinidade com padrões gerais de circulação.



Fonte: Daborn e Redden (2018).

Os estuários classificados de acordo com a estratificação de salinidade, a qual advém da influência da gravidade à variação de densidade entre as águas doce e oceânica, podem ser designados como “altamente estratificados, parcialmente mistos ou moderadamente

estratificados e bem misturados ou verticalmente homogêneos para expressar a estratificação relativa de salinidade” (DABORN; REDDEN, 2018). A estratificação vertical da salinidade, assim como a circulação estuarina, são causadas pela água doce.

a) Altamente estratificado

Nesse tipo de estuário o fluxo fluvial é predominante sobre a maré e se distingue pela estratificação, de modo que, a água do mar adentra no estuário na forma de cunha salina ficando cada vez mais estreita à medida que direciona-se ao rio, apresentando maior densidade em relação à água doce, a qual ocupa a região superficial do volume e segue rumo ao mar, constituindo duas camadas distintas conforme suas densidades e causando forçantes internas que provocam a mistura das camadas em sentido ascendente (DABORN; REDDEN, 2018).

b) Moderadamente estratificada

Esse tipo de estuário é caracterizado por ser raso e largo com proporções maiores em comparação aos estuários de cunha salina. Além disso, os estuários moderadamente estratificados, exibem gradiente de salinidade na camada intermediária. Outro dado é a erosão da haloclina causada por maré. Estuários desse tipo expõem estratificação extremamente variante, além de que, dependendo da amplitude das correntes de maré e do volume da descarga fluvial, demonstram uma gama de amplitudes de salinidade vertical (DABORN; REDDEN, 2018).

c) Verticalmente homogênea

A estratificação em estuários desse tipo é caracterizada por estarem sujeitas à elevadas amplitudes de maré, assim como baixa atuação de fluxo e de correntes cisalhantes no fundo, proporcionando uma leve estratificação vertical de salinidade, o que origina o termo verticalmente homogêneo (DABORN; REDDEN, op cit.).

d) Lateralmente homogêneo

Segundo Pritchard (1989), para configurações estreitas, observa-se que o cisalhamento lateral em dados casos, poderá ser o bastante para resultar em um estado lateralmente homogêneo. O gradual desenvolvimento da salinidade ao longo do estuário seguindo um mediano movimento em todas as profundidades do estuário.

Os estuários podem ser classificados de acordo com a troca de salinidade resultante da relação de balanço salino, de maneira que, os padrões podem ser definidos segundo a demonstração da equação de advecção / difusão do sal (PRITCHARD, 1989):

$$\frac{d_s}{dt} = -U \frac{d_s}{dx} - V \frac{d_s}{dy} - W \frac{d_s}{dz} + \frac{d}{dx} \left(K_x \cdot \frac{d_s}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(K_y \cdot \frac{d_s}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_z \cdot \frac{d_s}{dz} \right) \quad (1)$$

Sendo:

$\frac{d_s}{dt}$ – a taxa instantânea de câmbio de salinidade;

s – corresponde à concentração de sal;

U, V e W – simbolizam as componentes de velocidade;

K_x, K_y e K_z – denotam a difusibilidade da direção axial.

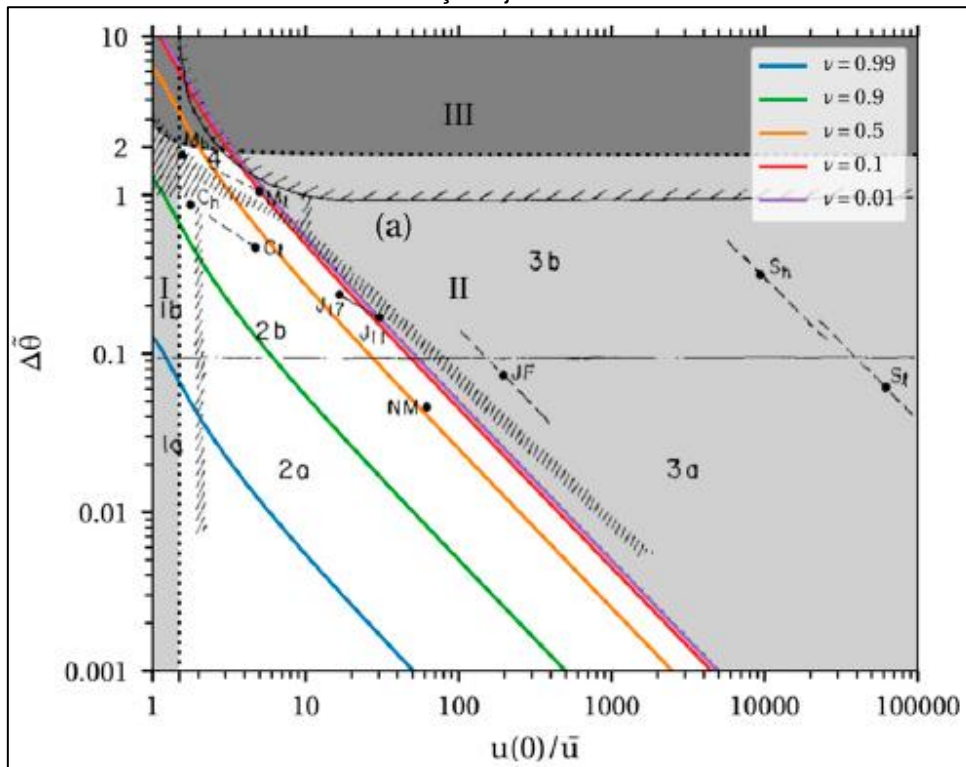
Assim, a equação explana o desenvolvimento da advecção referente aos três termos iniciais do lado direito da expressão e da difusão, restante da expressão.

No passado, partia-se do pressuposto de uma estratificação de salinidade traduzida de forma dinâmica, onde os estuários bem misturados apresentavam fluxo rumo ao mar em sua profundidade integral e o deslocamento salino ocorresse por difusão horizontal e a reversão do gradiente de pressão com a profundidade nos estuários parcialmente mistos continham apenas uma corrente à montante na camada de fundo (DIJKSTRA; SCHUTTELAARS, 2021).

2.2.3 Com Base no Diagrama de Circulação - Estratificação

Dijkstra e Schuttelaars (2021) propõem definir a classificação dos estuários uniformemente conforme seu regime, estrutura de fluxo ou estrutura de salinidade (figura 13).

Figura 13 - Diagrama de Classificação de Hansen e Rattray (1966) sobreposto ao diagrama de circulação - estratificação ajustados.



Fonte: Dijkstra e Schuttelaars (2021).

Conforme representado no diagrama de classificação, alguns tipos de estuários de acordo com as variações temporais da descarga fluvial aos estuários e a dinâmica dos períodos de maré, quadratura e sizígia: 1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b, e 4 somado à solução corrigida do diagrama, onde, o tipo 1 equivale à estuários de fluxo unidirecional direcionado para o mar em toda sua coluna de água, com transporte de sal realizado devido ao processo de difusão turbulenta. O tipo 2 representa estuários de fluxo bidirecional, de modo que os termos “a” e “b” indicam pequena e grande estratificação, respectivamente. Possuem processos advectivos e de difusão turbulenta, de grande importância ao transporte de sal com fluxo resultante oposto ao da coluna d’água (NEVES et al., 2021).

O tipo 3 é específico aos estuários dominados pela dispersão de cisalhamento em decorrência da circulação gravitacional e, por último, o tipo 4, é definido como estuários de cunha salina de considerável estratificação (HANSEN; RATTRAY, 1966; DIJKSTRA; SCHUTTELAARS, 2021; NEVES et al., 2021).

Os modelos sugerem que os estuários com alta vazão são estuários fortemente estratificados ou do tipo cunha salina com forte variabilidade ao longo do ciclo de marés e, atrelado à influência das marés, os estuários desempenham um regime de maior dispersão no diagrama de classificação (DIJKSTRA; SCHUTTELAARS, 2021).

2.2.4 Com base na amplitude de maré

Os estuários podem ser de micromaré, mesomaré, macromaré e hipermaré. O que diferencia os tipos de estuários, além da amplitude de maré, é a influência das forçantes de transporte de sedimentos e correntes de marés como definido por Daborn e Redden, 2018:

- ✓ **Estuários de micromarés** - Exibem pequenas alturas com 0 a 2 m de maré e são fortemente caracterizadas pela influência das ondas de tempestade, vento e correntes;
- ✓ **Estuários de mesomarés** - São estuários de marés intermediárias (2 - 4 m) com correntes de marés, resultando em deltas de marés e corpos de areia típicos;
- ✓ **Estuários de macromarés** - São estuários sujeitos à marés com altura maior de 4 m. Podem ser descritos como estuários de foz larga e em forma de funil, os quais contêm corpos de areia lineares, distendidos e concomitantes à corrente de maré, localizados na parte central do estuário;
- ✓ **Estuários de Hipermaré** - São estuários com faixa de maré média superior a 6 m, sujeitos à marés extremamente altas, resultando em alguns casos, da ressonância entre as características do estuário, em detrimento da profundidade e comprimento, e o ciclo de maré oceânica (DABORN; REDDEN, 2018).

2.2.5 Com base na sedimentação

Parâmetros sedimentológicos nos sistemas de classificação de estuários são determinados à medida que a bacia sedimentar é exposta aos efeitos do grau de acréscimo de sedimentação, podendo caracterizar a bacia sedimentar como positiva, inversa ou neutra, assim, os estuários providos de sedimentos de origem fluvial, são chamados de

positivo, também conhecidos como “*positive filled*”, característicos em estuários de águas temperadas (LESSA et al., 2018).

Já os estuários de suprimento inverso (“*inverse filled estuary*”), resultam da diferença de carga de sedimentos entre a baixa quantidade de sedimento proveniente do sistema fluvial e a elevada deposição de sedimentos advindos de praias ou da costa oceânica, provenientes das marés de enchentes. Por outro lado, estuários que apresentam certo equilíbrio são denominados de “*neutral filled*”. Tais estuários possuem sedimentos de origem litorânea local ou do leito do fundo (LESSA et al., op cit.).

2.3. MARÉS E PADRÕES HIDRODINÂMICOS

O comportamento das marés está diretamente relacionado à interação entre a força gravitacional da lua e do sol com a superfície dos mares. Em decorrência disso, dá-se o movimento vertical da massa de água, que gera a maré e conseqüentemente a deslocação horizontal causando as correntes de maré (MIGUENS, 2019).

O estudo da maré é de alta relevância tanto para navegação em locais de águas restritas como para embasamento para definições de projetos, isto é, quais áreas são mais apropriadas para construção de portos e canais, de modo que haja uma efetiva segurança na navegação. A partir desta breve explanação, vale dizer que é indispensável compreender os conceitos básicos de maré, do mesmo modo, pode-se dizer em relação processo de interação das forças de atração da Lua e do Sol e tipos de marés.

2.3.1 Marés de Sizígia e de Quadratura

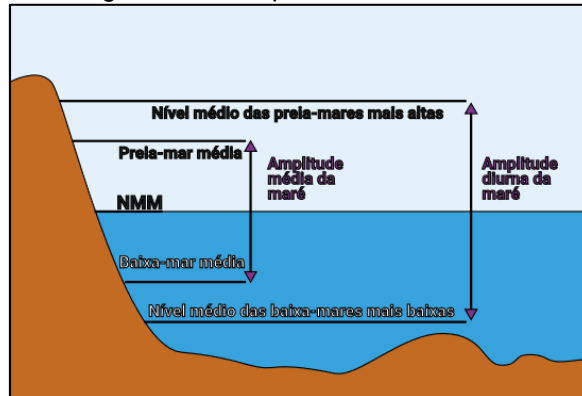
Segundo Miguens (op cit.), para entender o funcionamento das marés é necessário saber como se dá a influência das forças de atração do Sol e da Lua em meio suas fases, visto que, a Lua Nova e a Lua Cheia ocasionam as marés de sizígia, produzindo preamares⁶ (PM) elevadas e baixas - marés⁷ (BM) muito baixas, de modo que, neste caso, as forças de atração se somam.

⁶ **Preamares (PM)** – corresponde à maior altura das águas em uma oscilação (MIGUENS, 2019).

⁷ **Baixa – Mar (BM)** – corresponde à menor altura das águas em uma dada oscilação (MIGUENS, 2019).

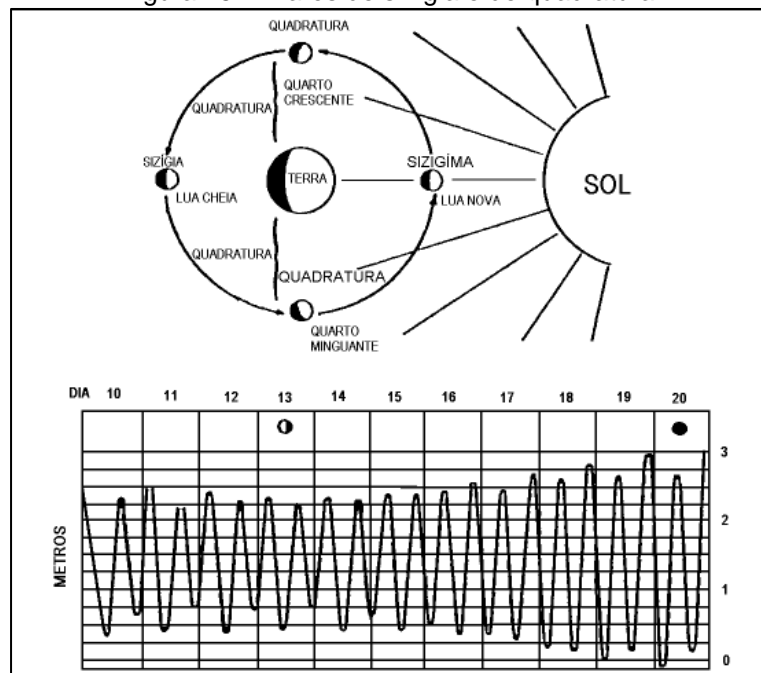
Por outro lado, as forças de atração da Lua e do Sol opõem-se em dois momentos, no quarto crescente e no quarto minguante da Lua com maré de quadratura. A partir disso, a fim de ampliar o entendimento da variação do nível das águas, é oportuno analisar a oscilação rítmica de uma região em um dado intervalo (figuras 14, 15).

Figura 14 - Componentes das marés.



Fonte: tabuademares.com (2022).

Figura 15 - Marés de sizígia e de quadratura.



Fonte: Miguens (2019).

Dessa maneira, observa-se no eixo vertical a representação das alturas de maré e no eixo horizontal os pontos de referência de cada instante na ocorrência das elevações. Inicialmente há um período de “enchente” referenciado no Nível Médio (NM) de oscilação

da maré e, posteriormente, alcançará um nível máximo indicado pela Preamar (PM), passando um intervalo estacionado conhecido como “estofo de enchente” (NETO et al., 2011).

A contar deste ponto, o nível das águas durante algum tempo ocasiona a vazante, para então atingir o menor nível de oscilação, conhecido como Baixamar (BM), estacionando o nível por certo período, intitulado “estofo de vazante”, para em seguida, retornar o ciclo de enchente.

Em síntese, pontua-se que a interação das forças gravitacionais entre a Terra, Lua e Sol determinam as seguintes características das marés e podem ser mais bem compreendidas (tabela 1) (NETO et al., 2011; SOUSA, 2018):

- ✓ As marés altas sucessivas apresentam um intervalo de 12h24 min;
- ✓ Sucedem-se 706 marés no ano;
- ✓ As marés altas decorrem 50 min mais tarde a cada dia;
- ✓ Um ciclo de maré tem a duração de 14 dias;
- ✓ O estágio de refluxo supera o de fluxo.

Tabela 1 - Casos de variação do nível do mar em decorrência das marés e suas respectivas escalas temporais.

(continua)

Razões	Escala Temporal, onde P = período	Contexto
Deslocamento da Lua pela longitude local	6 ~12 h P	Variação diária de Baixamar e Preamar.
Alinhamento do Sistema Lua - Sol - Terra	~14 dias	Marés de sizígia um ou dois dias, após as luas Nova e Cheia; e marés de Quadratura, nas luas crescente e minguante.
Equinócios e Solstícios	6 meses	Em 21 de março, 21 de junho, e 23 de setembro e 22 de dezembro (no ano de 2002).
(conclusão)		
Apogeu e Perigeu	~14 dias	Neste caso, a lua pode estar próxima ou mais distante da Terra.

(conclusão)

Movimentos médios da lua e do sol, isto é, ciclo da revolução dos nodos.

18,5 anos

Representa o arranjo Terra - Sol - Lua o qual retorna à mesma disposição.

Ventos (marés meteorológicas)

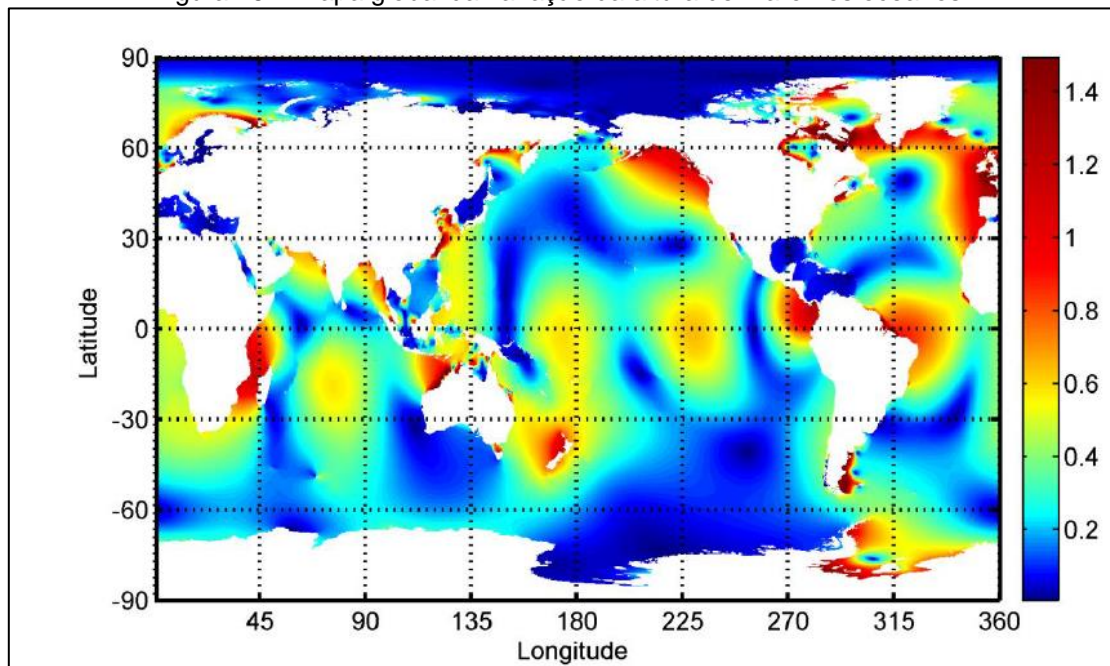
-

Está relacionado à variação de pressão nas proximidades da Costa.

Fonte: SANTOS, (2006)

Assim, as marés exibem três padrões de período: maré diurna, com período de 24h e 50min, maré semidiurna, com período de 12h e 25min e padrão de maré mista, com subsequentes marés altas e/ou baixas com picos diferentes (JUNG, 2015). A partir da compreensão de como se dá a variação da altura de maré (figura 16) é possível localizar as regiões de maiores alturas de marés.

Figura 16 - Mapa global da variação da altura de maré nos oceanos.



Fonte: OES (2011 apud JUNG, 2015, p. 9).

2.4 TRABALHOS SOBRE PROSPECÇÃO DE ÁREAS COM POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE CORRENTES DE MARÉ

Estudos de potencial energético renovável a partir da modelagem hidrodinâmica foram desenvolvidos na Amazônia, Brasil e em diversas regiões no mundo, à exemplo, Czizeweski et al. (2020), que identificaram áreas com potencial de energia das correntes.

Oliveira et al. (2021) analisaram o potencial de geração hidrocínética no rio Amazonas e seus afluentes, onde foram identificados locais com correntes de maré contínuas e as profundidades para instalação de turbinas, além de calcular o potencial hidrocínético para geração de eletricidade. O estudo também aborda a viabilidade e os desafios relacionados ao desenvolvimento de tecnologia de energia hidrocínética no Brasil e em outras regiões, considerando os impactos ambientais.

Sood e Singal (2022) objetivaram desenvolver um modelo para a avaliação do potencial de energia hidrocínética presente na rede de canais com aplicação de simulações numéricas transitórias tridimensionais e simulações numéricas relacionadas às dimensões reais do rotor e do canal a fim de verificar o impacto da operação hidrocínética do rotor no comportamento hidráulico do canal sob diferentes velocidades de fluxo.

Santos et al. (2019) analisaram o potencial hidrocínético dos rios Jamari e Curu – Una (rio Amazonas). Este estudo sugere uma metodologia para estimar o potencial hidrocínético a partir de simulações numéricas e dados experimentais, mapeamento de regiões de alta velocidade, avaliação do potencial hidrocínético e definição de arranjo de turbinas no rio, assim como a viabilidade econômica da fazenda hidrocínética. Os autores apresentam também uma metodologia para modelagem computacional para regiões com potencial energético em rios e elaboraram um cálculo simples de custo nivelado de energia para avaliar a viabilidade econômica da geração de energia hidrocínética.

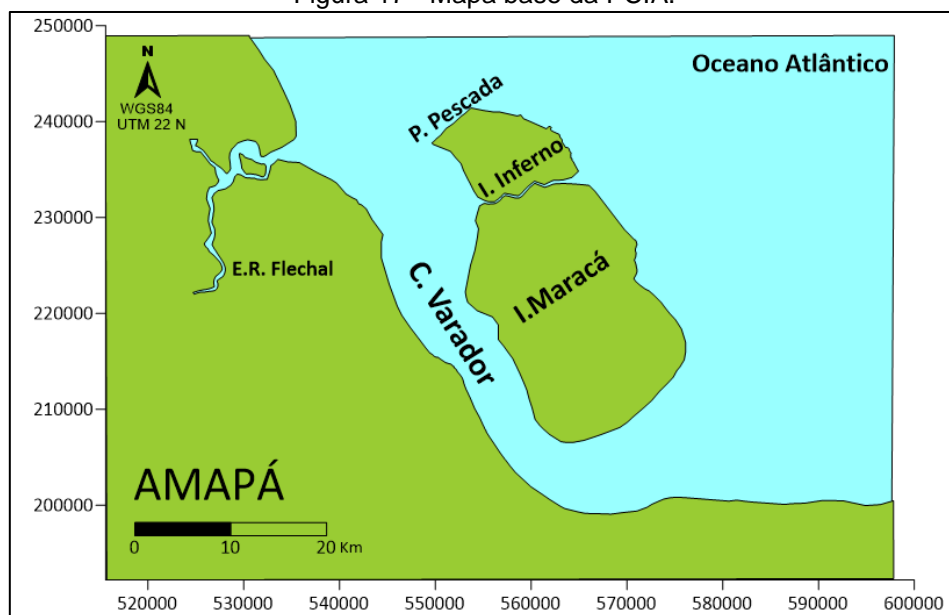
Ridgill et al. (2021) objetivaram estimar o potencial hidrocínético fluvial teórico global proveniente da conversão de energia hidrocínética. Estes autores utilizam um conjunto de dados de descarga diária modelados (período de 35 anos) e representação vetorizada de rios para determinação do rendimento médio anual de energia.

2.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHia pode ser utilizado para simulações de cenários em áreas costeiras, estuários, canais, rios, permitindo a compreensão da dinâmica dos processos nestes sistemas ambientais (ROSMAN, 2021).

As simulações computacionais desenvolvidas neste estudo abordaram a PCIA, incluindo o Canal do Varador. A fim de definir a zona de domínio de modelagem, foram delimitados os corpos d'água e parte da costa da PCIA, demarcando dois tipos de contornos: terra e mar para definição do mapa base da área de estudo (figura 17).

Figura 17 - Mapa base da PCIA.



Fonte: Autor (2023).

O INCT utiliza o sistema de base hidrodinâmica ambiental (SisBaHiA®) para a modelagem hidrodinâmica, o qual trata-se de um Sistema de modelos computacionais desenvolvido pela Fundação COPPETEC – COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro e, segundo Rosman (2021), o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA se enquadra na linhagem *Filtered in Space and Time* (FIST).

Algumas das características do SisBaHia confirmam a importância e flexibilidade dos métodos. Os esquemas numéricos dos modelos são bem estabelecidos, o que torna a

validade e aceitação mais acurada. Além disso, o vento e as condições de atrito no fundo do leito podem ser variáveis no espaço e tempo.

O modelo bidimensional (2D) possui somente as dimensões (x,y,t), e pode ser classificado por dois tipos: uma cuja dimensão considerada é a vertical (2DV) e outro cuja dimensão é a horizontal (2DH). No modelo 2DV são consideradas as dimensões na vertical (x, y, t) enquanto que no modelo 2DH são consideradas as dimensões na horizontal (x, z, t). Normalmente se aplica corpos d'água que tem pouca estratificação lateral e estratificação predominantemente vertical. Normalmente são corpos d'água estreitos (ROSMAN, 2021) e, para o estudo, dá-se ênfase nos seguintes aspectos:

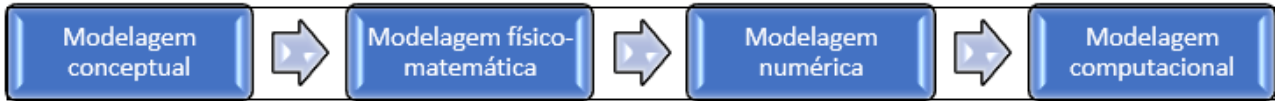
- I. Características relacionadas à circulação hidrodinâmica onde demonstrem maior influência das condições presentes;
- II. Aspectos referentes às possíveis alternativas disponíveis entre os campos de correntes de maré e as turbinas, elaborando modelos refinados que melhor representem as áreas pertinentes para utilização de tecnologias capazes de captar a energia proveniente do campo de correntes de maré.

Para isto, utilizou-se o SisBaHia versão 11b como plataforma do Sistema de modelagem, de modo que, a elaboração dos mapas deu-se através do Software Surfer, assim como o Software Grapher para desenvolvimento de gráficos, ambos utilizados pela interface do SisBaHia®.

A utilização dos modelos de simulação se deve ao fato de que estes geram uma resposta de um sistema a um conjunto de informações de entrada, que incluem regras de decisão, permitindo ao modelador examinar as consequências de diversos cenários de um sistema existente ou de um projeto a ser feito (LANNA, 1997). O processo de modelagem é representado pelo fluxograma que gera um relatório final o qual embasará as decisões a serem tomadas.

Para maior compreensão do fluxograma (figura 18), seguem alguns conceitos adaptados de ROSMAN (2021):

Figura 18 - Fluxograma do Processo de modelagem no SisBaHia.



Fonte: Autor (2023).

- **Modelo conceitual:** A modelagem conceitual corresponde a formar na mente a concepção do fenômeno observado, conhecer suas causas e efeitos, compreender as interações e relevância dos agentes intervenientes na sua ocorrência;
- **Modelo matemático:** A modelagem matemática consiste na tradução para a linguagem matemática do modelo conceitual do fenômeno de interesse;

Modelo numérico: Os modelos numéricos são traduções dos modelos matemáticos adaptados para diferentes métodos de cálculo, por exemplo, diferenças finitas, elementos de contorno, elementos finitos e volumes finitos;

- **Modelo físico:** Em geral, são modelos que reproduzem em escala reduzida, modelos conceituais de fenômenos de interesse, chamados de protótipos. Através de um modelo matemático de semelhança, definem-se as escalas de semelhança entre o protótipo e modelo físico reduzido;
- **Modelo computacional:** É a tradução de um modelo numérico para uma linguagem computacional que possa ser compilada e executada em um PC por um operador experiente.
- **Montagem, pré-processamento, definição de parâmetros e similares**

A partir da obtenção das informações quantitativas do modelo conceitual e matemático, o modelo é tratado e os dados de entrada são organizados.

- **Tabelas, mapas, gráficos e animações**

Os resultados quantitativos dos modelos desenvolvidos mediante o pré-processamento constituem as tabelas, mapas, gráficos, assim como animações conforme o objetivo do modelo.

- **Calibração e Validação**

No processo de modelagem a calibração e validação analisam os resultados, onde se têm duas situações:

Quando a validação não está de acordo com as medições, o modelo não está adequado e inicia-se o processo de calibração de maneira efetiva onde são possíveis dois casos a serem considerados. Calibrar o modelo através de ajustes de parâmetros e montagem, retificações dos dados de entrada e coeficientes ou voltar ao modelo conceptual, necessário caso ocorra repetidos falhas de validação do modelo (ROSMAN, 2021).

Segundo Rosman (op. Cit.), o passo inicial para calibração do modelo hidrodinâmico é verificar as escalas que caracterizam o fenômeno em escopo assim como as escalas de discretização do modelo para que estejam ajustados. O segundo passo é checar de maneira minuciosa a geometria do domínio de interesse para que esteja adequada em sua representação dos contornos da modelagem digital do terreno e batimetria do domínio para que seja evitado discretização inadequada, grosseira a ponto de impossibilitar a captura das feições geométricas que possam influenciar os dados e resultados do modelo. Assim como valores impróprios de profundidade ao longo dos canais estreitos, nos nós das ilhas e nos contornos.

O terceiro importante passo no processo de calibração refere-se às condicionantes de contorno e forçantes dos modelos. Logo, é necessário, que seja executada uma ampla verificação, outro passo fundamental para calibração, refere-se às variações dos níveis de água ou níveis de maré para os casos de corpos de água costeira, isto é, **calibração hidrodinâmica**: aferir se os modelos hidrodinâmicos representam adequadamente a variação de níveis de água e correntes na região de interesse sob diversas condições, sejam elas marés, ventos e vazões. É importante que estas informações sobre as forçantes da circulação hidrodinâmica local estejam corretas. O quinto passo está relacionado aos dados de velocidade das correntes, gerados a partir da ajustagem dos passos anteriores no modelo hidrodinâmico.

A validação do modelo computacional pode ser afetada conforme a obtenção e observação às saídas do sistema real, onde se deve provar o modelo de maneira integral,

sem levar em consideração erros isolados, o que resultará na confirmação da capacidade do modelo em representar as condições reais (ROSMAN, 2021; CUNHA et al., 2021). Após a validação estiver em conformidade com as características observadas, o modelo estará validado e o processo de modelagem finaliza-se com resultados a serem levados em conta para tomada de decisão.

Nesta dissertação, utilizaram-se os dados de amplitude de maré como parâmetro para validação do modelo mediante comparação das elevações geradas nas simulações para o período de 01/04/2021 à 30/04/2021 e nas elevações identificadas na estação maregráfica mais próxima (Porto de Santana - 00° 03'.4S - 051° 10'.9W).

2.5.1 Descrição do modelo Sisbahia

A partir da criação de malhas de elementos finitos sobre o domínio de interesse, faz-se a verificação matemática caracterizada pela discretização de um meio contínuo nos restritos elementos, preservando as particularidades do meio original. Para toda análise de sistema de modelos de circulação hidrodinâmica e de qualidade de água em corpos de águas naturais, tem-se como fundamento o modelo hidrodinâmico e junto disso, o SisBaHia dispõe de modelos que utilizam técnicas de filtragem espaço-temporal aprimorados para corpos de águas naturais (ROSMAN, 2021).

Além disso, caso não haja possibilidade de haver adequada calibração do modelo, o SisBaHia permite mitigar o processo de forma que se assegure a confiabilidade dos resultados. O sistema de modelo hidrodinâmico do SisBaHia é denominado FIST3D (*filtered in space and time 3D*), o qual refere-se a um eficaz modelo numérico hidrodinâmico formado por dois módulos, inicialmente examinando dados de elevação da superfície livre mediante modelagem bidimensional integrado na vertical, módulo 2DH, e posterior a isso o campo de velocidade.

Para análise de circulação hidrodinâmica em um escoamento bidimensional, há três aspectos a serem solucionados: as velocidades médias na vertical U e V nas direções x e y (figura 19) e o nível da superfície livre (ζ) conforme as seguintes equações (tabela 2) (ROSMAN, 2021):

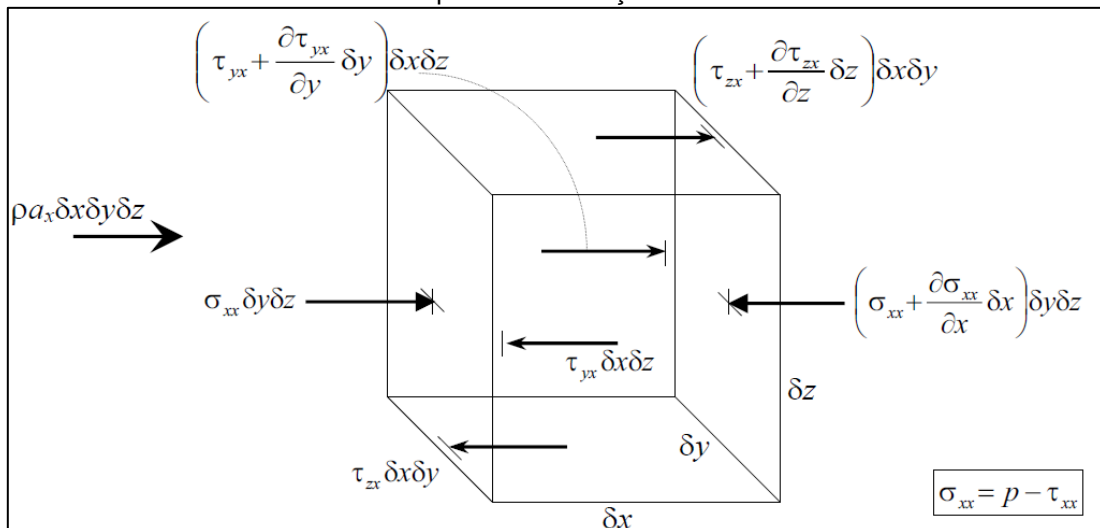
Expressão para quantidade de movimento 2DH para escoamento integrado na vertical, na direção y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + U \frac{\partial v}{\partial x} + V \frac{\partial v}{\partial y} - 2 \Phi \sin\theta U = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B) \quad (2)$$

Expressão para quantidade de movimento 2DH para escoamento integrado na vertical, na direção x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial u}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial y} - 2 \Phi \sin\theta V = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B) \quad (3)$$

Figura 19 – Representação das forças atuantes na direção x. O produto das tensões pela área no plano de contato representa as forças de contato.



Fonte: Rosman (2021).

Expressão da continuidade (volume) integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

De forma que:

g - Representa a aceleração da gravidade;

ρ_0 – Equivale a massa específica de valor constante;

H – Profundidade total espontânea;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ – Representam as tensões turbulentas na vertical;

τ_x^s e τ_y^s – Equivalem às tensões de atrito na superfície nas respectivas direções x e y;

τ_x^B e τ_y^B – Equivalem às tensões de atrito no fundo nas respectivas direções x e y;

Φ – Representa a velocidade angular de rotação da terra no sistema de coordenadas local e θ o ângulo de latitude.

Tabela 2 - Componentes da quantidade movimento 2 DH.

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento 2DH;
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH;
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	A variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão);
$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xz})}{\partial y} \right)$	Equivale ao resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento em um determinado instante;
$2 \Phi \sin \theta V$	Equivale à aceleração de Coriolis, referente ao movimento da terra;
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^s)$	Tensão no vento na superfície livre por unidade de massa;
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^B)$	Tensão de atrito no fundo atuante no escoamento por unidade de massa.

Fonte: Rosman (2021).

As simulações dos modelos hidrodinâmicos em regiões costeiras, estuários, rios e lagos que levam em consideração aspectos como vento na superfície livre e o atrito no fundo, os quais variam no tempo e no espaço, apresentam importância excepcional. Diante disso, o modelo hidrodinâmico SisBaHia destaca-se, uma vez que é possível especificar pontualmente o tipo de material de fundo e executar interpolações bi quadráticas dos dados de profundidade de rugosidade equivalente para aferição física do fundo da PCIA.

Os dados de rugosidade, devem estar relacionados diretamente à tensão de atrito no fundo, a qual está atrelada à amplitude de rugosidade equivalente de fundo, definida a partir

da natureza do sedimento do fundo da área a ser modelada. Assim, valores de rugosidade são fornecidos ao modelo hidrodinâmico em toda extensão do domínio (ROSMAN, 2021).

Os parâmetros de rugosidade selecionados nesta dissertação de mestrado basearam-se no estudo sobre sedimentos nas proximidades do Canal do Varador (XAVIER; BARCELLOS; SILVEIRA, 2016) e na PCIA. Usualmente é definido apenas um valor de rugosidade equivalente de fundo (ϵ) para rios ou estuário, onde os dados de composição do sedimentos de fundo estão especificados na tabela 3 (ROSMAN, 2021).

Tabela 3 - Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo.

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltes e finos	$0.0001\text{m} < \epsilon < 0.0100\text{m}$
Predominância de areias finas	$0.0070\text{m} < \epsilon < 0.0150\text{m}$
Predominância de areias médias	$0.0100\text{m} < \epsilon < 0.0300\text{m}$
Predominância de areias grossas	$0.0250\text{m} < \epsilon < 0.0500\text{m}$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400\text{m} < \epsilon < 0.0800\text{m}$
Predominância de areias com cascalho	$0.0500\text{m} < \epsilon < 0.1200\text{m}$
Sedimentos com vegetação	$0.0500\text{m} < \epsilon < 0.1500\text{m}$
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0.1500\text{m} < \epsilon < 0.4000\text{m}$

Fonte: Rosman (2021).

Onde a amplitude da rugosidade equivalente do fundo (ϵ) está diretamente ligada ao material que compõe o leito, de modo que o valor de tensão de atrito no fundo (τ_i) é dada por:

$$\tau_i = \rho\beta U_i \quad (5)$$

Onde:

τ_i – equivale ao vetor tensão de atrito no fundo;

ρ – Massa específica;

U_i – Vetor velocidade nas direções (x, z, t);

O módulo aplicado para modelagem é o 2DH não acoplado ao módulo 3D onde o critério β está em função do módulo 2DH.

$$\beta = \frac{g}{c_h^2} \sqrt{U + V} \quad (6)$$

Onde:

C_h – equale ao coeficiente de Chézy, determinado como:

$$C_h = 18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\epsilon} \right) \quad (7)$$

H – representa a altura da coluna d'água

Os resultados dos modelos gerados ainda que não calibrados, apresentam coerência para valores reais e valores computacionais de níveis de água melhores que 90 % (ROSMAN, 2021).

O passo inicial para elaboração da modelagem computacional para análise hidrodinâmica está na definição do domínio relevante, de forma que englobe o contexto de modelagem mediante a discretização do domínio, dados de batimetria e rugosidade de fundo, para que assim, desenvolvam-se os modelos hidrodinâmicos.

2.5.2 Modelos de circulação Hidrodinâmica

A dinâmica dos corpos d'água é esclarecida mediante equações diferenciais, no entanto, não apresentam solução analítica conhecida e não são lineares, tornando necessário permutar de um modelo contínuo a um modelo analítico para solução das equações algébricas através de métodos computacionais (CUNHA, 2017).

Os modelos hidrodinâmicos em fluido homogêneo apontam o padrão de correntes em corpos d'água com superfície livre como em águas costeiras, baías, sistemas estuarinos, rios, dentre outros (ROSMAN, 1997). De acordo com Cunha (op. Cit.), as propriedades do fluido podem ser conjecturadas através de métodos estatísticos, avaliação de soluções analíticas e mediante modelos hidrodinâmicos numéricos, onde a caracterização hidrodinâmica pode ser dada por três tipos de modelos hidrodinâmicos, variantes segundo a complexidade do sistema.

As discretizações temporal e espacial ocorrem, respectivamente, mediante diferenças finitas e por elementos finitos quadrangulares biquadráticos, assim como por elementos finitos triangulares quadráticos.

2.5.3 Classificação dos modelos hidrodinâmicos

Três tipos de sistemas hidrodinâmicos podem ser adotados conforme sua complexidade, sendo (ROSMAN, 1997):

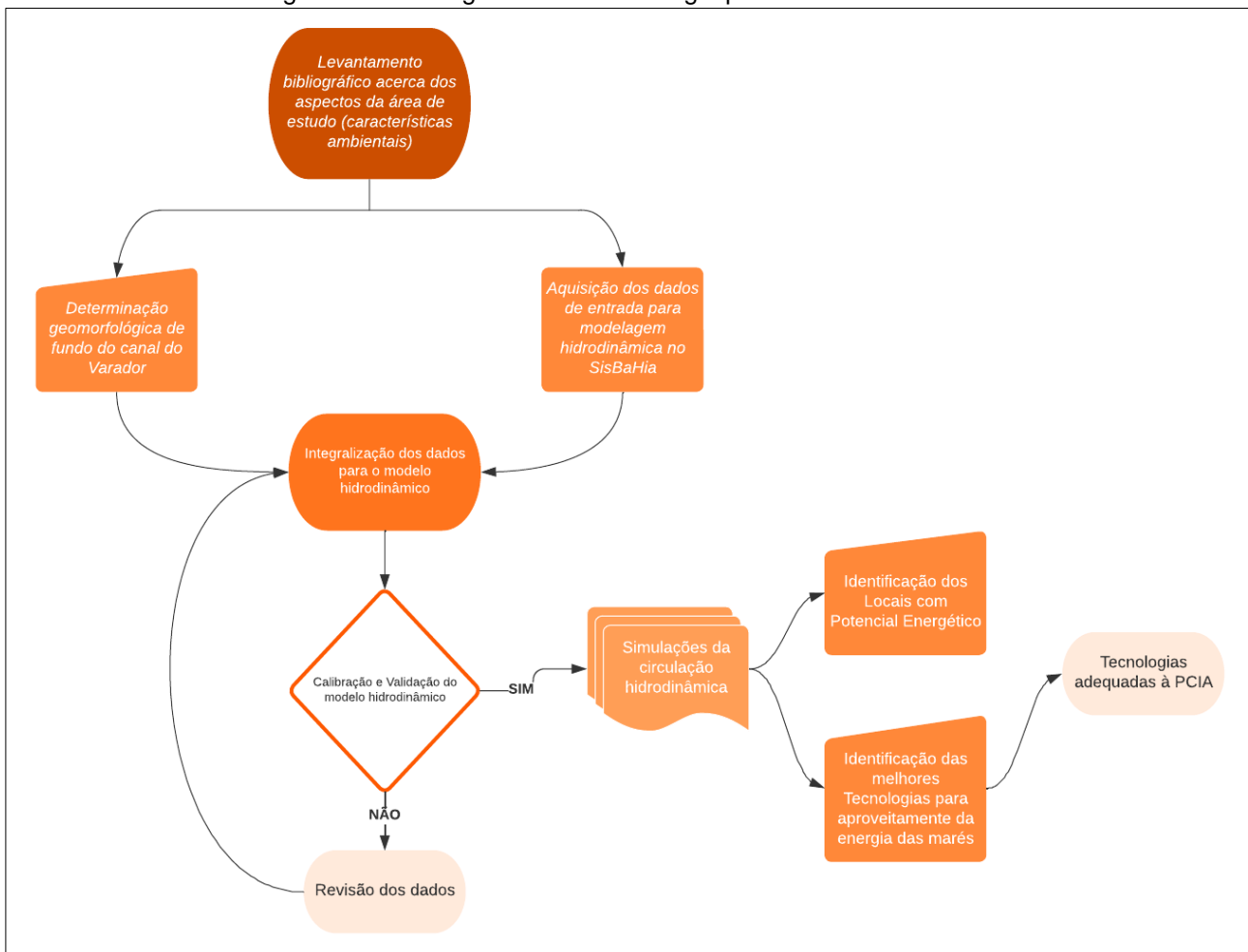
- ✓ **Modelo unidimensional (1D):** este modelo é recomendado à corpos d'água com seção transversal homogênea, onde não ocorre estratificação, assim, o eixo X é utilizado como eixo longitudinal de dimensões (x, t).

- ✓ **Modelo bidimensional (2D):** este modelo pode ser classificado de duas formas. Uma considera a dimensão vertical (2DV) com as dimensões (x, y, t) e a outra utiliza a dimensão horizontal (2DH) com as dimensões (x, z, t) .
- ✓ **Modelo tridimensional (3D):** para este modelo, têm-se os modelos 3D e 3Dg, os quais englobam as dimensões (x, y, z, t) , de modo que o modelo 3Dg integra forçantes barotrópicas e barocíclicas, diferente do modelo 3D. Este não possui gradiente de intensidade, sendo recomendado à corpos com coluna d'água homogênea ou de baixo nível de estratificação.

3. METODOLOGIA

A presente seção descreve a metodologia adotada neste estudo e visa apresentar de maneira clara e sistemática o processo de elaboração da pesquisa com uma abordagem sistemática e passos bem definidos para garantir a sua construção e aplicação adequadas das principais etapas envolvidas no processo (figura 20), bem como as ferramentas e técnicas utilizadas para a sua elaboração, buscando fornecer uma estrutura geral do contexto e objetivos da análise.

Figura 20 – Fluxograma da metodologia para o referido estudo.



Fonte: Autor (2023).

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Nesta etapa realizou-se um levantamento dos aspectos relacionados à área de estudo baseado na síntese do catálogo de teses e dissertações da CAPES, artigos e relatórios do acervo da Biblioteca do Instituto de Geociências, assim como da utilização de pesquisas produzidas dos discentes dos Programas de Pós-graduação em Ciências

Marinhas Tropicais – PPGCMT, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Naval – PPGENAV da Universidade Federal do Pará – UFPA, Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão – UFMA, do Repositório Digital da UFPE do Programa de Pós – Graduação em Oceanografia, do Grupo de Energia Renovável no Oceano – GERO do Programa de Engenharia Oceânica – PENO do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós – Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, dentre outros.

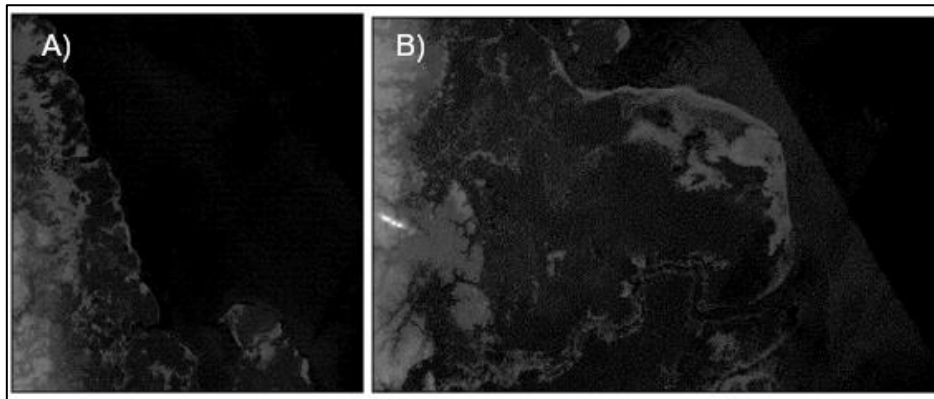
Além disso, para conhecimento das características ambientais da PCIA, foram analisados livros, literatura científica de pesquisadores estrangeiros e nacionais, artigos de revistas como da Revista Brasileira de Geociências; dados disponibilizados pelos sites Baías do Brasil, Agência Nacional de Águas – ANA, do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, informações horários da *Copernicus Europe's eyes on Earth* – ERA5, bem como da análise das cartas náuticas fornecidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN).

3.2. DETERMINAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DE FUNDO DO CANAL DO VARADOR MEDIANTE USO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO – MDE / SRTM

Aplicou-se o modelo SRTM para elaboração de mosaico da zona de estudo como abordagem para conhecimento prévio do relevo a partir das imagens raster de elevação para padronização das bandas. Conforme a batimetria estruturada linearmente em SRTM (30 m de resolução), executou-se a interpolação TIN, juntamente de imagens raster da *General Bathymetric Chart of the Oceans* – GEBCO, para que fossem geradas as curvas de profundidade no canal do Varador.

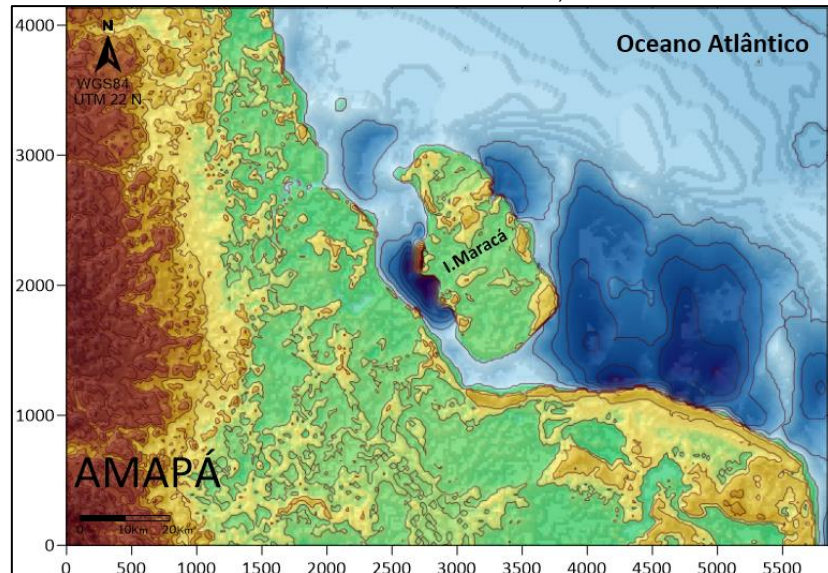
Dessa forma, utilizou-se o software QuantunGis para elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM na região de interesse (figura 21). Para identificar detalhadamente as áreas mais rasas do canal, adotaram-se diversas equidistâncias de curvas, a primeira com 1 m nos primeiros 5 m de profundidade, com finalidade de identificar bancos de areia e trechos mais rasos; e, uma segunda equidistância de 10 m a partir da isóbata de 5 m (figura 22).

Figura 21 - Imagem a) SRTM do setor Norte da Iha de Maracá. Carta NA – 22 – X – C. b) SRTM do setor sul da ilha de Maracá. Carta NA – 22 – Z – A.



Fonte: Adaptado. MIRANDA, 2005.

Figura 22 - Mosaico altimétrico e batimétrico da PCIA, incluindo o Canal do Varador.



Fonte: Autor (2023).

Para melhor visualização, somente as curvas do canal foram adicionadas, após a vetorização da ilha e do litoral adjacente, na intenção de unir os *rasters* de elevação e de batimetria.

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS

Para executar o modelo hidrodinâmico, foram adquiridos uma série de dados como: elevação de maré, batimetria, rugosidade de fundo, ventos, mapas e imagens de satélites (tabela 4).

Tabela 4 - Referência dos dados de entrada do Modelo hidrodinâmico.

	Rugosidade	Batimetria	Dados de maré		Dados Meteorológicos
			Constantes Harmônicas	Nível médio Variável (elevação)	Vento
Referência	Os parâmetros de rugosidade foram adotados conforme recomendado no SisBaHia®.	As sondas batimétricas foram extraídas a partir da Carta Náutica DHN nº 21200 em escala 1:300.000 (3° 30'). Para a PCIA, utilizou-se modelagem computacional no software QuantunGis para geração dos dados batimétricos, que foram interpolados e posteriormente comparados com dados de batimetria do programa de altimetria Topex.	A partir da base de dados do SisBaHia foram gerados os arquivos FES contendo as Constantes Harmônicas referenciados conforme longitude e latitude da área de estudo.	Os dados de elevação foram extraídos da base de dados do menu de ferramentas do SisBaHia® mediante Hybrid Coordinate Ocean Model – HYCOM.	Os dados de Vento foram adquiridos mediante a base de dados horários ERA5 em níveis únicos dos picos nos períodos de seca (outubro) e chuva (abril) da área de estudo (Climate Change Service).
Fonte	Rosman (2021).	Rosman (2021).	Rosman (2021).	DHN (2022).	Cds.climate.copernicus (2022).

Além disso, na referida dissertação de mestrado, aplica-se o Modelo Hidrodinâmico (2DH) adotando os padrões de correntes de maré a partir da quantidade de movimento de uma dada massa de água, utilizando softwares que participam das etapas de modelagem no SisBaHia como o Surfer, Grapher, Google Earth Pro e Excel para organização de dados.

3.3.1 Integralização dos dados

Os modelos produzidos virtualmente a partir dos dados de entrada no SisBaHia, representam de forma virtual o comportamento hidrodinâmico da PCIA. Desse modo, os dados de níveis de maré, correntes e batimetria possuem importante papel para o modelo, pois influenciam na qualidade dos resultados. Para geração da grade do modelo decorre da verificação batimétrica da PCIA, a qual foi tratada e interpolada no Software QuantunGis e organizada em planilhas do Excel para posteriormente ser digitalizada no Surfer versão 23, para assim ser introduzida no SisBaHia e com auxílio das interações de processamento, os dados de nível de maré e correntes foram calibrados.

Mediante o software Surfer, os resultados hidrodinâmicos gerados foram analisados em detrimento aos valores de elevação e velocidade. Os locais com potencial energético foram apontados mediante análise das áreas que dispõem dos mínimos aspectos para aproveitamento da energia a partir das correntes de maré.

3.3.2 Simulações da circulação hidrodinâmica

Nessa etapa utilizaram-se dados ambientais para entrada e calibração do modelo numérico. Os dados de intensidade e direção da maré e do vento foram necessários para a identificação das respostas às variações sazonais sobre a hidrodinâmica na PCIA. Para definir no modelo os períodos de maré de sizígia e de quadratura, adotaram-se 30 dias para o equilíbrio do modelo hidrodinâmico.

- Maré de Sizígia nas seguintes condições:
 - ½ maré Enchente – Simulação 1
 - Estofa de Preamar – Simulação 2
 - ½ Maré Vazante – Simulação 3
 - Estofa de Baixa-mar – Simulação 4

- Maré de Quadratura nas seguintes condições:
 - ½ maré vazante – Simulação 5
 - Estofo de Baixa-mar – Simulação 6
 - ½ Maré Enchente – Simulação 7
 - Estofo de Preamar – Simulação 8

3.4 CÁLCULO DA DENSIDADE ENERGÉTICA

Para locais de elevada variação de altura de maré, em comparação às regiões de menores variações, as velocidades das correntes de maré são maiores devido ao escoamento de maior volume de água para um mesmo intervalo de tempo e a densidade é dado pela seguinte relação (HAGERMAN *et al.*, 2006):

$$\left(\frac{P}{A}\right)_{\text{Água}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \quad (\text{W. m}^{-2}) \quad (8)$$

Onde “A” representa a área de seção transversal em metros quadrado do fluxo incidente ao equipamento, “ ρ ” é a densidade da água em quilogramas por metro cúbico (1000 Kg/m³ para água doce e 1025 Kg/m³ para água do mar) e “U” equivale à velocidade da corrente de maré. Esta última variável altera-se com o tempo de forma previsível e está diretamente relacionada à profundidade e posição.

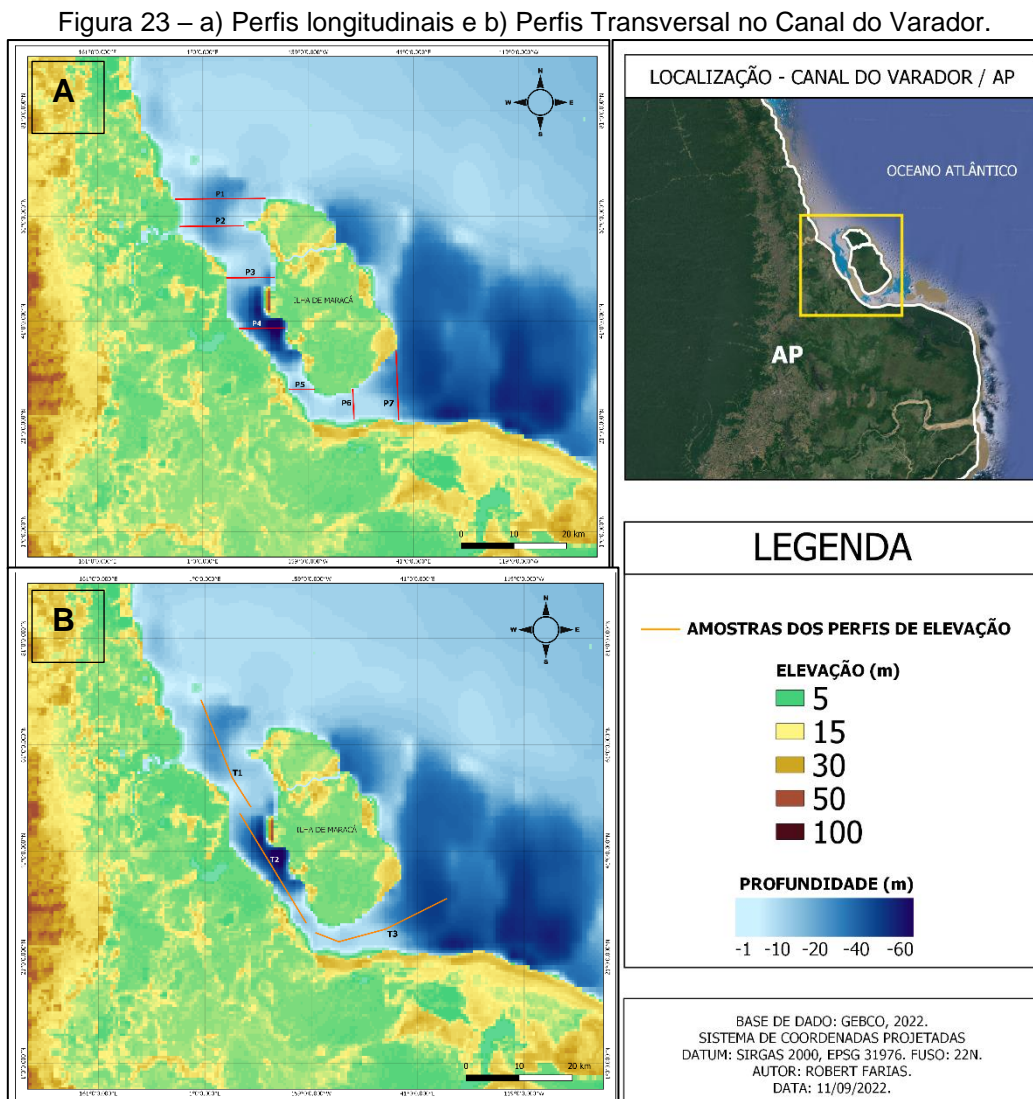
3.5 IDENTIFICAÇÃO DA(S) MELHOR(ES) TECNOLOGIA(S) PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DAS CORRENTES DE MARÉ

Para atender a este item, verificou-se nas diversas plataformas digitais como no catálogo de teses e dissertações da CAPES, Revista Brasileira de Geociências e publicações da Renewable and Sustainable Energy Reviews, onde identificou-se diversos artigos acerca das melhores tecnologias conforme as características físicas das áreas com potencial energético, trazendo à conhecimento os aspectos de operação necessários para um eficiente funcionamento das tecnologias segundo o campo de velocidade das correntes.

4. RESULTADOS

4.1 GEOMORFOLOGIA DO CANAL DO VARADOR

Para identificar as características de fundo da PCIA, incluindo o canal do Varador, foram traçados perfis transversais e longitudinais. As características de fundo assim como a aferição das principais dimensões do canal e o padrão geomorfológico de cada segmento, com base em outros estudos (SILVA, 2021), foram especificadas em detrimento de seus aspectos conforme os trechos longitudinais T₁, T₂, T₃ e o perfil transversal P_n (figura 23).

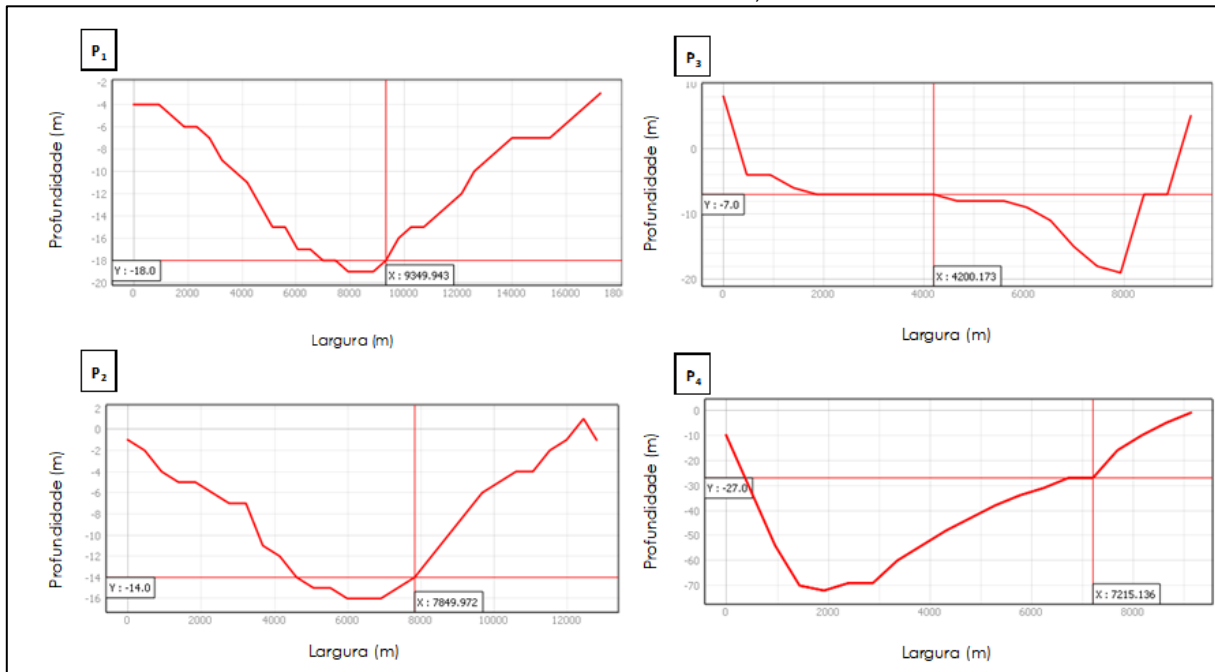


Fonte: Autor (2023).

No trecho T₁ nos perfis P₁ e P₂, as profundidades máximas são em torno de 16 e 18 m, com largura entre 16 km e 11 km, respectivamente, com fundo no formato em “v” (P₁)

e misto “vu” (P2) (figura 24). Nos perfis P₁ e P₂, na parte ao norte da ilha de Maracá, verificou-se profundidades entre 14 e 18 m, correlacionadas a um fundo de formato misto “vu” e em “v”. Por outro lado, esses traços não seguem um padrão ao longo da extensão do curso.

Figura 24 – Trecho ao Norte da Ilha de Maracá próximo à Foz do rio Calçoene, P1 e P2. Trecho próximo ao Canal do Inferno – ilha de Maracá, P3 e P4.



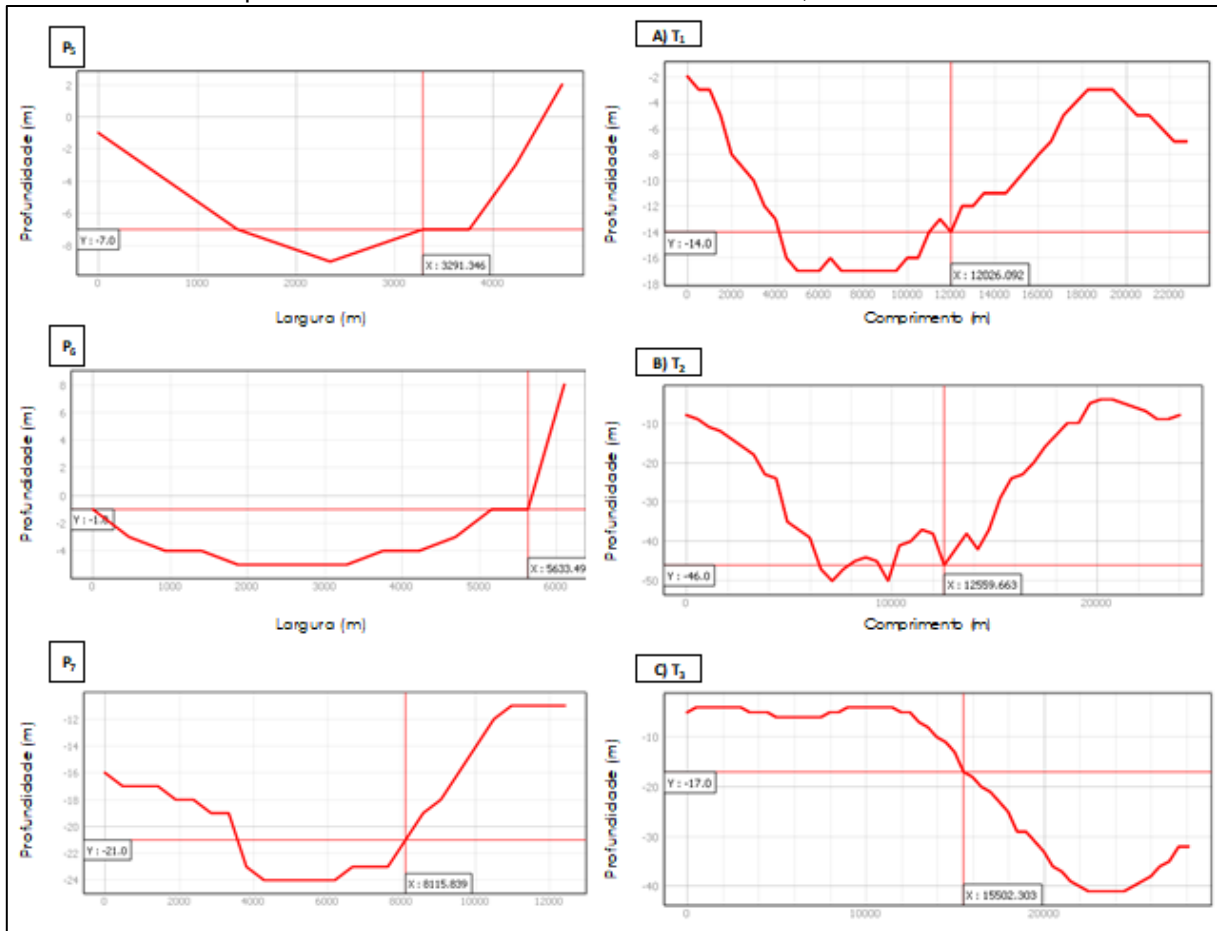
Fonte: Autor (2023).

No trecho médio T₂ do canal, os P₃ e P₄ apresentam profundidade média de 10 e 35 m e largura de 7 km e 9 km (figura 25) e formato em “UV” (P₃) e misto em “VU” (P₄). Há uma brusca mudança de fundo no P₃ com profundidade média de 7 m na parte central do canal seguido de aumento abrupto de profundidade no P₄, com 50 m (parte central). Do norte da ilha de Maracá ao trecho médio P₄, a linha de Costa da área é caracterizada por terraços.

O terceiro trecho T₃ abrange os P₅, P₆ e P₇ (figura 25), e exibem profundidades máximas de 8 m, 4.5 m e 24 m com larguras de 4.5 km, 5 km e 12 km, respectivamente com aspectos de fundo misto “VU” (P₅ e P₇) e em “U” (P₆). Os perfis P₅ e P₆ apresentam variação de profundidade entre 8 m e 4 m, respectivamente e, uma linha de fundo irregular rumo à parte mais externa do canal.

O curso inferior do canal tem forma menos acidentada, com profundidades de 4 m a 24 m, com elevada modificação de fundo. O Canal do Varador não apresenta um padrão batimétrico e no curso médio tem uma larga variação, como identificados nos perfis P₃ e P₆ compreendidos entre os trechos T₂ e T₃ (figura 25).

Figura 25 – Trecho próximo à Foz do rio Macari /Oceano Atlântico P5, P6 e P7. Parte Norte da ilha de Maracá. Trechos longitudinais do Canal do Varador. T1 – Nas proximidades da foz do rio Calçoene. T2 – próximo à Foz do rio Macari e Canal do Inferno; T3 – Oceano.



Fonte: Autor (2023).

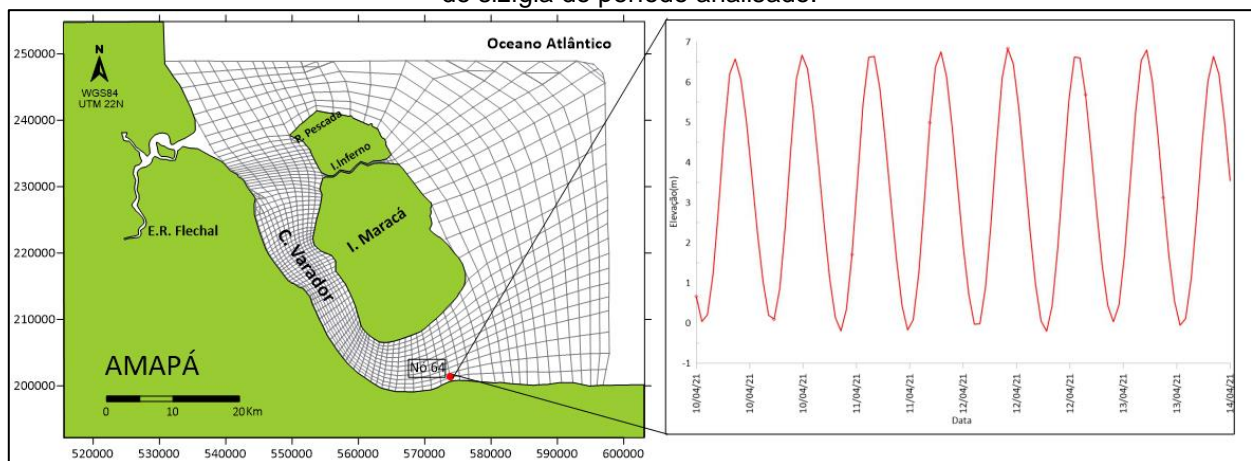
A aplicação dos MDE com aplicação da tecnologia SRTM em conjunto com ferramentas GIS mostrou-se satisfatório para representação e análise de relevo, onde nas últimas cinco décadas, essa tecnologia tem sido cada vez mais utilizada para estudos geomorfológicos de maneira sistemática proporcionando executar um mapeamento das formas de relevo em diversas escalas e finalidades (SREENIVASAN; JHA, 2022).

4.2. SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS NA PCIA

4.2.1 Validação do modelo

Para validar o modelo, foi realizada uma comparação entre os dados reais e da modelagem a partir de estudos anteriores no qual se utilizou como parâmetro a velocidade das correntes e a altura de maré mediante comparação das elevações geradas identificadas nas simulações para o período de 01/04/2021 à 30/04/2021. A curva de elevação de maré resultante da modelagem gerou elevações máxima de 7,55 m e mínima de 0,40 m para a segunda maré de sizígia do período analisado, demonstrando valores próximos do real em comparação às medições das Estações Maregráficas próximas à PCIA (figura 26).

Figura 26 - Elevação de maré no trecho inferior do canal do Varador: máxima de 6,8 m e mínimo de -0,2 m para a primeira maré de sizígia do período e máxima de 7,55 m e mínima de 0,40 m para a segunda maré de sizígia do período analisado.



Fonte: Autor (2023).

A fim de validar o modelo desenvolvido para PCIA, os resultados para amplitude e correntes de maré, assim como as profundidades, foram comparados segundo a abordagem do projeto AMASSEDS (1990), a modelagem de Fontes, Castro e Beardsley (2008), Rosman (2009) e Molinas (2020). O estudo de Rosman (op cit.) apresentou correntes com velocidade de até $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ na PCIA (tabela 5) no período de cheia, onde no presente estudo, com referência ao nó 64, verificou-se velocidade em U superior à velocidade transversal V, para uma velocidade U mínima de -1.053 m.s^{-1} e máxima 1.361 m.s^{-1} , enquanto que a velocidade V apresenta mínima de -0.793 m.s^{-1} e máxima de 0.697 m.s^{-1} .

Tabela 5 - Comparação das profundidades e correntes de maré na região da PCIA.

Local	Rosmam (2009)		Molinas (2020)		Modelagem	
	Profundidade (m)	Corrente (m.s ⁻¹)	Profundidade (m)	Corrente (m.s ⁻¹)	Profundidade (m)	Corrente (m.s ⁻¹)
PCIA	0 – 25	-	0 – 20	0,1 – 0,14	0 – 24	0 – 0,11

Fonte: Autor (2023).

Com análise dos resultados do projeto AMASSEDS e da modelagem obtida por Fontes, Castro e Beardsley (2008) para componente de maré M2 de NW para SE na costa do Amapá (tabela 6), observa-se que os resultados do modelo do estudo estão dentro dos parâmetros validados.

Tabela 6 - Comparação dos resultados do modelo com referência à constante hamônica de maré M2.

Local	AMASSEDS		Fontes; Castro; Beardsley, (2008).		Modelagem	
	Amplitude (m)	Corrente (m.s ⁻¹)	Amplitude (m)	Corrente (m.s ⁻¹)	Amplitude (m)	Corrente (m.s ⁻¹)
Ilha de Maracá	3,51	0,41	3,00	0,39	2,94	0,42

Fonte: Autor (2023).

Além da comparação entre os dados anteriores, também se fez a relação estatística entre as elevações observadas e modeladas. Considerou-se durante o processo de validação o Erro Quadrático Médio (EQM) (tabela 7) que avalia a diferença entre o dado simulado e o dado observado. O resultado dos valores de EQM para a primeira ½ maré enchente de quadratura foi de 0,17.

Tabela 7 - Dados de elevação de maré para ½ maré enchente de quadratura e o erro quadrático médio (EQM) entre os dados observados e modelados.

Elevação (m)	Modelagem	Observado	EQM
Máxima	3,81	3,51	0,17
Mínima	3,65	3	
Média	3,46	3,25	

Fonte: Autor (2023).

4.2.2 Simulações hidrodinâmicas (sizigia/quadratura)

A verificação dos resultados no modelo hidrodinâmico do SisBaHia® foi fornecida em segundos, onde, em todas as simulações o intervalo espacial e temporal foi de 3600 s e 1200 s, respectivamente, apresentando 1 resultado a cada vinte minutos. A partir da análise da primeira preamar da curva de maré, adotou-se ao modelo o instante inicial de 979.200 s para todas as simulações, como tempo final 2.570.400 s para um passo de tempo de 50 s (tabela 8).

Tabela 8 - Dados de parâmetros de entrada utilizados para simulação hidrodinâmica no SISBAHIA.

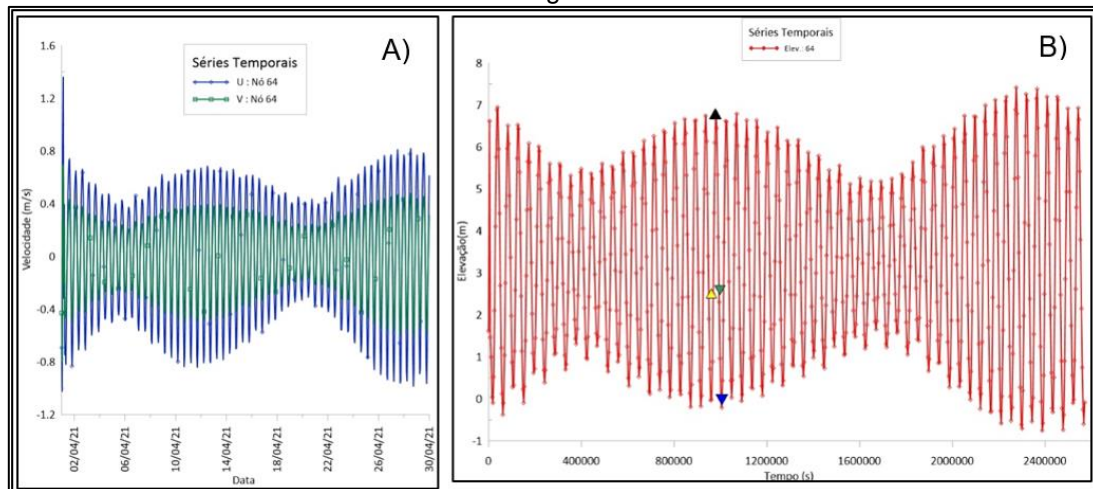
	Parâmetros	Simulações Mensais
Simulação	Instantes (s)	979.200
	Instante final (s)	2.570.400
	Passo de tempo (s)	50
Intervalo de tempo dos resultados	Espacial (s)	3600
	Temporal (s)	1200
Condições Iniciais	Elevação (m)	1.45

Fonte: Autor (2023).

O objetivo da simulação é analisar o comportamento hidrodinâmico da PCIA ao longo do período de maré de sizigia e de quadratura e seus intervalos: $\frac{1}{2}$ maré enchente, $\frac{1}{2}$ maré vazante, estofo de preamar e estofo de baixa-mar. As condições iniciais do modelo 2DH no SisBaHia definem os aspectos de circulação hidrodinâmica conforme o tempo inicial t_0 para todos os nós do domínio, gerando valores de elevação de superfície livre, assim como as componentes de velocidade U e V. No modelo é necessário que se tenha o valor de elevação da superfície no instante 0, o qual é representado e determinado graficamente nas curvas das constantes harmônicas.

Os resultados obtidos mediante condições iniciais do modelo 2DH estabeleceram os padrões de correntes de maré conforme os campos de vetores que representam a velocidade das componentes x e y da coluna d'água, tornando possível analisar a velocidade média, direção e intensidade das correntes de maré na PCIA (figura 27).

Figura 27 – A) U (velocidade longitudinal) e a V (velocidade transversal) no nó 64. B) Instante de altura de maré de sizígia (½ maré enchente, estofa de preamar, ½ maré vazante, estofa de baixamar) indicados pelos triângulos.



Fonte: Autor (2023).

4.2.3 Maré de Sizígia

Tabela 9 - Variações do ciclo de maré em função da variação do tempo durante a maré de sizígia.

	½ maré enchente	Estofa de preamar	½ maré vazante	Estofa de baixamar
Δt	968400 s	979200 s	993600 s	1004400 s
Δh	2.49 m	6.82 m	2.31 m	- 0,20 m

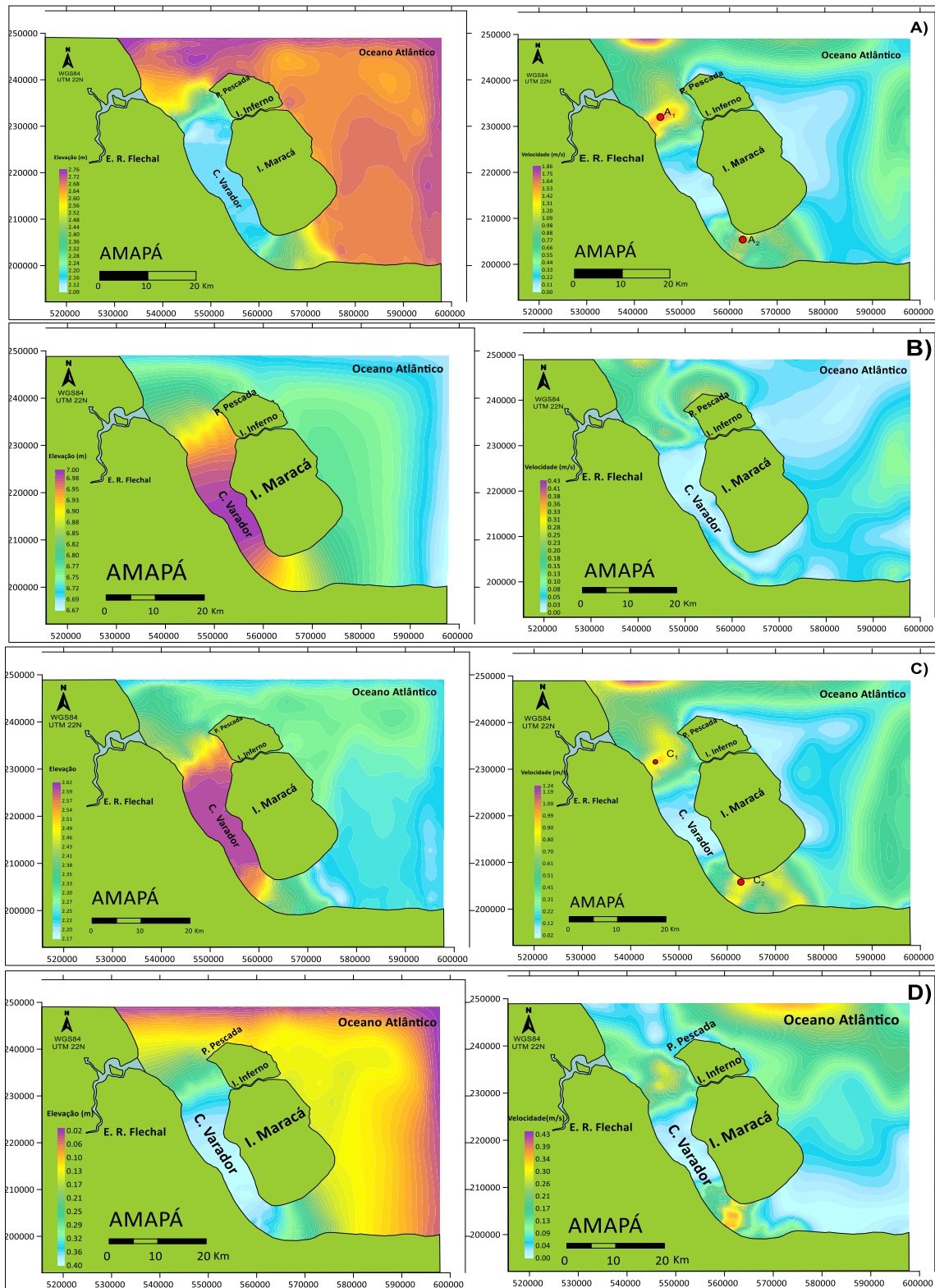
Fonte: Autor (2023).

• Meia maré enchente (simulação 1)

Na ½ maré de enchente no instante 968.400 s (tabela 9), as maiores faixas de elevação ocorrem nas extremidades do Canal do Varador, próximo ao rio Flechal e Igarapé do Inferno (ilha de Maracá) e, na parte inferior do canal, com pequenas variações nas faixas de elevação durante a enchente. A elevação de maré na parte interna do Canal variou de 2,12 – 2,44 m, entretanto, foi entre 2,64 – 2,72 m em grande parte da PCIA (figura 28.a).

O módulo de velocidades geradas para as componentes U e V variam entre 0,0 m.s⁻¹ e 1,86 m.s⁻¹. Os maiores campos de velocidades de correntes de maré oscilam entre 1,09 m.s⁻¹ e 1,53 m.s⁻¹, no trecho > do Canal do Varador. Neste momento, as correntes de maré têm velocidade < à 1,0 m.s⁻¹, oscilando entre 0,44 m.s⁻¹ e 0,98 m.s⁻¹ na maior parte da PCIA.

Figura 28 – Sizígia: Elevação e padrões de correntes de maré nos instantes A) $\frac{1}{2}$ maré enchente. B) estofa de preamar. C) $\frac{1}{2}$ maré vazante. D) estofa de baixamar na PCIA. A1 – Área 1, A2 – Área 2.



Fonte: Autor (2023).

- **Estofo de preamar (simulação 2)**

No instante 979.200 s, durante o estofo de preamar (sizígia), verifica-se uma padronização da elevação de maré no domínio da PCIA em diversas áreas, com altura mínima de maré bem maiores que no momento de quadratura. Na parte externa da PCIA, a elevação de maré ficou entre 6,67 – 6,85 m, com gradativo aumento no trecho interno do Canal do Varador (6,88 – 7 m), e velocidade entre 0 m.s⁻¹ e 0,37 m.s⁻¹ próximo à Ponta da Pescada (figura 28.b).

- **Meia Maré vazante (simulação 3)**

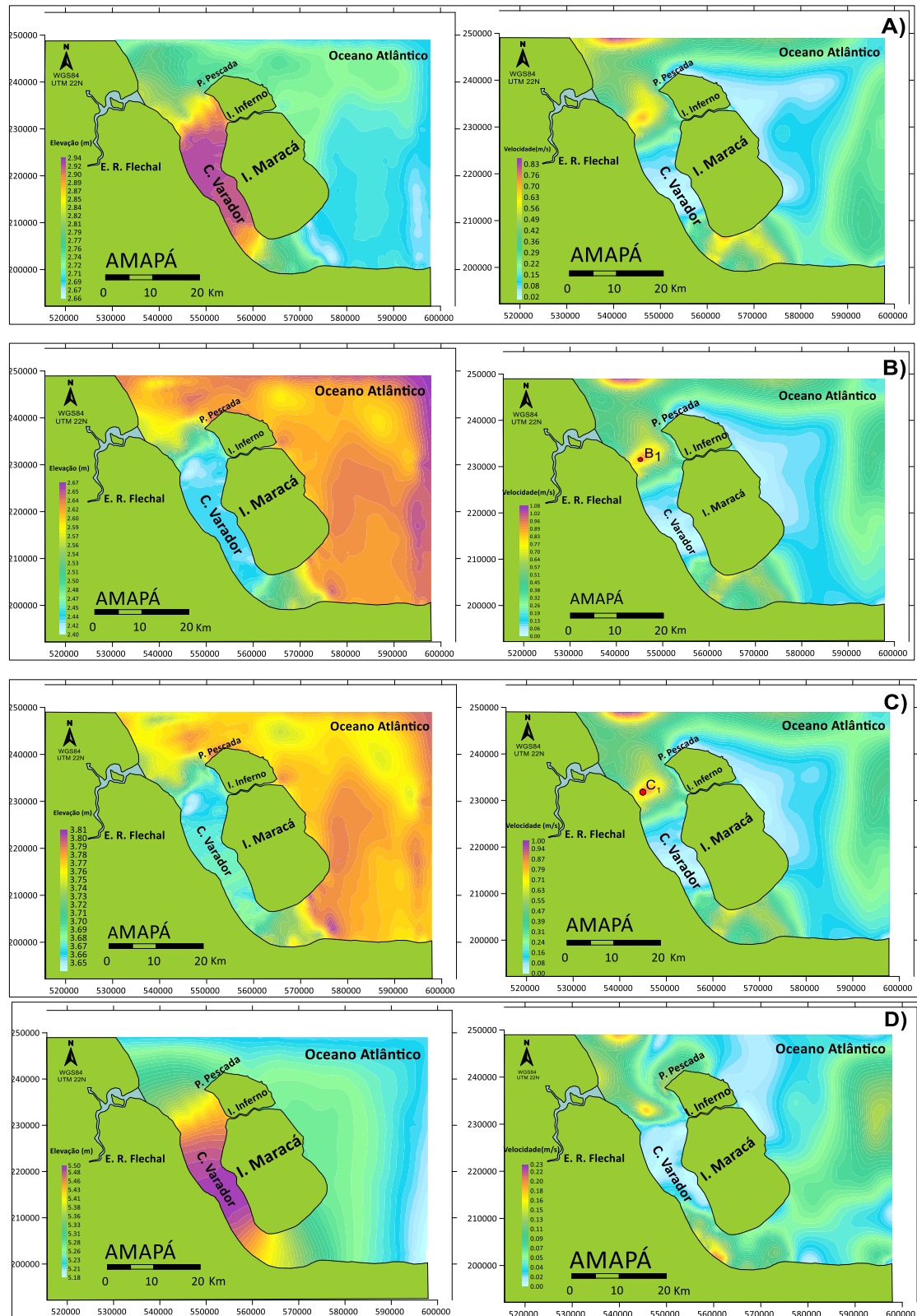
No instante 993.600 s, a elevação de maré continua alta no trecho interno ao Canal do Varador (2,46 – 2,62 m), com maior fluxo d'água em toda a extensão do trecho que compreende o Canal. Na PCIA, a elevação de maré variou entre 2,17 – 2,41 m na parte externa da ilha de Maracá. Além disso, as correntes apresentaram maiores velocidades nas extremidades do canal, com 0,44 m.s⁻¹ a 1,24 m.s⁻¹ próximo ao Igarapé do Inferno (ilha de Maracá) (figura 28.c).

- **Estofo de baixa-mar (simulação 4)**

O instante 1.004.400 s apresentou relativa padronização da elevação de maré com gradativo aumento até a parte central do canal do Varador (0,21 – 0,40 m) com diferenças sensíveis na parte externa da ilha de Maracá (0,2 – 0,17 m), com velocidade de correntes de maré de 0 m.s⁻¹ a 0,43 m.s⁻¹ (figura 28.d). As correntes mais fortes (1,31 – 1,86 m.s⁻¹) ocorrem na seção mais estreita entre a costa do Amapá e a ilha de Maracá, próximo ao Cabo Norte.

4.2.4 Maré de Quadratura

Figura 29 – Quadratura – Elevação de maré e padrões de correntes nos instantes A) $\frac{1}{2}$ maré vazante. B) estófo de baixamar. C) $\frac{1}{2}$ maré enchente. D) estófo de preamar. B1 – Área B1, C1 – Área C1



Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 - valores máximos e mínimos do ciclo de maré obtidos durante a maré de quadratura.

	½ maré vazante	Estofa de baixa-mar	½ maré enchente	Estofa de preamar
Δt	320400 s	34200 s	345600 s	352800 s
Δh	2.74 m	2.54 m	3.72 m	5.32 m

Fonte: Autor (2023).

- **Meia maré vazante (Simulação 5)**

O comportamento hidrodinâmico no tempo 320.400 s (tabela 10), exibe fluxo de corpo d'água em direção à parte norte da Ilha de Maracá, com elevação de maré entre 2,84 – 2,94 m, já a área externa da PCIA exibiu elevação entre 2,66 – 2,81 m (figura 29.a). As elevações para este período foram próximas às identificadas para simulação de ½ maré vazante de sizígia e nota-se um movimento de massa d'água em direção à parte externa da ilha de Maracá devido à maré estar vazando.

As correntes de maré tiveram velocidades menores em comparação às do período de ½ maré vazante de sizígia, onde o escoamento é mais intenso nas extremidades do Canal do Varador, na área superior à ilha de Maracá, Ponta da Pescada, e na área inferior à ilha em direção ao Cabo Norte.

- **Estofa de baixa-mar (Simulação 6)**

No instante 342.000 s, verificou-se pouca diferença em relação à elevação de maré vazante de quadratura, no entanto, no Canal do Varador houve redução de elevação em torno de 0,5 m, com baixas velocidades de correntes de maré, variando de 0 m.s⁻¹ a 0,32 m.s⁻¹ na maior parte da PCIA (figura 29.b). Na área externa da PCIA, a elevação de maré apresentou variação de 2,57 – 2,67 m com maiores elevações nas proximidades do Cabo Norte.

- **Meia maré enchente (Simulação 7)**

No instante 345.600 s, observam-se elevações acima de 3 m por todo domínio, assim como velocidades de correntes de maré entre 0 m.s⁻¹ e 0,41 m.s⁻¹. O trecho de maior elevação (3,76 – 3,81 m) na PCIA ocorreu na parte inferior do Canal do Varador próximo ao Cabo Norte (figura 29.c). Entretanto, as maiores velocidades (0,77 m.s⁻¹ a 1 m.s⁻¹) de corrente de maré foram próximo ao Igarapé do Inferno (ilha de Maracá).

- **Estofo de preamar (Simulação 8)**

No instante 352.800 s, observou-se baixa variação na elevação de maré, com máxima de 5,50 m no segmento central do Canal do Varador, inferior ao momento de estofo de preamar de sizígia. A PCIA exibiu elevações de maré de 5,18 – 5,36 m na área externa à ilha de Maracá além disso, notou-se velocidades entre 0 m.s⁻¹ e 0,12 m.s⁻¹ em grande parte do domínio (figura 29.d).

4.3 IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS COM POTENCIAL ENERGÉTICO POR CORRENTES DE MARÉ

A partir da análise dos resultados do modelo hidrodinâmico dos períodos de maré de enchente e vazante, foram identificadas as possíveis áreas para aproveitamento energético com fonte as correntes de maré.

Após execução do modelo hidrodinâmico, verificou-se o intervalo de tempo e os resultados foram exportados para o Grapher para análise gráfica para identificar os tempos em que ocorrem as marés de sizígia e de quadratura, assim como seus respectivos períodos intermediários.

Com a identificação dos tempos de interesse, no SisBaHia, na aba de resultados 2DH, é possível localizar os tempos selecionados no Grapher e gerar os mapas com os dados de saída no programa Surfer, onde foram identificadas as áreas com potencial energético por correntes de maré.

4.4 DENSIDADE ENERGÉTICA

Mediante a identificação e análise da densidade energética das áreas com potencial energético de correntes de maré na PCIA, observou-se na parte superior do Canal do Varador e próximo ao Cabo Norte, áreas com maiores velocidades na PCIA, durante o ciclo de sizígia – quadratura, sendo as mesmas áreas para ambos os períodos (tabela 11).

Tabela 11 - Densidades energéticas detectadas nos trechos da PCIA durante as simulações de maré e suas respectivas velocidades de correntes de maré.

Maré de sizígia						
Área	km²	Simulação (período)	Velocidade (m.s⁻¹)	Densidade energética total (Kw)	W.m⁻²	Trecho da PCIA
A ₁	29.85	½ maré enchente	1.53	54.791.466	1835.56	Trecho > do Canal do Varador
A ₂	18.37	½ maré enchente	1.31	21.164.996	1152.15	Trecho < do Canal do Varador próximo ao Cabo Norte
C ₁	24.19	½ maré vazante	1.14	18.367.225	759.29	Trecho > do Canal do Varador
C ₂	27.27	½ maré vazante	1.12	19.635.218	720.03	Trecho < do Canal do Varador, próximo ao Cabo Norte
Maré de quadratura						
Área	km²	Simulação (período)	Velocidade (m.s⁻¹)	Densidade energética total (Kw)	W.m⁻²	Trecho da PCIA
B ₁	18.90	Estofo de baixa-mar	1.08	12.201.840	645.60	Trecho > do Canal do Varador
C ₁	17.49	½ maré enchente	0.9	6.534.438,9	373.61	Trecho > do Canal do Varador

Fonte: Autor (2023).

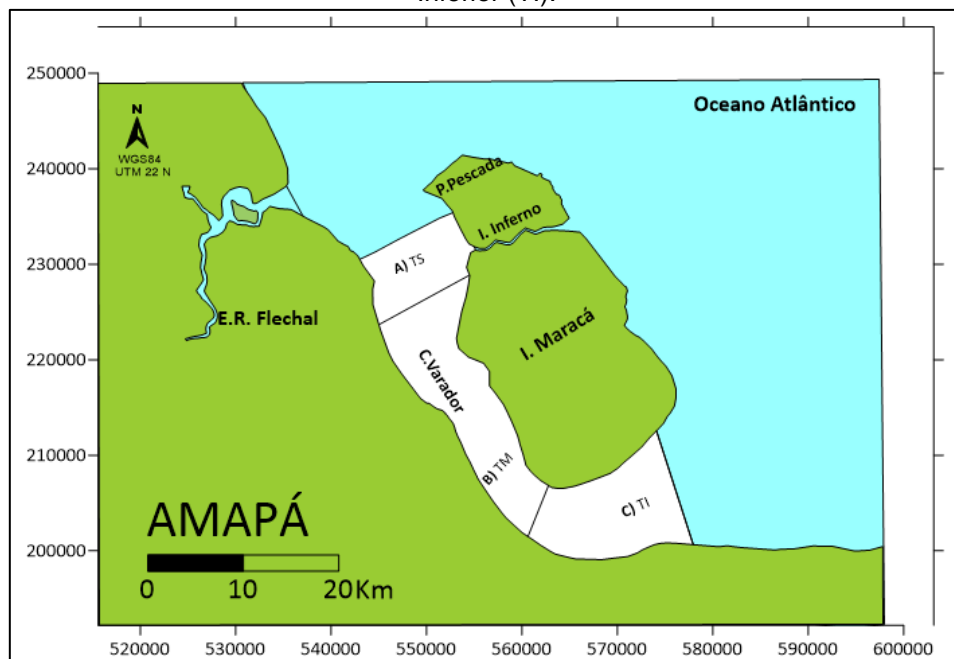
A partir da determinação das simulações hidrodinâmicas durante a sizígia/quadratura (de 1 a 8) na PCIA foi realizada uma divisão do domínio de modelagem e identificaram-se áreas com velocidades de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$, favoráveis à extração de energia de acordo com Fraenkel (2007). Conforme a análise nas diversas simulações hidrodinâmicas durante os momentos de maré de sizígia e quadratura, verificou-se algumas áreas com velocidade de correntes maiores que $1,00 \text{ m.s}^{-1}$.

Na simulação 2 (estofo de preamar de sizígia), assim como para simulação 4 (estofo de baixa-mar de sizígia) não há ocorrência de correntes de maré com velocidade acima de 1 m.s^{-1} . Para o período de quadratura, as simulações 6 (estofo de baixa-mar) e 7 (½ maré enchente) apresentaram velocidade máxima de correntes de maré em torno de $1,00 \text{ m.s}^{-1}$.

A simulação 8 (estofo de preamar) apresentou as menores velocidades do ciclo de maré ($0 - 0,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Dentre os locais com maior relevância em densidade energética, destacaram-se no Canal do varador, PCIA: trecho superior (TS) com densidade energética total de 54.791.466 KW para correntes de maré de $1,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $\frac{1}{2}$ maré enchente e, 18.367.225 KW para as correntes de maré de $1,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ durante $\frac{1}{2}$ maré vazante, ambos no período de sizígia; e o trecho inferior (TI) próximo ao Cabo Norte com densidade energética total de 21.164.996 KW para as correntes de maré de $1,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $\frac{1}{2}$ maré enchente e, 19.635.218 KW para correntes de maré de $1,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na $\frac{1}{2}$ maré vazante (figura 30) .

Figura 30 - Divisão do Canal do Varador, PCIA: A) Trecho Superior (TS), B) Trecho Médio (TM), C) Trecho Inferior (TI).



Fonte: Autor (2023).

4.4.1 Comparação do potencial energético da PCIA com outras regiões do Brasil e mundo

Durante o ciclo de maré de sizígia o escoamento segue em direção à costa com variação de velocidade de $1,09$ a $1,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nos segmentos estreitos da PCIA, onde na maior parte do domínio as correntes oscilam entre $0,44$ e $0,98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, isto é, a velocidade varia de zero (estofo de baixa-mar) a um máximo para depois desacelerar na camada de

maré alta. Na vazante, o sentido do fluxo altera-se para o oceano e retorna a acelerar conforme o comportamento cíclico das marés.

De acordo com Rosman (2009), uma considerável área da PCIA exibiu velocidades de corrente de maré $< 1,1 \text{ m.s}^{-1}$ na maior parte do tempo durante um período de simulação de 2 meses. A área de modelagem próxima ao nó 64, PCIA, (figura 26), demonstrou em 50 % do tempo velocidades mínimas de corrente de maré $> 1,1 \text{ m.s}^{-1}$.

Assumindo os mínimos parâmetros para extração de energia hidrocínética (FRAENKEL, 2007; LIM; KOH, 2010; MYERS; BAHAJ, 2012), alguns trechos do Canal do Varador apresentam potencial energético em ambos os períodos, sizígia (i) e quadratura (ii) (tabela 11): (i) áreas A_1 com 1835.56 W.m^{-2} e A_2 com 1152.15 W.m^{-2} na $\frac{1}{2}$ maré enchente (figura 28.a) e áreas C_1 com 759.29 W.m^{-2} e C_2 com 720.03 W.m^{-2} (figura 28.c) durante a $\frac{1}{2}$ maré vazante; (ii) as áreas B_1 com 645.60 W.m^{-2} no estofo de baixamar e C_1 com 373.61 W.m^{-2} (figura 29.c) no instante de $\frac{1}{2}$ maré enchente, também apresentaram potencial energético.

A densidade energética média no Canal de Chacao (região dos Lagos, Chile), é superior a 5 kWm^{-2} (GUERRA et al., 2017). A Baía de todos os Santos possui densidade energética média de 400 Wm^{-2} e alcança pico de $2,5 \text{ kWm}^{-2}$ (MARTA-ALMEIDA et al., 2017; VOGEL et al., 2019). Na Baía de São Marcos (Maranhão), a densidade energética está entre $1,5$ e $7,5 \text{ kWm}^{-2}$ (GONZÁLEZ-GORBEÑA et al., 2015).

No estuário do rio Yangtze (China), a densidade energética máxima pode exceder 10.0 kWm^{-2} e em Chengshan Cape, localizado na parte mais oriental de Weihai (Província de Shandong), a densidade energética média é de 2.0 kWm^{-2} (WU et al., 2013; LIU et al., 2021).

Conforme o resultado, identificou locais com densidade energética relevante quando comparado a outros estuários no mundo, o que possibilita a hipótese de instalação de turbinas para geração de energia elétrica. Concomitante ao desenvolvimento de novas tecnologias de turbinas de baixa velocidade (YOSRY et al., 2021) os trechos indicados com densidade energética considerável, tornam-se economicamente exploráveis conforme as áreas de potencial energético e as velocidades de corrente de maré. Alguns locais podem ser comparados conforme a tabela 12.

Tabela 12 - Comparação do Potencial energético com outros locais do mundo.

Local	Área (km ²)	Velocidade de corrente de maré (m.s ⁻¹)	Densidade energética (Kw.m ⁻²)
China – Langyatai Channel		~2	4
China – Proximidades do Cabo Chengshan	~29	~2,5	máxima – 7 média – 2
China – Putuo – Hulu Channel	-	-	~5
Brasil – Canal do Varador, PCIA.	29.85	1.53	~2
Brasil – Complexo Estuarino de São Marcos < Canal do Boqueirão	-	~ 2	Máxima – 9
Brasil – Complexo Estuarino de São Marcos < Ilha do Medo	-	3 m.s ⁻¹ (próximo à ilha do Medo)	14

Fonte: Czizeweski (2019); Liu et al. (2021).

4.5 IDENTIFICAÇÃO DA(S) MELHOR(ES) TECNOLOGIA(S) PARA EXTRAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

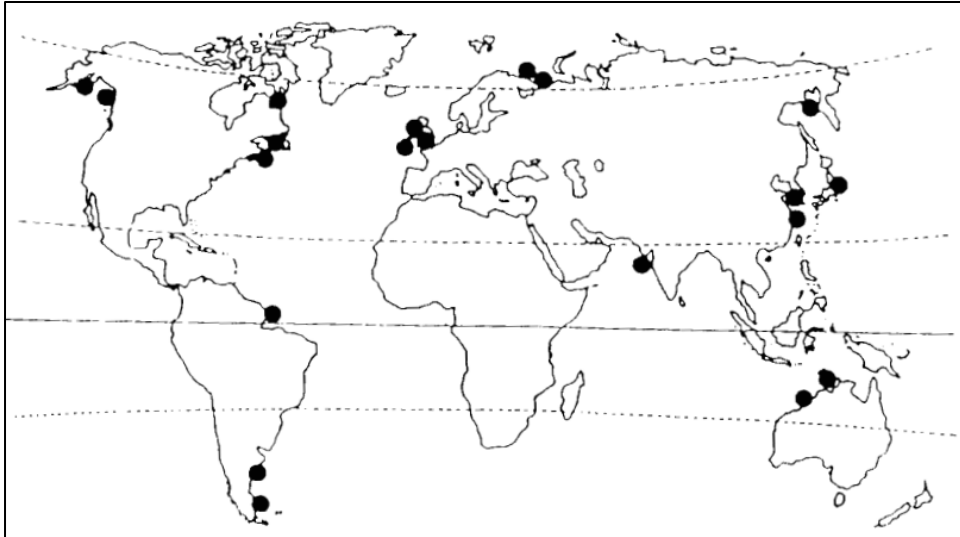
A utilização da energia por maré é sem dúvida uma alternativa em potencial frente às necessidades da civilização e indústria moderna, de forma que se alcance uma metodologia de geração de energia das marés sem causar danos à vida aquática e nas costas, assim como gerar o menor impacto ambiental possível (KULKARNI, 2015).

Nesse contexto, a energia proveniente das marés ganha espaço dentre as alternativas de energia sustentável, uma vez que tem previsibilidade. Segundo Rourke, Boyle e Reynolds (2010), a exploração da energia da maré é executada de forma notável desde a construção da Barragem de maré de La Rance (França) em 1967 e, a datar deste período, diversos outros projetos foram desenvolvidos e aplicados.

De acordo com Neto et al. (2011), a energia de origem oceânica recebe cada vez mais destaque e participação na geração de energia elétrica, não são muitos os locais com

amplitudes de maré relevantes e com condições geográficas apropriadas para este tipo aproveitamento de energia renovável. Além disso, conforme Hammons (1993), as regiões onde as marés são mais adequadas para utilização de maremotrizes estão dispostos em certos locais (figura 31) como o Reino Unido e a América do Sul, à exemplo a costa norte do Brasil. (CHARLIER; FINK, 2009).

Figura 31 – Regiões adequadas para maremotriz.



Fonte: Hammons (1993).

Segundo Sousa (2018), a geração de energia maremotriz assimila energia tanto pela corrente de maré como pelo gradiente de maré. Mediante o deslocamento da massa de água, proveniente das marés e com o auxílio de turbinas, as correntes de maré são convertidas de energia cinética em energia mecânica e a partir do gerador, em energia elétrica. O segundo método, gradiente de maré, aproveita o deslocamento vertical de subida e descida do nível de maré, para assim, preencher um dado reservatório e, converter a energia potencial em energia elétrica.

Existem duas categorias de instalações, as barragens de maré - que consistem em bacia única ou bacia dupla (BAKER, 1991) - e turbinas de correntes de maré, ambas utilizam respectivamente a energia potencial e energia cinética oriundas das marés.

- **Energia cinética – Correntes de maré**

Para geração de energia elétrica a partir da hidrocínética das correntes de marés, utilizam-se, no entanto, esses dispositivos que captam somente uma parcela da energia cinética a partir das correntes que passam na área de varredura, da qual a potência pode ser expressa consoante a equação a seguir (JUNG, 2015):

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (9)$$

De modo que,

C_p – é o coeficiente de potência definido conforme a lei de Betz;

A – representa a área de varredura das pás da turbina (m^2);

ρ – é a densidade da água (kg/m^3);

U – é a componente U da velocidade da água ($m.s^{-1}$).

Conforme Jung (2015), dentre as técnicas aplicadas para aproveitamento de energia pelas marés, pode-se mencionar suas vantagens e desvantagens de acordo com as características do local de aplicação.

Dentre os métodos, tem-se a barragem de maré que consiste basicamente na construção de uma barragem atuando como reservatório durante a maré cheia e esvaziada durante a maré baixa, utilizando turbinas em sua base, apresenta como vantagens alta geração de energia, tecnologia testada com eficiência e pouca manutenção, no entanto, são necessárias elevadas variações de maré e exibem maior impacto ambiental dentre as técnicas, sem contar seu alto custo de construção.

Outro método é a lagoa de maré, é composta por uma estrutura que isola em 360 graus uma dada área mediante barragem. Esta técnica pode ser instalada tanto em áreas costeiras como oceânicas. Apresenta elevada geração de energia, assim como tecnologia verificada com eficiência comprovada, pouca manutenção e menor impacto ambiental em comparação com as barragens, por outro lado, necessita de elevadas variações de maré, possui custo excessivo e menor geração de energia se comparado às barragens.

A técnica que aplica turbinas de correntes de maré é um método que deriva das turbinas eólicas. São inseridas em canais que dispõem de correntes de maré com

velocidade superiores à 1 m.s^{-1} (FRAENKEL, 2007). A geração de energia é modular, apresenta baixo custo e menor impacto ambiental, além disso, como desvantagem, estes equipamentos exprimem complexa manutenção e desgaste mais problemático.

Também tem-se um método que utiliza paredes longas perpendiculares à costa denominado “energia de maré dinâmica”. Consiste no direcionamento do fluxo de água, isto é, as ondas de maré, por uma passagem onde estão localizados geradores. Possui elevada capacidade de geração de energia e é uma instalação única, sendo um projeto de larga escala, de alto custo e poucas áreas adequadas para instalação (TIDAL POWER, 2014; JUNG, 2015).

- **Tecnologias**

Segundo Khan e Bhuyan (2009) em suas contribuições ao OES IA (2009) – “*Acordo de Implementação de um Programa cooperativo em Sistemas de Energia Oceânica*” – elaborada pela Agência Internacional de Energia (AIE), uma gama de estudos está em fase de desenvolvimento de tecnologias e projetos de energia marinha de pequena e larga escala por todo o mundo. Além disso, diversas tecnologias de energia oceânica vêm sendo aplicadas em sistemas de teste em especial nos sistemas de conversão de correntes de maré com projetos de demonstração de 1 a 3 MW.

- **Tecnologias de extração de energia de correntes de maré**

A utilização de turbinas está além da exploração de energia maremotrizes, sendo também um elemento de destaque para novos projetos com foco no aproveitamento de energia das **correntes de maré** e sua conversão em energia elétrica mediante sistemas modulares de turbina em regiões litorâneas (NETO et al., 2011).

Ao longo dos anos vários países têm investido em pesquisas de geração de energia por correntes de maré à exemplo, Reino Unido, Itália, China, Canadá, Japão e Estados Unidos (tabela 13). Contemporaneamente, há diversas aplicações práticas de tecnologias de geração de energia das marés de fluxo axial, uma vez que exibem boas perspectivas de comercialização e desenvolvimento em larga escala (QIAN et al., 2019).

Tabela 13 - Performance de alguns tipos de turbinas de correntes de maré.

País	Companhia	Nome do dispositivo	Potência nominal da corrente (m.s⁻¹)	Velocidade nominal da corrente (m.s⁻¹)	Coefficiente de eficiência energética
Reino Unido	MCT	Seagen	1,2 MW	2,25	0,45
EUA	Verdante Power	RITE	35,9 Kw	2,2	0,34
Reino Unido	SMD Hydrovion	TIDEL	1 MW	2,3	0,31
Ireland	Openhydro	Open Centre	1520 Kw	2,57	0,51
Canadá	Clean Coastal	Clean Coastal	1 MW	2,65	0,5
Reino Unido	Lunar Energy	RTT	1 MW	3	0,5
EUA	UEK	UEK	400 Kw	3	0,7
EUA	GHT	GHT	1,5 Kw	1,5	0,36
Sweden	Seapower	EXIM	2 Kw		
Denmark	Tiding	Tiding	4,2 Kw	3	0,45
China	Harbin Engineering University	Vientiane II	70 / 40 Kw	3,5 / 2,5	0,26 / 0,35
China	Ocean University of china		5 Kw	2	0,28
Reino Unido	Nova Innovation	Nova M100	100 Kw	2	-
Reino Unido	Simec Atlantis Energy	AR 1500	1500 Kw	3	-
França	GDF Suez, Eole Generation	Sabella D10	1,1 MW	4	-
França	Alstom	Beluga 10	1 MW	4,5	-

Fonte: Qian et al. (2019).

Segundo Neto et al. (2011), há uma tendência tecnológica na exploração comercial das correntes de maré justamente pelo potencial energético que esta fonte oferece, assim, de acordo com os autores, a tecnologia de turbina de correntes de maré conta com diversos modelos em escala reduzida e protótipos em escala real elaborados e desenvolvidos contando com o apoio do centro de teste Europeu de Energia Marinha (EMEC), o qual tem por objetivo dar suporte aos desenvolvedores de tecnologia de energia marinha.

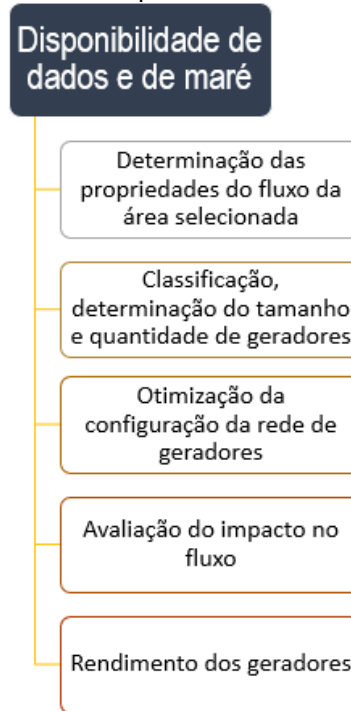
De acordo com Khan et al. (2009) e Jung (2015), esta tecnologia apresenta bons resultados aplicadas em fazendas com diferentes unidades de turbinas, proporcionando uma versatilidade de escala de instalação conforme o local. Além disso, o aproveitamento da energia das correntes de maré é feito mediante equipamentos alocados pontualmente nas “correntes” e produzem energia através do fluxo de água com o auxílio de turbinas podendo ser de eixo horizontal, eixo vertical, lâminas oscilantes e venturís, que são exemplos das tecnologias de extração de energia do fluxo.

Existem diversos métodos de fixação de dispositivos de correntes de maré como ancoragem, plataformas flutuantes ou semiflutuantes, todos fixadas no local com a ajuda de linhas de ancoragem marinho (KHAN; BHUYAN, 2009). Conforme a análise dos autores mencionados, existe uma relação de proporcionalidade entre a velocidade da corrente ao cubo, a área da seção transversal e, como consequência desses dois fatores, a energia disponível. Portanto, as características dimensionais de área da turbina, junto às saídas de velocidades de fluxo da maré, são quem definem a potência gerada.

Diante disso, embasado na análise dos referidos autores, compreende-se o motivo de os sistemas de correntes de maré serem mais apropriados em locais de canais estreitos ou em regiões com particularidades que proporcionem altos fluxos de velocidade de $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ou mais, variando ao decorrer do dia semelhantemente ao padrão da altura de maré.

As etapas de aproveitamento da energia de correntes de maré seguem uma linha cronológica (figura 32) de forma que sejam efetuados esforços de levantamento de dados da área e modelagem numérica, aonde a abordagem altera-se segundo os aspectos do sítio em análise.

Figura 32 – Etapas do processo de aproveitamento de correntes de maré.



Fonte: University of Southampton (2010 apud JUNG, 2015, p. 17).

- **Turbina de eixo horizontal**

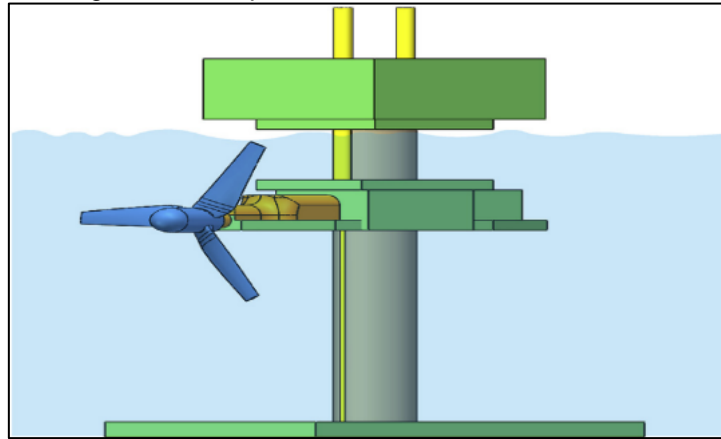
Apoiado em como dá-se o processo de aproveitamento das correntes de maré, é válido detalhar os tipos de turbinas utilizadas ou que estão em desenvolvimento, aonde segundo relatos de Jung (2015), em torno de 90 modelos de protótipos de turbinas estavam sendo elaborados no período de sua pesquisa.

Conforme sua explanação, as turbinas de eixo horizontal são as mais comumente utilizadas com diversas especificidades como dutos, lâminas de passo variável, dentre outras características, as turbinas de eixo horizontal de rotação e apesar de não apresentar desempenho superior às demais, é o meio mais comumente utilizado para extração de energia das correntes marítimas, de modo que, estes dispositivos são categorizados de duas maneiras: dutos e não dutos (KHAN; BHUYAN, 2009; JUNG, 2015; WANG et al., 2017; QIAN et al., 2019).

As turbinas deste tipo compõem-se de um eixo horizontal de rotação de forma que estejam paralelas ao fluxo de corrente, o que promove maior captação de energia, além disso a pá poderá ser fixa ou inclinada (figura 33) (QIAN et al., 2019). Com a variação da

velocidade dos fluxos de maré, comumente utilizam-se em diversos projetos, geradores de velocidade variável acoplado ao eixo da turbina, seja diretamente ou mediante uma caixa de engrenagens, a fim de gerar eletricidade.

Figura 33 – Esquema de turbina de eixo horizontal.

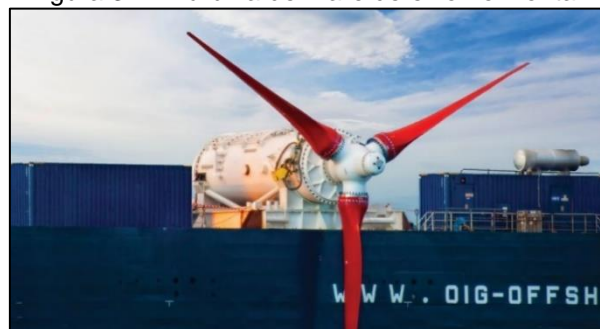


Fonte: Qian et al. (2019).

De acordo com Qian et al. (2019), turbinas de correntes de maré de eixo horizontal apresentam elevada eficiência de conversão de energia, o que explica sua ampla utilização, onde as diversas configurações e técnicas de controle dispõem de vantagens e desvantagens o que influenciam na eficiência, requisitos de manutenção e o custo da eletricidade da corrente de maré.

Como exemplo de turbina de eixo horizontal, tem-se a tecnologia de turbina da ANDRITZ Hidro Hammerfest, o qual dispõe de um software de controle automático que governa o sistema de monitoramento guiado por sensores. Este equipamento é projetado para lidar com corrente de em média 5 m.s^{-1} , para profundidades de até 100 m no fundo do mar e posicionadas com auxílio da gravidade (figura 34)(ANDRITZ, 2022).

Figura 34 – Turbina de maré de eixo horizontal.

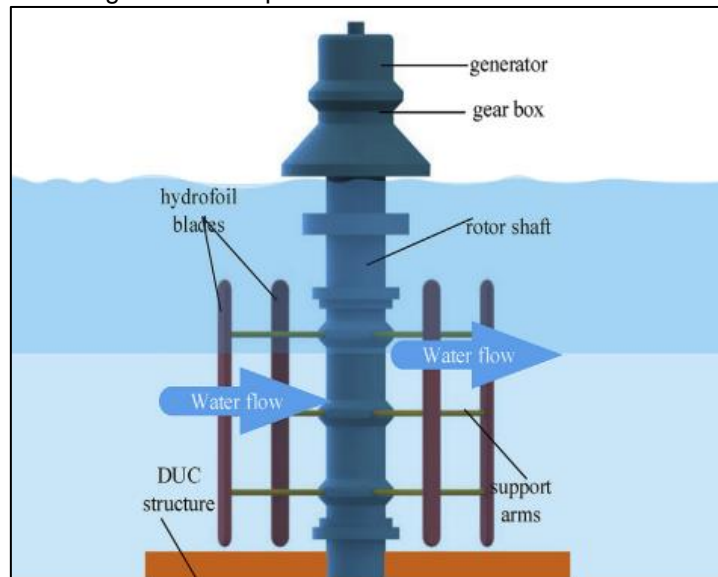


Fonte: ANDRITZ (2022).

- **Turbina de eixo vertical**

Este tipo de turbina tem ganhado cada vez mais espaço entre as empresas de energia oceânica através de projetos dos quais, alguns apresentam lâminas de passo variável ou dutos moldados para conduzir fluxo das correntes. Essas turbinas demonstram algumas vantagens como bom desempenho em meio ao baixo fluxo de fluidos em qualquer direção, proporcionando a produção de energia tanto por fluxos bidirecionais como por fluxos elipsóides e, em comparação à turbina de eixo horizontal, exibem área de seção transversal maior em águas rasas (figura 35)(ELGHALI et al., 2007; KHAN; BHUYAN, 2009; CHEN et al., 2018; QIAN et al., 2019).

Figura 35 – Esquema de turbina de eixo vertical.

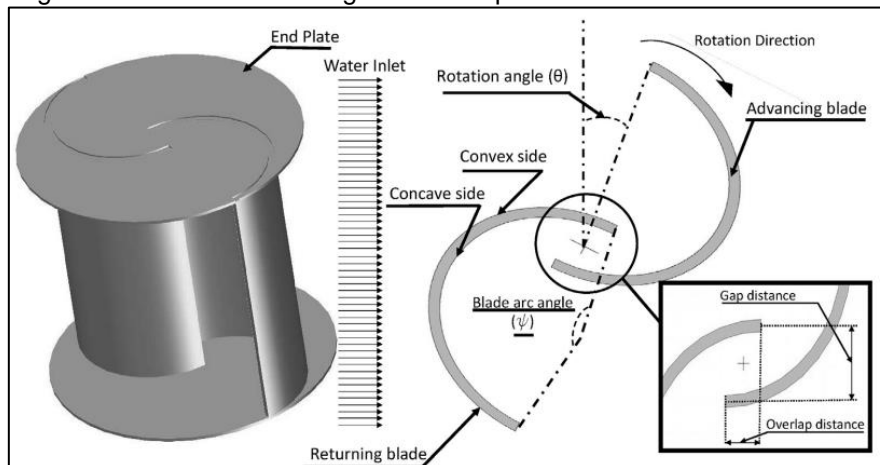


Fonte: Qian et al. (2019).

De acordo com Qian et al. (2019), as turbinas de correntes de maré de eixo vertical, por não possuir mecanismo de reversão de pás, exibem uma estrutura mais simples, além de apresentar velocidade de rotação menor em comparação às turbinas de maré de eixo horizontal. Dentre os tipos de turbinas de maré de eixo vertical, vale destacar a Savonius, Darrieus, Gorlov, Lucid, dentre outros (SAMADI; HASSANABAD; MOZAFARI, 2022)

A fim de desenvolver um conversor de energia hidrocínética eficiente em condições de baixa velocidade de correntes de maré, Kerikous e Thevenin (2019) em seus estudos utilizaram turbinas Savonius para investigar a forma ideal de pás nesse tipo de turbina para maximizar a potência de saída conforme o perfil da pá (figura 36).

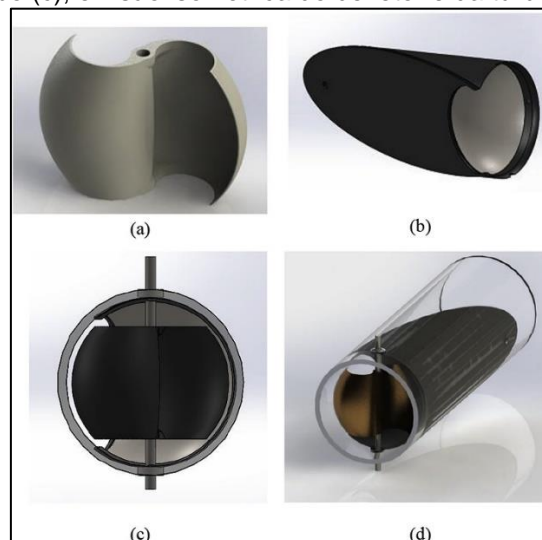
Figura 36 – Características geométricas padrão de uma turbina Savonius.



Fonte: Kerikous e Thevenin (2019).

Payambarpour, Najafi e Magagnato (2020) em seu estudos, no intuito de aprimorar uma nova turbina Savonius, investigaram a geometria do defletor a fim se obter maior eficiência, onde a nova turbina Sarvonius possui duas pás, formadas de vários semicírculos com diferentes diâmetros e com eixo perpendicular ao sentido do fluido (figura 37).

Figura 37 - Visão isométrica da turbina (a), visão isométrica do defletor (b), visão frontal do defletor e da turbina no tubo (c), e visão isométrica do defletor e da turbina no tubo (d).



Fonte: Payambarpour, Najafi e Magagnato (2020).

Gorle et al. (2019), a fim de melhorar o desempenho das turbinas Darrieus, descrevem um método baseado em cinemática em detrimento ao controle de circulação em torno das pás da turbina, onde o fluxo é controlado conforme o movimento de inclinação das pás.

Como exemplo de equipamento pertinente para locais de baixa profundidade, tem-se o hirofólio oscilatório, o qual é impulsionado pelo fluxo incidente com vantagem relativa à área de varredura da pá, a qual influencia diretamente na potência do dispositivo produzindo até quatro vezes mais energia que uma turbina horizontal.

À vista disso, salienta-se algumas das tecnologias produzidas a partir dos modelos:

- **Turbina DeltaStream**

De acordo Rourke, Boyle e Reynolds (2010), a Turbina DeltaStream é constituída de três turbinas de maré de eixo horizontal de três pás com diâmetro de 15 m cada, estruturada em um arranjo triangular. Um dado que vale mencionar é a potência da qual este equipamento dispõe, com 1,2 MW.

- **Turbina de Maré Evopod**








Segundo o estudo mencionado, esta turbina foi desenvolvida pela empresa Ocean Flow Energy Ltda e, de modo geral, este equipamento consiste em uma estrutura flutuante de eixo horizontal ancorada ao fundo do mar. A elaboração do sistema de ancoragem proporciona à estrutura adequado posicionamento em relação à corrente de maré.

- **Turbina de Fluxo livre**

Esta turbina possui 4,68 m de diâmetro e consiste em um eixo horizontal de três pás. De acordo com a síntese de Rourke, Boyle e Reynolds (op. Cit), esta turbina chega a produzir 1 MW h de eletricidade ao dia e por volta de 2008, a empresa responsável pela tecnologia, a Verdant Power Ltd., receberam investimentos para aprimorar o equipamento. A partir dos diversos tipos de turbinas, vale mencionar algumas das organizações que desenvolvem tecnologias para extração de energia a partir das correntes de maré (tabela 14).

Tabela 14 - Algumas das Organizações, Tecnologias desenvolvidas e localizações.






(continua)

Tecnologias de Corrente de Maré				
Companhia/Organização	Nome do Equipamento	Tecnologia	Tipo de Turbina	Localização
Tecnologia de Corrente Marinha	SeaGen		Turbina de eixo Horizontal	UK
Verdant Power LLC	Verdant Power - Turbine		Turbina de eixo Horizontal	US
Hammerfest Strom AS	Hammerfest - Turbine		Turbina de eixo Horizontal	Norway
UEK Systems	UEK Turbine		Turbina de eixo Horizontal - Duto	US
Corrente Limpa	Clean Current Tidal Turbine		Turbina de eixo Horizontal - Duto	Canadá
SMD Hydrovision	TidEL		Turbina de eixo Horizontal	UK
OpenHydro Group Ltd	Open-Centre Turbine		Turbina de eixo Horizontal - Duto	Irlanda

(continua)

Teamwork Technology BV	Tocado		Turbina de eixo Horizontal	Holanda
Oceanflow Energy, Overberg Ltd	Evopod		Turbina de eixo Horizontal	UK
Scotrenewables	Scotrenewables Tidal Turbine (SRTT)		Turbina de eixo Horizontal	UK
Swanturbines	Swan Turbine		Turbina de eixo Horizontal	UK
Lunar Energy	Rotech Tidal Turbine		Turbina de eixo Horizontal - Duto	UK
TidalStream	Semi-Submersible Turbine		Turbina de eixo Horizontal	
Pole Mer Bretagne	Energia Marinha		Turbina de eixo Horizontal - Duto	França
Tidal Generation Limited	Turbina de maré submersa		Turbina de eixo Horizontal	UK

(conclusão)

GCK Technology Inc	Turbina Gorlov		Turnina de Eixo Vertical	US
Corporação Hidrelétrica Costeira	Turbina Vertical Dutada		Turnina de Eixo Vertical	Canadá
Atlantisstrom	Atlantisstrom		Turnina de Eixo Vertical	Alemanha
(Enermar Project) Ponte Di Archimede International S.p.A.	Turbina Kobold		Turnina de Eixo Vertical	Itália
BioPower Systems	bioStream		Hidrofólio	Austrália

Fonte: Khan e Bhuyan (2009);Tidal Power (2014); Jung (2015).

4.5.1 Tecnologias adequadas à PCIA

Conforme as tendências mundiais, verificou-se algumas tecnologias para extração da energia elétrica aplicadas em locais onde as correntes de maré apresentam baixa velocidade (tabela 15):

Tabela 15 - Exemplo de Tecnologia de aplicados em correntes de maré de baixa velocidade.

Localização (País)	Companhia	Nome do dispositivo	Potência nominal	Velocidade de corrente avaliado (m.s⁻¹)
EUA	GHT	GHT	1,5 Kw	1,5
Sweden	Seapower	EXIM	2 Kw	-
China	Ocean University of China	-	5 Kw	2
	Nova Innovation	Nova M100	100 Kw	2
UK	Simec Atlantis Energy	Seagen	1,5 MW	1,5

Fonte: Qian et al. (2019); Liu et al. (2021).

Evidencia-se que o progresso e aplicação dessas tecnologias estão em fase de desenvolvimento e na costa brasileira ainda não há casos da utilização dessas tecnologias, em vista disso, trabalhos como o referido estudo são de grande valia para inovação e exploração das fontes de energia renovável.

Para a área de estudo, verificou-se que o campo de velocidade das correntes de maré alcança 1,5 m.s⁻¹ não sendo adequado à instalação de turbinas de maré convencionais. Conforme proposto por Samadi, Hassanabad e Mozafari (2022), turbinas com defletores semi-cilindros adicionada às turbinas de maré Savonius podem ser uma viável técnica para extração de energia de correntes de maré de baixa velocidade.

Verificou-se que as velocidades máximas de correntes de maré na PCIA ocorrem nas regiões mais estreitas do Canal do Varador, onde a velocidade das correntes chega a $1,51 \text{ m.s}^{-1}$. Segundo a abordagem de Samadi, Hassanabad e Mozafari (2022), desenvolveram-se simulações com a turbina Savonius 2,3 e 4 pás e modelagem computacional de dinâmica dos fluidos, o qual baseia-se nos princípios de mecânica dos fluidos, com aplicação de métodos numéricos e algoritmos para solução de problemas que envolvam escoamentos de fluidos.ra

A turbina é caracterizada conforme o esquema adotado por Wenehenubun, Saputra e Sutano (2015), a fim de estabelecer, inicialmente, a geometria e as condições de contorno da turbina (tabela 16).

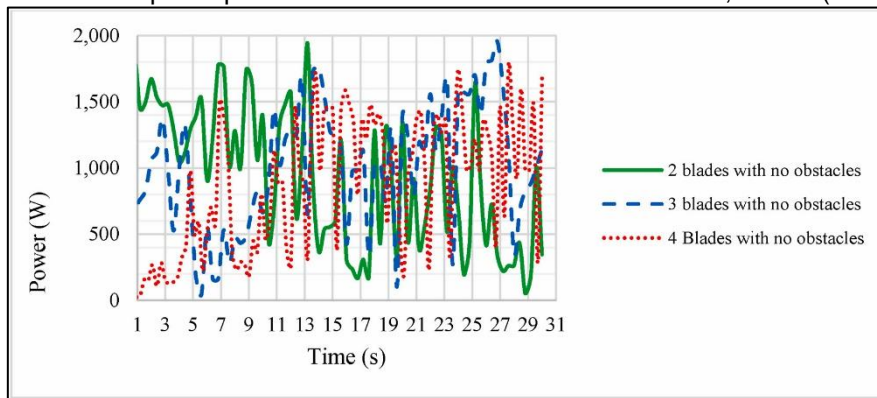
Tabela 16 – Caracterização da turbina desenvolvida por Wenehenubun, Saputra e Sutano (2015).

Especificação	Dados de entrada
Dimensão	Valor (m)
Diâmetro do rotor	3,00
Diâmetro do defletor	2,20
Diâmetro do cubo (e: folga das lâminas)	0,80
Altura da turbina e do defletor	3,00
Espessura máxima das lâminas e do obstáculo	0,3
Espessura mínima das lâminas e do obstáculo	0,10
Condição	Descrição
Fluido	Água ($\rho = 1000 \text{ kg / m}^3$)
Temperatura do fluido	20° c
Velocidade da corrente	1,00, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 m.s^{-1}
Relação de sobreposição	0,22

Fonte: Samadi, Hassanabad e Mozafari (2022).

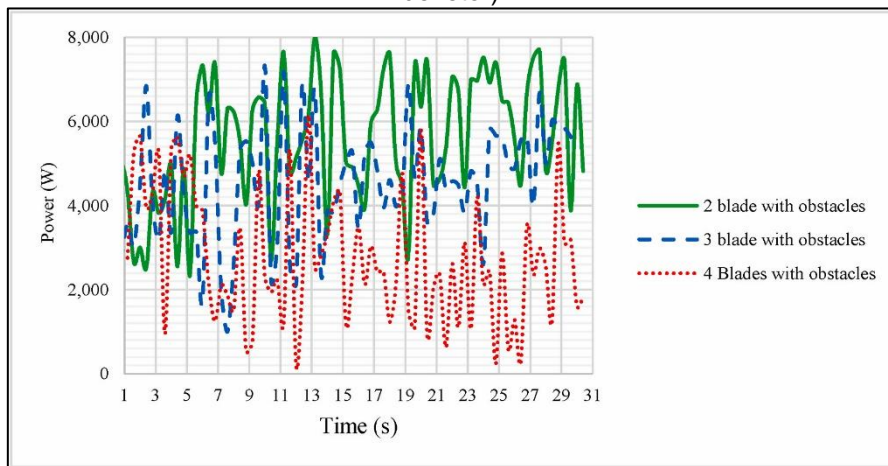
Conforme a modelagem das turbinas, fez-se a comparação de ambos os casos de turbinas Savonius com ou sem defletores, onde é possível observar a série temporal da potência de saída da turbina na velocidade de fluxo de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ nos seis modelos a seguir (figuras 38, 39 e 40), onde conclui-se que turbinas Savonius com defletores apresentam considerável aumento de potência de saída em correntes de baixa velocidade ($< 2 \text{ m.s}^{-1}$).

Figura 38 – Histórico de tempo da potência de saída da turbina à velocidade $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ (turbina sem defletor).



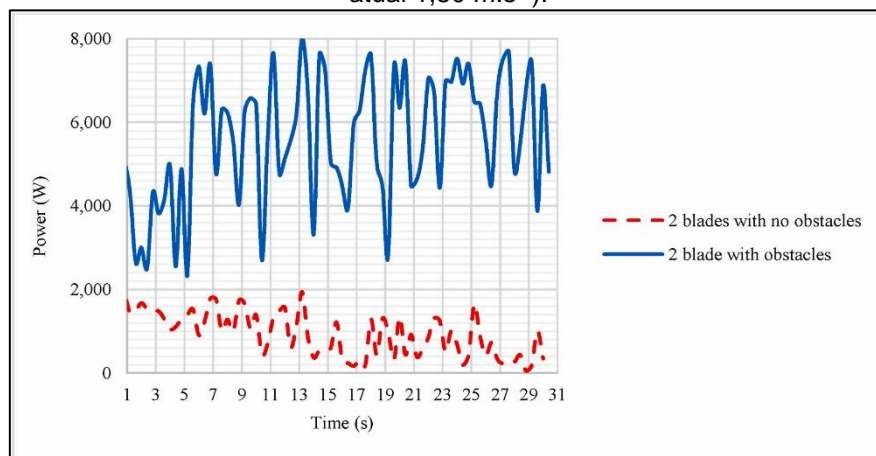
Fonte: Samadi, Hassanabad e Mozafari (2022).

Figura 39 - Histórico de tempo da potência de saída da turbina à velocidade atual $1,50 \text{ m.s}^{-1}$ (Turbina com defletor).



Fonte: Samadi, Hassanabad e Mozafari (2022).

Figura 40 – Comparação das duas maiores potências da turbina em casos com e sem defletor (velocidade atual $1,50 \text{ m.s}^{-1}$).



Fonte: Samadi, Hassanabad e Mozafari (2022).

Conforme Samadi, Hassanabad e Mozafari (2022), a turbina Savonius proposta em seu estudo de modelagem, apresentou um crescimento de 500 %, 170 %, 50 % e 29 % na potência de saída para as velocidades 1,5, 2, 2,5 e 3 m.s⁻¹, aproximadamente. Desse modo, segundo a abordagem dos autores, as turbinas Savonius com defletores semicilindros, demonstram relativo aumento, mais de 150 % no coeficiente de potência em comparação ao rotor Savonius comum (sem defletores) em corrente de maré igual ou inferior a 2 m.s⁻¹ na zona estreita do canal.

As principais características de fundo do Canal do Varador estão relacionadas aos sedimentos finos modernos decorrentes do aporte fluvial amazônico transportado ao norte pelas correntes, assim como pelo regime de macromaré (FERNANDEZ et al., 2019).

Compreender as alterações causadas ao meio ambiente a partir da instalação de tecnologia de turbinas de marés envolve tanto avaliar a variação da densidade energética a partir da determinação da localização ideal para aplicação das técnicas como da avaliação das correntes de maré (hidrodinâmica) e da concentração de sedimentos suspensos (CSS) no estuário (ROSS et al., 2021).

O ecossistema e as populações humanas determinam a disposição e localização das turbinas de maré em detrimento aos impactos hidrodinâmicos e ao transporte de sedimentos influenciados pela implementação das técnicas de extração de energia de correntes de maré e, conforme abordagem de Ross et al. (2021), no estuário do rio Gironde (sudoeste da França), a instalação das turbinas resultou na redução das correntes em até 10 % e diminuiu a CSS até 15 mg/L.

Segundo Ross et al. (2021), a redução da CSS deu-se em razão da atenuada velocidade das correntes de maré pela presença das turbinas, suavizando a velocidade de fricção, o que gerou a diminuição da turbulência que suspende o sedimento do fundo e, com o tempo a moderação da CSS acarretará ao acúmulo de sedimentos e novas características de fundo.

Diante da análise dos resultados do estudo de caso citado, percebe-se a necessidade de uma profunda análise quanto aos impactos causados à hidrodinâmica e ao transporte de sedimentos nos estuários em que se pretendem aplicar técnicas de extração de energia a partir das correntes de maré.

5. CONCLUSÃO

A partir da aplicação das ferramentas de modelagem para o desenvolvimento do modelo de elevação digital SRTM para análise do relevo, assim como da utilização de modelagem computacional para simulações hidrodinâmicas a fim de analisar o comportamento das correntes de maré na PCIA, nota-se a relevância da utilização de modelos de elevação digital (MDE) para análise da geomorfologia e dos modelos hidrodinâmicos relacionados a estudos voltados ao potencial energético provenientes das correntes de maré.

Situado na PCIA, mediante o MDE, verificou-se que o Canal do Varador apresenta profundidades que oscilam entre 4 m e 24 m. Na ponta norte da ilha de Maracá as profundidades variam entre 10 m a 18 m, com maiores profundidades em sua desembocadura, variando entre 8 m a 24 m.

A aplicação do SisBaHiA apresentou dados satisfatória para o desenvolvimento do estudo a fim de trazer à conhecimento os aspectos de circulação hidrodinâmica, contribuindo para identificação dos locais com potencial hidrocinético, ideais para extração de energia das correntes de maré. Vale ressaltar que a área de estudo apresenta complexidade e carência de informações para dados de entrada no software, no entanto, o programa mostrou-se eficiente com resultados coerentes com a realidade do local.

Para as simulações hidrodinâmicas no SISBAHIA, aplicou-se o 2DH que utiliza as dimensões (x, y, t) e, conforme os dados gerados pelas simulações, foi possível compreender a dinâmica das forças incidentes no sistema hidrodinâmica. Através das simulações, verificou-se que as velocidades mínimas de correntes na PCIA ocorrem somente nos períodos de $\frac{1}{2}$ maré enchente e $\frac{1}{2}$ maré vazante de sizígia, com velocidades de correntes entre $1,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ em duas áreas, ambas nas extremidades do canal do Varador.

Durante o estofo de preamar e de baixamar de sizígia as correntes de maré atingiram velocidades entre $0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $0 - 0,43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente, em grande parte do domínio, onde conforme a vetorização das correntes, observou-se coerência ao movimento das correntes segundo os períodos de simulação. Desse modo, a partir das simulações foram identificados dois segmentos do canal do Varador com potencial energético. Em diferentes

momentos de maré: sendo as maiores $1835,56 \text{ W.m}^{-2}$ e $1152,15 \text{ W.m}^{-2}$ (sizígia) e $645,60 \text{ W.m}^{-2}$ (quadratura).

A curva de elevação de maré resultante da modelagem indica elevações máxima de 7,55 m e mínima de 0,40 m, demonstrando valores próximos do real em comparação às medições das Estações Maregráficas próximas à PCIA. Quanto às velocidades identificadas nas simulações, nas proximidades da parte superior e inferior ao estreito da ilha de Maracá, observou-se serem as áreas de maior potencial energético em comparação aos demais locais da PCIA. O resultado do valor de EQM para a primeira $\frac{1}{2}$ maré enchente de quadratura foi de 0,17, o que indica um erro mínimo, provando a eficácia do modelo.

As velocidades de correntes geradas, mostraram-se adequadas diante dos aspectos hidrodinâmicos provenientes dos ciclos de maré e características geomorfológicas, onde há trechos com potencial energético a ser explorado, fazendo-se necessário a identificação de tecnologias apropriadas às singularidades da PCIA em meio à variação da profundidade e tipo de sedimentos advindos do fluxo do rio Amazonas. Deste modo, analisar detalhadamente esses fatores é de fundamental importância para assertiva escolha de tecnologia a ser empregada. Assim, depreende-se que o objetivo central do estudo foi alcançado, visto que o SisBaHia rodou de maneira satisfatória na PCIA, onde os resultados obtidos tornaram possível a análise das correntes de maré nesta região.

O conhecimento sobre a exploração de energia a partir da aplicação de tecnologias em correntes de maré é fundamental para identificação das áreas com potencial energético e das tecnologias pertinentes a esse tipo de geração de energia. Dentre as diversas tecnologias renováveis, tem-se que a exploração das correntes costeiras para geração de energia elétrica apresenta uma dupla vantagem, a previsibilidade e pouco impacto visual.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, C. H. M.; BARROS, M. L. C.; BRITO, D. C.; TEIXEIRA, M. R.; CUNHA, A. C. Hydrodynamic Modeling and Simulation of Water Residence Time in the Estuary of the Lower Amazon River. **Water**, v. 12, p. 660, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **HIDROWEB**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>. Acesso em: 04 dez. 2022

Aguilera, L.; Dos Santos, A. L. F.; Rosman. P. C. C. On characteristic hydraulic times through hydrodynamic modelling: discussion and application in Patos Lagoon (RS). **Revista Ambiente & Água**. v. 15, n 2. p. 1-20. Taubaté. feb. 2020.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. Obras de Gestão de Portos e Costas: A técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. and Energy, vol. 221, Issue: 2, Pages: 159-169. São Paulo: **BLUCHER**, 2005.

AMARAL, C. Z. **Identificação e mapeamento de regiões potenciais à instalação de turbinas hidrocínéticas na bacia hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro – Oeste do Paraná**. 2021. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel - PR.

AMASSedS. A multi-disciplinary amazon shelf sediment study (amasseds). Eos, Trans AGU 71:1771. 1990.

ANDRITZ. **Andritz**. Disponível em: <https://www.andritz.com/products-en/hydro/products/tidal-current-turbines>. Acesso em: 13 abr. 2022.

ANTHONY, E. J.; BRONDIZIO, E. S.; SANTOS, V. F.; GARDEI, A.; BESSET, M. Sustainable Management, Conservation, and Restoration of the Amazon River Delta and Amazon-Influenced Guianas Coast: A Review. **Water**, v 14, n 10, p. 1371, 2021.

ARAÚJO, Alan Nunes. **Análise integrada da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari - AP: subsídios ao planejamento ambiental**. 2019. 280 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

ARAÚJO, E.P.; de Abreu, C.H.M.; CUNHA, H.F.A. et al. Vulnerability of biological resources to potential oil spills in the Lower Amazon River, Amapá, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**. p. 1-20, december. 2022.

AZEVEDO, A., El – Robrini M., SAAVEDRA O. Assessment of Tidal Current Potential in the Pará River Estuary (Amazon Region – Brazil). **SSRN**. p. 1-22. 2022.

AZEVEDO, T. N. A. **Aplicação da modelagem (Bidimensional – 2 DH) Hidrodinâmica na identificação de áreas com potencial energético no estuário do Rio Pará (Estado do Pará/Brasil)**. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

BAKER, C. Tidal power. **Elsevier**, v 19, n. 8, p. 792–797, 1991.

BARBOSA, D. G., et al. Assessment of tidal stream energy potential: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, 2021.

BARROS MLC, da Silva T.D; da CRUZ, A.G.B. et al. Numerical simulation of wetland hydrodynamics and water quality. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 42(444):1–15. August. 2020.

BLUNDEN, L. S.; BAHAJ, A. S. Tidal energy resource assessment: Global and regional perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, 2019.

BOAVENTURA, F. M. C ; NARITA, C. Geomorfologia da Folha NA/NB-22-Macapá. In: **PROJETO RADAM. Folha NA/NB-22-Macapá: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro : DNPM, 1974. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.6).

BRUNIER, G., TAMURA, T., ANTHONY, E.J. et al. Evolution of the French Guiana coast from Late Pleistocene to Holocene based on chenier and beach sand dating. **Reg Environ Change**, p. 1-14, 2022.

BURASCHI, G.V.; Gallo, M.N. Hydro-morphodynamics of a dredged tidal canal, Fundão Canal-RJ, Brazil. **J. S. Am. Earth Sci.** 2021, 112, 103603.

BURT, C. C. Extreme Weather: A Guide & Record Book. 1^a ed. **W. W. Norton & Company**, California, 2007.

CACHIONE, D. A., DRAKE, D. E., KAYEN, R. W., STERNBERG, R. W., KINEKE, G. C., E TAYLE, G. B. Measurements in the Bottom Boundary Layer on the Amazon Subaqueous Delta. **Marine Geology**, v. 125, p. 235-239, 1995.

CANDELA, J. et al. Tidal and Low-frequency circulation on the on the Amazon Shelf, obtained from Shipmounted ADCP, Observations. **From the Amassed Session at Agu Fall Metting**, p. 67-86, 1990.

CARVALHO, M. V. et al. Moisture transport and intraseasonal variability in the South. **Climate Dynamics**, v. 34, p. 1865–1880, 2010.

CASTELLO, X.; ESTEFEN, S. F.; SOARES, C. R. Os oceanos: os desafios para geração de energia sustentável. In: LANA, P. C.; CASTELLO, J. P. (org.). **Fronteiras do conhecimento em ciências do mar**. Rio Grande: Ed. da FURG, 2020. p. 158 - 180.

- CHARLIER, R. H.; FINK, C.W. Ocean Tidal: Tide and Tidal Power. 1ª ed. **Springer**, 2009.
- CHÁVARRI, E.; Crave, A.; BONNET, M.-P.; MEJÍA, A.; SANTOS DA SILVA, J.; GUYOT, J. L.. Hydrodynamic modelling of the Amazon River: Factors of uncertainty. **Journal of South American Earth Sciences**, n. 44, p. 94–103, 2013.
- CHEN, B.; CHENG, S., Su, T.; ZHANG, H. Numerical investigation of channel effects on a vertical-axis tidal turbine rotating at variable speed. *Ocean Engineering*, v. 163, p. 358–368, 2018.
- CHOWDHURY, M. S. et al. Current trends and prospects of tidal energy technology. **Environment, Development and Sustainability**, p.8179 – 8194, 2021.
- CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. 2ª ed. **Blucher**, São Paulo, 1980.
- CHRISTOFOLETTI, R. A. et al. **Ciência e Cultura**. Disponível em http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S000967252021000200008. Acesso em 15 mai. 2022.
- Companhia de Desenvolvimento das Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF. **Aproveitamento da energia dos oceanos para produção de eletricidade**. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/area-de-atuacao/bacia-hidrografica/demais-baciashidrograficas-do-estado-do-amapa>. Acesso em 03 mai. 2022.
- CONSULTA PÚBLICA. **PMSB – Planos Municipais de Saneamento Básico de Amapá**. Amapá: CONSULTA PÚBLICA. Disponível em: [Consulta Pública \(portal.ap.gov.br\)](http://portal.ap.gov.br). Acesso em: 27 mai. 2022.
- CORREA, S. W. **Reanálise hidrológica**: estudo de caso na Bacia Amazônica. 2019. 236 f. Tese (doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2019.
- COSTA, W. J. P.; TORRES, A. M. Características ambientais das águas do Rio Araguari durante o fenômeno da Pororoca. **52ª Reunião Anual da SBPC**. Anais. 2000.
- CUNHA, C. DE L. DA N., SCUDELARI, A. C., SANT'ANA, D. DE O., LUZ, T. E. B., & PINHEIRO, M. K. DA R. Effects on circulation and water renewal due to the variations in the

river flow and the wind in a Brazilian estuary lagoon complex. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, 2021.

CUNHA, J. R. C. **Modelagem (Bidimensional - 2dh) Hidrodinâmica Aplicada no Estuário do Rio Guamá (Estado do Pará/Brasil)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Naval, Belém, 2017.

CZIZEWESKI, A. C. **Correntes e energia de marés do Golfão Maranhense, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

CZIZEWESKI, A., PIMENTA, F.M. & SAAVEDRA, O.R. Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution. **Ocean Dynamics** v.70, p.667–682 2020.

DABORN, G.R., REDDEN, A.M. Estuaries. In: Finlayson, C., Milton, G., Prentice, R., Davidson, N. (eds) *The Wetland Book*. **Springer**, Dordrecht. (2018).

DALAZEN, J. P.; CUNHA, C. L. N.; A, R. C. Determinação das taxas de renovação das águas no complexo estuarino de Paranaguá. **Eng Sanit Ambient**. v. 25, n. 6, p. 887-899, nov/dez 2020.

DE ABREU, C. H. M.; BARROS, M. de L. C.; BRITO, D. C.; TEIXEIRA, M. R.; CUNHA, A. C. da. Hydrodynamic Modeling and Simulation of Water Residence Time in the Estuary of the Lower Amazon River. **Water**, v. 12, n. 3. p. 660. 2020.

DE LINAGE, C.; FAMIGLIETTI, S.; RANDERSON, T. Statistical prediction of terrestrial water storage changes in the Amazon Basin using tropical Pacific and North Atlantic sea surface temperature anomalies. **Hydrology and Earth System Sciences**, p. 2089 - 2102, 2014.

DIJKSTRA, M.; SCHUTTELAARS,. Adjustment and Extension of the Hansen and Rattray Estuarine Classification Diagram. **Journal of Physical Oceanography**, v. 51, n. 9, p. 2903 - 2913, 2021.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; SANÁNNIA NETO, J. L. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins.**,n. 37. 2018.

E. GONZÁLEZ-GORBEÑA, P.C.C. Rosman, R.Y. Qassim, **Assessment of the tidal current energy resource in São Marcos Bay, Brazil**, J. Ocean Eng. Mar. Energy 1(2015), pp. 421–433. <https://doi.org/10.1007/s40722-015-0031-5>

EDENHOFER, O.; MDRUGA, R. P.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K. (coord.). **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011, 1088 p.

ELGHALI, S. E.; BENBOUZID, M. E.; CHARPENTIER, J. F. Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current Status. **IEEE International Electric Machines & Drives Conference**, v 2, n 2, p. 1407 – 1412, 2007.

ELLIOTT, M.; MCLUSKY, D. S. The Need for Definitions in Understanding Estuaries. **Elsevier**, v 55, p. 815 – 827, 2002.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balanco Energetico Nacional 2021: Ano base 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-2021>. Acesso em 13 fev.

ESTEBAN, M., et al. Techno-economic review of tidal energy: Current status and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 121, 2020.

ESTEFEN, S. F., CASTELLO, X., LOURENÇO, M. I., & ROSSETTO, R. M. (2010, September). Design analyses applied to a hyperbaric wave energy converter. In **Proceedings of the 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures**, September (pp. 19-24).

FERNANDES, F. **MultiRio a Mídia Educativa da Cidade**. Disponível em: <http://www.multirio.rj.gov.br/index.php/leia/reportagens-artigos/reportagens/17131-a-d%C3%A9cada-do-oceano-2021-2030-por-que-e-como-falar-sobre-a-cultura-oce%C3%A2nica-na-escola>. Acesso: 20 jun. 2022.

FERNANDES, L. P. C. **Energia dos Oceanos**. 2 ed. São Paulo: Base de Hidrografia da Marinha em Niterói, 2012. 540 p.

FERNANDES, L. P. Energia dos Oceanos. 2ª ed. **Base de Hidrografia da Marinha em Niterói**, Rio de Janeiro, 2012.

FERNANDES, M. E. B. The ecology and productivity of mangroves in the Amazon Region, Brazil. **University of New York**, p. 214, New York, 1997.

FERNANDEZ, G. B.; DA ROCHA, T. B.; BARBOZA, E. G.; DILLENBURG, S. R.; DA CAMARA ROSA, M. L. C.; ANGULO, R. J.; DOMINGUEZ, J. M. L. Natural Landscapes Along Brazilian Coastline. In: Salgado, A., Santos, L., Paisani, J. (eds) The Physical Geography of Brazil. **Geography of the Physical Environment. Springer**, 2019.

FERREIRA, R. M.; ESTEFEN, S. F. Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions. **Elsevier**, v 34, n 4, p. 1151-1157, 2009.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitations Distribution over Central and Western Tropical South America. **CLIMANÁLISE - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v.5, n.6, p. 36-45, 1990.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, p. 566-576, 2011.

FISCH, G.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral do clima da Amazônia. **Acta Amazônica**. v. 28, n.2, 1998.

Flores, R. C. A.; Cunha, H. F. A.; Cunha A. C. Hydrometeorological characterization and estimation of landfill leachate generation in the Eastern Amazon/Brazil. **PeerJ**. January, 2023.

Föeger, L. B.; Buarque, D. C.; Pontes, P. R. M.; Fagundes, H. O.; Fan, F. M. Large-scale sediment modeling with inertial flow routing: Assessment of Madeira river basin. **International Environmental Modelling & Software Society**, v. 149, marc. 2022.

Fontes, R. F. C., Castro, B. M., & Beardsley, R. C. Numerical study of circulation on the inner Amazon Shelf. *Ocean Dynamics*, v. 58(3-4), 187–198 p. 2008.

Fraenkel, P. Marine current turbines: Pioneering the development of marine kinetic energy converters, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: **Journal of Power and Energy**, p. 159-169, 2007.

FRAENKEL, P., 2007. **“Marine current turbines: pioneering tidal stream technology”**. G. Hagerman, B. Polagye, R. Bedard, M. Previsic, **Methodology for estimating tidal current energy resources and power production by tidal in-stream energy conversion**

(TISEC) devices, EPRI North American tidal in stream power feasibility demonstration project (2006).

Geawhari, M. A. et al. Spatial-temporal distribution of salinity and temperature in the Oued Loukkos estuary, Morocco: using vertical salinity gradient for estuary classification. **Springer Plus**, v 3, n 643, p. 1 – 9, 2014.

GEYER, W. R. et al. The Physical Oceanography of the Amazon Outflow. **Oceanography**, vol. 4, p. 8-14, 1991.

GEYER, W. R.; BEARDSLEY, R. D; CANDELA, J.; CASTRO FILHO, B. M.; LEGECKIS, R. V.; LENTZ, S. J.; LIMEBURNER, R.; MIRANDA, L. B.; TROWBRIDGE, J. H. **The Physical Oceanography of the Amazon Outflow. Oceanography**, vol. 4, pp. 8-14. 1991.

Gorle, J. M. R., Chatellier, L., Pons, F., & Ba, M. Modulated circulation control around the blades of a vertical axis hydrokinetic turbine for flow control and improved performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, p.363–377, 2019.

GOUVEIA, N. A; GHERARDI, D. F. M; ARAGÃO, L. E. O. C. The role of the Amazon River plume on the intensification of the hydrological cycle. **Geophysical Research Letters**, v 46, p. 12221.–12239, 2019.

Guerra, M., Cienfuegos, R., Thomson, J., & Suarez, L. (2017). Tidal energy resource characterization in Chacao Channel, Chile. *International journal of marine energy*, 20, 1-16.

GUIMARÃES, R. C., OLEINIK, P. H. P., KIRINUS, E. D. P. E., LOPES, B. B. V., TROMBETTA, T. T. B., MARQUES, W. C. W., LOPES, B. B. V., DE PAULA KIRINUS, E., LOPES, B. B. V., TROMBETTA, T. T. B., E. MARQUES, W. C. W. Na overview of the Brazilian continental shelf wave energy potencial, **Regional Studies in Marine Science**. V. 25, p. 100446, 2019.

GUIMARÃES, U. S.; NARVAES, I. d.; GALO, M. D. Aplicação de Dados ERS, ENVISAT e SENTINEL para detecção de mudanças nos ambientes costeiros amazônicos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v 18, n 2, p. 257-258, 2017.

GURGEL, A. R. C. **Ressonância da Onda de Maré na Plataforma Continental Amazônica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Programa de Pós-

graduação em Física Aplicada, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

H. Wu, X. Wang, L. Han. Assessment of extractable energy of tidal current at Chengshantou cape. **Oceanol Limnol Sinica**, 44 (2013), pp. 570-576
HAMMONS, T. J. Tidal Power. **Proceedings of the IEE**, v 8, n 3, p. 419 – 433, 1993.

HANSEN, D. V.; JR., M. R. New dimensions in estuary classification. **Limnology and Oceanography**, v 11, n 3, p. 319-326, 1966.

INCT, Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologias. Disponível em: [Home - INCT \(cnpq.br\)](#). Acesso em: 07 jul.2023.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Prognóstico de Precipitação**. Disponível em: [INMET: Clima](#). Acesso em: 04 mai. 2022.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. **Plano de manejo da estação ecológica de Maracá-Jipioca (EEMJ)**. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/ptbr/assuntos/biodiversidade/unidadedeconservacao/unidadesdebiomas/marinho/listadeucs/esecondemaracajipioca/arquivos/plano_de_manejo_esec_maraca_jipioca_icmbio.pdf. Acesso em 17 jul. 2022.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea. Energia Acessível e Limpa. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html> . Acesso em 20 mai. 2022.

IPCC, 2011: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISMAIL, N. et al. A review on the status of tidal energy technology worldwide. *Sci. Int. (Lahore)*, v 29, n 3, p. 659 – 667, 2017.

JACOBSON, M. Z., et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. **Joule**, v. 4(9), p.1987-2002, 2020.

JR SILVA, O. M; SANTOS, L. S; RODRIGUES, M. C. Panorama dos riscos costeiros no estado do Amapá: Conhecer Para Agir. In: **Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano**, p. 454–472, São Paulo, 2020.

JUNG, G. B. **Avaliação das correntes de maré como recurso energético da costa do Brasil**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio Janeiro, 105 f, 2015.

JUNIOR, E.; FIRMINO, D. Evidências do aproveitamento dos oceanos como forma alternativa de energia renovável. *Rev. Terra & Cult.*, Londrina, v. 38, p. 1165–117, 2022.

Kerikous, E., & Thévenin, D. Optimal shape of thick blades for a hydraulic Savonius turbine. **Renewable Energy**. 2018.

KHAN, J.; BHUYAN, G. S. Ocean Energy: Global Technology Development Status, Report prepared. **Powertech Labs for the IEA-OES**. Canadá, 2009.

KHAN, M. J. et al. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. **Applied Energy**, v 86, n 10, p. 1823-1835, 2009.

KHAN, N. et al. Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies. **Elsevier**, v 72, p. 590 – 604, 2017.

KORONEOS, C.; SPACHOS, T.; MOUSSIOPOULOS, N. Exergy analysis of renewable energy sources. **Renewable Energy**, v 28, p. 295-310, 2003.

KULKARNI, S. J. Tidal Energy : A Review. **International Journal of Research (IJR)**, v 2, p.1-4, 2015.

LEIJON, M., et al. Environmental impacts of tidal energy technologies: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.135, 2021.

Lewis, M., et al. Tidal energy in the UK: A review of progress and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.109, p. 114-130, 2019.

Li, T.; Wang, S.; Liu, Y.; Fu, B.; Gao, D. **Reversão do aumento da carga de sedimentos na bacia amazônica influenciada por tendências divergentes de transporte de sedimentos dos rios Solimões e Madeira**. *Catena* 2020, 195, 104804.

LIANG, Y. C. et al. Amplified seasonal cycle in hydroclimate over the Amazon river basin and its plume region. **Nat Commun**, v 11, p. 4390, 2020.

Lim, Y.S.; Koh, S.L. Analytical assessments on the potential of harnessing tidal currents for electricity generation in Malaysia, **Renew Energ**, v. 35, p. 1024-1032, 2010.

LIMA NETO, I. E. et al. Simulação da compartimentação em reservatório no semiárido brasileiro uso da modelagem hidrodinâmica como ferramenta de gestão. **Revista DAE**, São Paulo, v. 69, n. 231, p. 41-53, jul./set. 2021.

LIMA, M. I.; BEZERRA, P. E.; ARAÚJO, H. J. Sistematização da geologia do estado do Amapá. III **SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA**. Anais. 1991.

LIMA, R. F. et al. Climate scenarios and your changes in the life zone for Brazil. **Research Square**, p. 1-25, 2021.

LIU, H.W. et al. A review on the development of tidal current energy in China. **Elsevier**, v 15, p. 1141 – 1146, 2011.

Liu, X., Chen, Z., Si, Y., Qian, P., Wu, H., Cui, L., & Zhang, D. A review of tidal current energy resource assessment in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 145, 2021.

LOPES, M. S. **Modelagem hidrodinâmica 2DH no Furo da Laura Nordeste Paraense**. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Pós-graduação em Geofísica, Instituto de Geociências Universidade Federal do Pará, Belém. 2016.

Luo, X.; Li, H. Y.; Leung, L.; Tesfa, T. K.; Getirana, A.; Papa, F.; Hess, L. L. Modeling surface water dynamics in the Amazon Basin using MOSART-Inundation-v1.0: Impacts of geomorphological parameters and river flow representation. **Geosci Model Dev**. v. 10, n. 3, p. 1233-1259, 2017.

MAGAGNA, D., et al. Harnessing tidal energy: A review of current technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, 2020.

Mapa de Geomorfologia do estado do Amapá. Rio de Janeiro: IBGE, 2004b. Mapa: Escala 1:750.000.

Disponível

em:<https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geomorfologia/mapas/unidades_da_federacao/ap_geomorfologia.pdf>. Acessado em: 27 de fev de 2023.

MARENGO, J. A. Condições climáticas e os recursos hídricos no norte brasileiro. In: TUCCI, C. E. M. e BRAGA, B. (org). **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Porto Alegre. ABRH, 2003. p. 117-161

MARENGO, J.A.; ESPINOZA, J.C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36(3), pp.1033-1050, 2016.

Marinha do Brasil. **Centro de Hidrografia da Marinha**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>. Acesso em: 17 ago. 2022.

Marta-Almeida, M., Cirano, M., Soares, C. G., & Lessa, G. C. A numerical tidal stream energy assessment study for Baía de Todos os Santos, Brazil. *Renewable Energy*, v. 107, p. 271-287, 2017.

MARTA-ALMEIDA, Martinho. Ocean modelling in Brazil, a quick overview. **Arquivo de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 55, p. 338-344, 2022.

MCLUSKY, D. S. Marine and estuarine gradients. **Netherlands Journal of Aquatic Ecology**, v 27, p. 489–493, 1993.

MIGUENS, A. P. Navegação: A Ciência e a Arte. Navegação Costeira, estimada e em águas restritas (Vol. I). 1ª ed. **Diretoria de Hidrografia e Navegação**, Rio de Janeiro. 2019.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Década da Ciência Oceânica Brasil**. Disponível em: <https://decada.ciencianomar.mctic.gov.br/documentos/>. Acesso em 01 dez. 2021.

MOLINAS, E. **Marés internas e dinâmicas sedimentar na Plataforma Continental Amazônica**. Tese (Doutorado) – UFRJ / COPPE, Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica. 131 p. 2020.

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p. 107-117, 1987.

Montanher, O.C.; de Moraes Novo, E.M.L.; de Souza Filho, E.E. **Tendência temporal do transporte de sedimentos em suspensão do rio Amazonas (1984-2016)**. Hydrol. Sci. J. 2018, 63, 13–14.

MONTEIRO, F. J. C. **Impactos Ambientais causados pelos búfalos asselvajados nos campos inundáveis da Estação Ecológica de Maracá - Jipioca (costa atlântica do amapá)**. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical, área de concentração em Ecologia e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Amapá, Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá. Macapá. 2009.

MOURA, G. Fronteiras do conhecimento em ciências do mar. Ed. da FURG, Rio Grande, 2020.

MUEHE, D. Panorama da Erosão Costeira no Brasil. **Ministério do Meio Ambiente – MMA**. Brasília, 2018.

Müller-Navarra, S., et al. Tidal Energy Assessment and Forecasting Systems: **A Review. Energies**, v.13(3), 2020.

Myers, L.E.; Bahaj, A.S. An experimental investigation simulating flow effects in first generation marine current energy converter arrays, **Renew. Energy**,v.37, n. 1, p. 28-36, 2012.

NASCIMENTO, R. L. **Aproveitamento da energia dos oceanos para produção de eletricidade**. Estudo técnico. Câmara dos deputados, março, 2017.

NETO, L. et al. Exploração de energia maremotiz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências. **Revista Chilena de Ingerierfa**, v 19, n 2, p. 219 – 232, 2011.

Neves, Rafael Carvalho, et al. "Aspectos da Hidrodinâmica do Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, sudeste do Brasil". **Quaternary and Environmental Geosciences**, 2021.

NITTROUER C. A. et al. The geological record preserved by Amazon shelf sedimentation. **Continental Shelf Research**, v16, p. 817-841, 1996.

NITTROUER, C. A.; DE MASTER, D. J. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. **Continental Shelf Research**, v 16, p. 553-573, 1996.

NITTROUER, C. A.; DEMASTER, D. J. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. **Continental shelf research**, v. 16, p. 553-573, 1996.

Oliveira, C. H. C.; Barros, M. L. C.; Branco, D. A. C.; Soria, R.; Rosman, P. C.C. Evaluation of the hydraulic potential with hydrokinetic turbines for isolated systems in locations of the Amazon region. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 45, 2021.

OLIVEIRA, D. M.; GOMES, M. D. A energia das ondas do mar frente aos paradigmas da matriz energética brasileira pelo viés de ciência, tecnologia e sociedade. **Revista Mundi Sociais e Humanidades**, v 3, n 1, p. 1-16, 2018.

Oliveira, L; Santos, I. F. S.; Schmidt, N. L.; Filho, G. L. T.; Camacho, R. G. R.; Barros, R. M. Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil. **Renewable Energy**. v. 178, p. 1279 – 1290, 2021.

Payambarpour, S. A., Najafi, A. F., & Magagnato, F. Investigation of deflector geometry and turbine aspect ratio effect on 3D modified in-pipe hydro Savonius turbine: Parametric study. **Renewable Energy**, v. 148, p. 44–59, 2020.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas. Guaíba – RS: **Livraria e Editora Agropecuária**, 238p, 2007.

PEREIRA, R. **Tempo e Clima Brasil Meteorologia**. 2022. Disponível em: <<https://www.tempoclimabrasil.com/post/la-nina-atualiza%C3%A7%C3%A3o-maio-2022>>. Acesso em: 26, dez. 2022.

PLANO DE PRESERVAÇÃO E CONTROLE DO DESMATAMENTO E QUEIMADAS DO ESTADO DO AMAPÁ. **Ações e contextos**. Disponível em: <https://www.oiaoqueambientesaudavel>. Acesso em 29 abr. 2022.

PORTO, J. **Encontros e percepções geográficas: diálogos e provocações**. Macapá. Uniedusul. 2022.

POTTER, I. C. et al. The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. **Elsevier**, v 87, p. 497-500, 2010.

Pritchard, D. W. Estuarine Classification: A Help or a Hindrance. *Estuarine Circulation*, 1–38 p. 1989.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balço Energtico Nacional 2021: Ano base 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/balancoenergtico-nacional-2021>. Acesso em 13 fev. 2022.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power

Qian, P., Feng, B., Liu, H., Tian, X., Si, Y., & Zhang, D. Review on configuration and control methods of tidal current turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, p. 125–139. 2019.

Qian, P., Feng, B., Liu, H., Tian, X., Si, Y., & Zhang, D. Review on configuration and control methods of tidal current turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, p. 125–139, 2019.

RABELO, B. V. et al. (2008). **Macrodiagnóstico do estado do Amapá**. (3ªed.).

Ridgill, M.; Neil, S. P.; Lewis, M. J.; Robins, P. E.; Patil, S. D. Global riverine theoretical hydrokinetic resource assessment. **Renewable Energy**. v. 174, p. 654 – 665, 2021.

RODRIGUES, M. R. C.; JR SILVA, O. M. Panorama Geral da Zona Costeira do Estado do Amapá. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 14, n 03. p. 1664-1674. mai. 2021.

ROSÁRIO, Renan Peixoto. **Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará**. 2016. 138 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2016. Programa de Pós-Graduação em Geofísica.

Rosman PCC (2021) Referência Técnica do Sisbahia-Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, Programa COPPE. Engenharia Oceânica: Área De Engenharia Costeira E Oceanográfica. UFRJ/Brasil 11:1–426
http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBaHiA_RefTec_v11a.pdf.

ROSMAN, P. C. C. - **REFERÊNCIA TÉCNICA DO SISBAHIA - SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL**. www.sisbahia.coppe.ufrj.br. COPPE/UFRJ, 2021.

ROSMAN, P. C. C. Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental
MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. et al., **Métodos Numéricos em Recursos**

Hídricos 5, 1ª ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2001.

Rosman, P.C.C. Analyses of the effects of turbine array densities in the tidal currents in São Marcos Bay-MA-Technical **Report in project Selecting sites for tidal current power extraction in Brazil**, Fundação Coppetec, PENO11297. 2009.

ROSMAN, P.C.C. Subsídios Para Modelagem de Sistemas Estuarinos. In: Rosman, P.C.C., Almeida, A.B., Eiger, S., Eds., **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**, 3 ed Edition, ABRH, Porto Alegre, 238-348, 1997.

Ross, L.; Sottolichio, A.; Huybrechts, N.; Brunet, P. Tidal turbines in the estuarine environment: From identifying optimal location to environmental impact. **Renewable Energy**, v. 169, p. 700–713, 2021.

ROURK, F. O.; BOYLE, F.; REYNOLDS, A. Marine current energy devices: Current status and possible future applications in Ireland, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **Elsevier**, v 14, n 3, p.1026-1036, 2010.

ROURKE, F. O.; BOYLE, F.; REYNOLDS, A. Tidal energy update 2009. **Elsevier**, v 87, n 2, p. 398 – 409, 2010.

SAMADI, M.; HASSANABAD, M. G.; MOZAFARI, S. B. Performance enhancement of low speed current savonius tidal turbines through adding semi-cylindrical deflectors. **Ocean Engineering**. V. 259, September 2022.

Santos, I. F. S.; Camacho, R. G. R.; Filho, G. L. T.; Botan, A. C. B.; Vinent, B. A. Energy potential and economic analysis of hydrokinetic turbines implementation in rivers: An approach using numerical predictions (CFD) and experimental data. **Renewable Energy**. v. 143, p. 648 – 662, 2014.

Santos, M. L. S.; Saraiva, A. L. L.; Pereira, J. A. R.; Nogueira, P. F. R. de S. M.; Silva, A. C. Hydrodynamic modeling of a reservoir used to supply water to Belem (Lake Agua Preta, Para, Brazil). **Acta Scientiarum. Technology [en linea]**, Maringá, v. 37, n. 3, p. 353-359, 2023.

SARGENT, R.G., GOLDSMAN, D.M., YAACOUB, T. (2016), **A tutorial on the operational validation of simulation models**. Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, pp.163-177.

SEABRA, M. D. S. Estudo sobre a Influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Bacias Hidrográficas nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. [S.l.]. 2004.

Shahverdi, K.; Mazaheri, M.; Nasser, M.; Monem, M. J. Two-dimensional unsteady modeling of the Bamdej wetland hydrodynamic and quality. **Journal of Iranian Water Engineering Research**. v 1, n. 1. p. 1-13, mar. 2022.

SILVEIRA, O. F. **A planície costeira do Amapá: dinâmica de ambiente costeiro influenciado por grandes fontes fluviais quaternárias**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém, 219 f, 1998.

SILVEIRA, O. M. **A planície costeira do Amapá: dinâmica de ambiente costeiro influenciado por grandes fontes fluviais quaternárias**. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/7895>. Acesso em 02 de mai. 2022.

SOARES, L. P.; MOURA, M. O. Descrição dos fatores geográficos e dos sistemas de circulação atmosférica atuantes no estado do Pará, Brasil. **International Journal Semiarid**. Ano 4, n. 4, 2021.

SOARES, L.C. 1997. Hidrografia. In: **Geografia do Brasil**. V. I, IBGE: pp. 73-119.

Sood, M.; Singal, S. K. Development of statistical relationship for the potential assessment of hydrokinetic energy. **Ocean Engineering**. v. 266. 2022.

Sousa, B. F. (2018). **Micro-Geração de Energia Elétrica a partir de Correntes de Maré para Sistemas Isolados**. São Luís, MA, Brasil.

SREENIVASAN, G., JHA, C.S. Tecnologia Geoespacial para Mapeamento Geomorfológico e Suas Aplicações. In: Jha, C.S., Pandey, A., Chowdary, V., Singh, V. (eds) Tecnologias Geoespaciais para Planejamento e Gestão de Recursos. **Biblioteca de Ciência e Tecnologia da Água**, vol 115, 2022.

TARTARI, R. **Caracterização micrometeorológica e estimativa do balanço hídrico em bacias com formação de campos naturais e floresta no interflúvio entre os rios Purus**

e **Madeira**. 2017. 129 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Cuiabá, 2017.

TAVARES, J. P. Características da climatologia de Macapá - AP. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/26031>. Acesso em 20 jun. 2022.

Thiébot J, Coles DS, BennisA-C, Guillou N, Neill S, Guillou S, Piggott M. 2020 Numerical modelling of hydrodynamics and tidal energy extraction in the Alderney Race: a review. **Phil. Trans. R. Soc.**, v 378, p. 1-30, 2020.

TIDAL POWER. (2014). Disponível em: <http://tidalpower.co.uk/future-of-tidal-power>. Acesso em 18 ago. 2022.

Tillman, D. A., Duong, D. N. B., & Harding, N. S. Modeling and Fuel Blending. **Solid Fuel Blending**, p. 271–293, 2012.

TORRES, A.; EI – ROBRINI, M. **EROSÃO E PROGRADAÇÃO DO LITORAL BRASILEIRO | AMAPÁ**. 2015. E – book. 12 – 40 p. DOI 10.13140/RG.2.1.2965.4489. Disponível em: [\(PDF\) EROSÃO E PROGRADAÇÃO DO LITORAL BRASILEIRO | AMAPÁ \(researchgate.net\)](#). Acesso em: 20 jan. 2022.

Torres, A.M.; El-Robrini, M; Costa, W. J. P. **PANORAMA DA EROSÃO COSTEIRA NO BRASIL: Amapá**, in: Dieter Muehe. (Org.) MMA. Brasília, p.1-761, 2018.

TOZZO, S. Chuva nos extremos e ar seco no interior do país. In: UOL Tempo agora by Climatedo. **Tempo agora**. São Paulo, 03 jul. 2022. Disponível em: [Chuva nos extremos e ar seco no interior do país | Climatedo \(uol.com.br\)](#). Acesso em: 26 dez. 2022.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS/ABRH, 2013.

UIHLEIN, A.; MAGAGNA, D. Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. **Elsevier**, v 58, p. 1070 – 1081, 2016.

VALENTIM, S. S. **Importância do balanço hídrico na circulação de um estuário do semiárido: o estuário do rio Coreau (NW/Ceará/Brasil)**. Tese (Doutorado). Programa de

Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 163 f, 2016.

Verdant Power. **Free Flow System. Technology Advancement.** Disponível em: <https://www.verdantpower.com/technology>. Acesso em 07 de dez. 2021.

VITOR, P. www.tempoeclimabrasil.com. Tempo e clima Brasil Meteorologia, 2022. Disponível em: <https://www.tempoeclimabrasil.com/post/a-zona-de-convergencia-intertropical-no-brasil> . Acesso em: 26 dez. 2022.

Vogel, C.R., Taira, D.T., Carmo, B.S. et al. Perspectivas para a energia do fluxo das marés no Reino Unido e na América do Sul: uma revisão dos desafios e oportunidades. *Politécnica* 2, 97–109 (2019).

Wang, S., Sun, K., Xu, G., Liu, Y., & Bai, X. Hydrodynamic analysis of horizontal-axis tidal current turbine with rolling and surging coupled motions. **Renewable Energy**, v. 102, p. 87–97, 2017.

Wang, Y., Zhang, M. Modeling Hydrodynamic and Hydrological Processes in Tidal Wetlands. **Wetlands** 42, 1. December. 2022.

WATANABE, G. A. O. **Marés internas semi-diurnas na plataforma continental amazônica. Universidade de São Paulo.** São Paulo, p. 172. 2014.

WATCHORN, M.; TRAPP, T. Tidal stream renewable offshore power generation (TS - ROPG). . **Elsevier**, p. 2664-2667, 2000.

Wenehenubun, F.: Saputra, A.: Sutanto, H. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. **Energy Procedia**, v. 68. p. 297 – 304, 2015.

WOLANSKI, E.; ANDUTTA, F.; DELHEZ, E. Estuarine hydrology. **Encyclopedia of Lakes and Reservoirs.** p.1-12, 2012.

XAVIER, D. D. A. **Características sedimentológicas e físico-químicas do rio Sucuriçu, Cabo Norte, Amapá, Brasil.** Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, 101 f, 2012.

XIA, J.; FALCONER, R. A.; LIN, B. Hydrodynamic impact of a tidal barrage in the Severn Estuary, UK. **Renewable Energy**, v 35, n 7, p.1455-1468, 2010.

YI, S.; ABBASI, K.R.; HUSSAIN, K.; ALBAKER, A.; ALVARADO, R. Environmental concerns in the United States: Can renewable energy, fossil fuel energy, and natural resources depletion help. **Gondwana Research**, v. 117, p. 41–55, 2023.

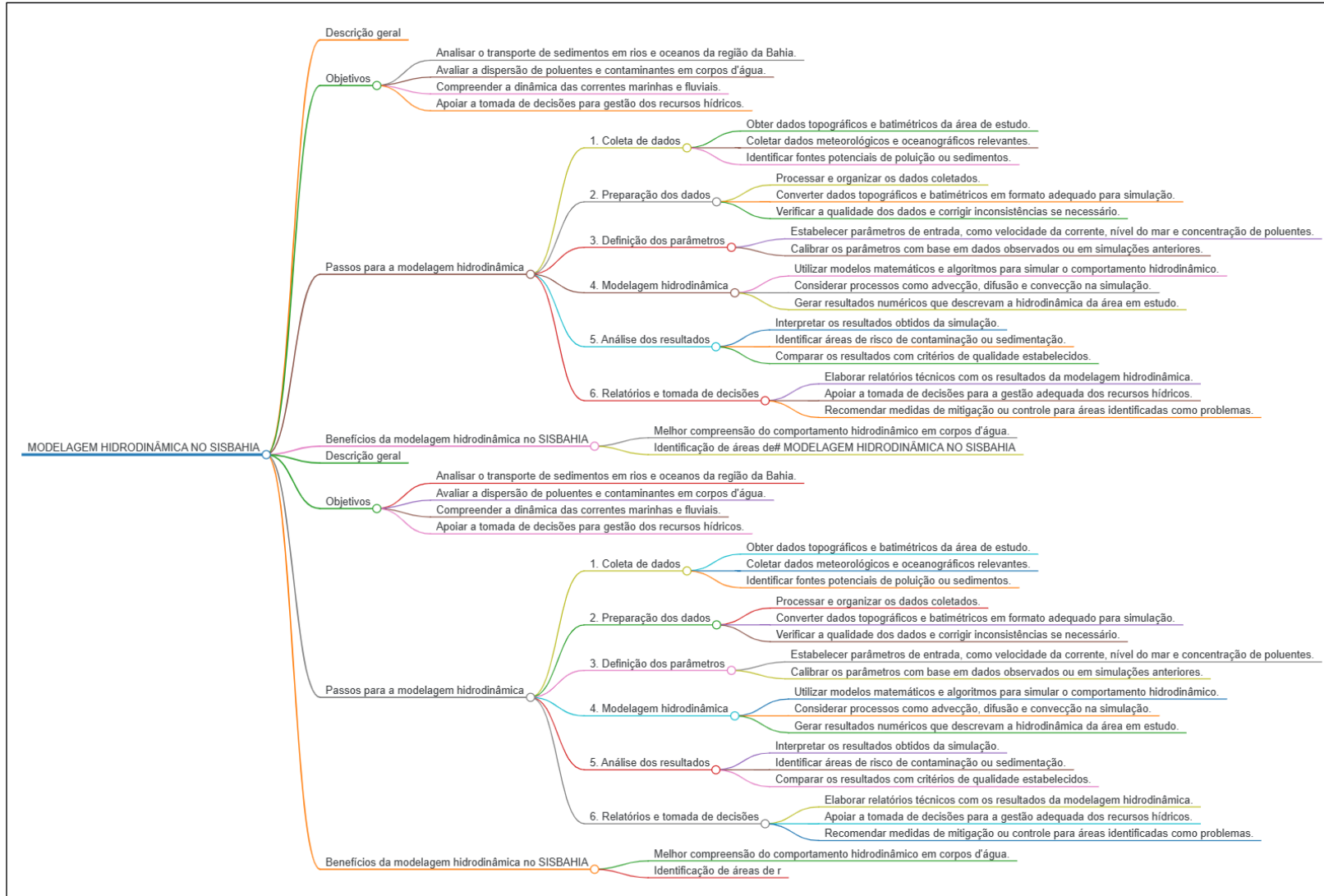
Yosry, A.G.; Fernández-Jiménez, A.; Álvarez-Álvarez, E.; Marigorta, E.B. Design and characterization of a vertical-axis micro tidal turbine for low velocity scenarios, **Energy Conversion and Management**, v. 237, 2021.

ZAINOL, M. Z.; ISMAIL, N.; ZAINOL, I. A REVIEW ON THE STATUS OF TIDAL ENERGY TECHNOLOGY WORLDWIDE. **Sci. Int. (Lahore)**, v 29, n. 3, p. 659-667, 2017.

ZASTEMPOWSKI, M. Analysis and modeling of innovation factors to replace fossil fuels with renewable energy sources - Evidence from European Union enterprises. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 178, 2023.

ANEXO 1

Figura 41 – Fluxograma geral para desenvolvimento da modelagem hidrodinâmica no SisBaHia.



Fonte: Autor (2023).

ANEXO 2

- **Características da malha adotada**

A malha da PCIA foi elaborada mediante o SisBahia® após a importação do mapa base e dos contornos de terra e mar, ambos ajustados no programa Surfer 23. Para desenvolvimento da malha foi levado em consideração somente a área de domínio com utilização de elementos finitos necessários para a discretização do domínio.

Conforme o quadro de informações da tela inicial do item “Malhas & Domínios de Modelagem”, no SisBaHia®, a malha apresenta 309 elementos totais, com 303 elementos quadrangulares, 6 triangulares, 191 elementos de contorno de terra e 91 elementos abertos e, 1083 elementos internos constituindo um total de 1363 nós de cálculo, com 1500 m como distância média entre os nós e uma área total da malha de 2.049.349.185.155 m² (tabela 17).

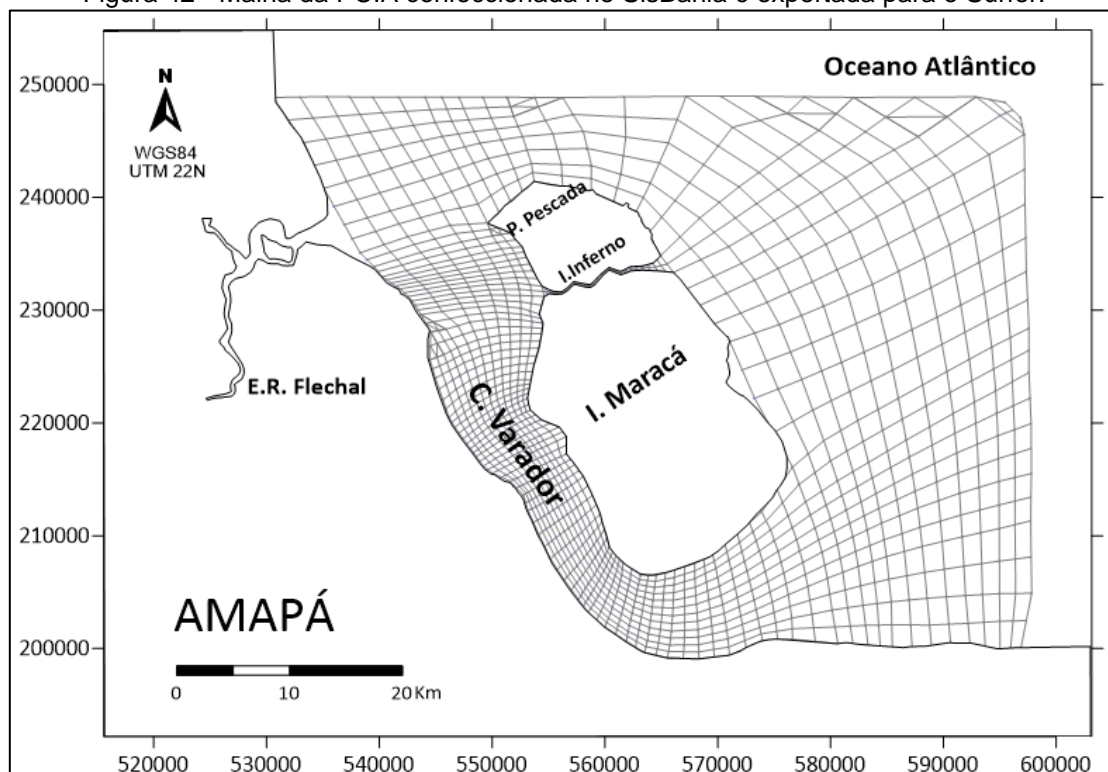
Tabela 17 - Informações sobre as malhas de elementos quadrangulares e triangulares utilizadas na PCIA.

Plataforma Continental Interna do Amapá	
Número de elementos	309
Número de nós	1363
Distância média entre nós	1500 m
Área da malha	2.049.349.185.155 m ²

Fonte: Autor (2023).

A discretização do domínio espacial com módulo 2DH, utilizou elementos finitos quadrangulares de 9 nós e elementos finitos de 6 nós conectados entre si (figura 42), onde as velocidades médias e de elevação da superfície são determinadas para cada nó do domínio. Para isso, os dados de batimetria e rugosidade do fundo para cada nó são cruciais.

Figura 42 - Malha da PCIA confeccionada no SisBahia é exportada para o Surfer.



Fonte: Autor (2023).

- **Dados Batimétricos**

Os dados batimétricos da área de estudo, assim como o contorno de margem do domínio de interesse, estão referenciados conforme as cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) com abordagem da carta náutica nº 21200 em escala 1:300.000 (3° 30') para a região oceânica (DHN, 2022) e para a área costeira mediante o programa de altimetria Topex.

Desse modo, após serem reunidos e organizados, os dados batimétricos foram interpolados mediante o SisBaHia® (figura 43), o qual faz uso do programa Surfer empregando o método Kriging.

Figura 43 - Tela de malhas e domínios de modelagem na aba de nós, onde é possível extrair as coordenadas “x” e “y” em utm dos nós da malha, e os dados de batimetria e rugosidade equivalente de fundo em metros.

Nº	△	Coordenada_X	Coordenada_Y	h = - Z do fundo	Rugosidade	Área Influência	TF	Pos.	Contorno
1		569641.6197	199915.9263	18.8350	2.0000E-02	9.2535E+05			
2		569687.1498	199225.5654	25.1847	2.0000E-02	4.6722E+05	TE	116	Externo
3		570967.8353	200130.7269	15.4273	2.0000E-02	1.0100E+06			
4		571043.1207	199388.4570	21.1724	2.0000E-02	5.3859E+05	TE	117	Externo
5		572405.7740	200713.3980	16.2603	2.0000E-02	1.0028E+06			
6		572505.2821	200056.3125	21.8995	2.0000E-02	5.0751E+05	TE	118	Externo
7		573843.7128	201296.0690	14.5181	2.0000E-02	9.4295E+05			
8		573967.4435	200724.1680	20.9554	2.0000E-02	4.2179E+05	TE	119	Externo
9		575220.6049	201524.2659	9.9194	2.0000E-02	1.0588E+06			
10		575301.2547	200768.6263	16.0623	2.0000E-02	5.1758E+05	TE	120	Externo
11		596172.8626	202446.2990	35.5724	2.0000E-02	2.8530E+06			
12		597345.8079	202477.6191	44.3166	2.0000E-02	1.4201E+06	AG	2	Externo
13		595947.5821	200007.9194	26.5039	2.0000E-02	1.2712E+06	TE	134	Externo
14		596867.0759	200054.2805	37.7251	2.0000E-02	5.5151E+05	TA	1	Externo
15		576597.4970	201752.4628	9.1351	2.0000E-02	1.6145E+06			
16		576635.0660	200813.0845	12.2694	2.0000E-02	7.8331E+05	TE	121	Externo
17		578492.7775	201834.3621	13.5749	2.0000E-02	2.3138E+06			
18		578642.6299	200620.0345	12.5923	2.0000E-02	1.1807E+06	TE	122	Externo
19		594999.9173	202414.9790	28.3464	2.0000E-02	3.1635E+06			
20		595028.0883	199961.5584	17.4282	2.0000E-02	1.3681E+06	TE	133	Externo
21		593593.6030	202324.9764	27.1577	2.0000E-02	3.4696E+06			
22		593718.6255	199865.8258	18.6255	2.0000E-02	1.6754E+06	TE	132	Externo
23		580388.0581	201916.2615	22.7585	2.0000E-02	2.3559E+06			
24		580650.1938	200426.9845	20.7618	2.0000E-02	1.2271E+06	TE	123	Externo

Fonte: Autor (2023).

Para a batimetria, considerou-se a redução das sondas batimétricas de 0,5m de altura acima do NR à nível de baixamar média de sizígia (MLWS) (figura 44). Para a análise foi levada em consideração uma elevação de 3,1 m sobre o NR (altura do nível médio do mar – MSL: “mean sea level”), referenciado à ilha dos Guarás (0° 36’ N – 57° 54,9’).

Figura 44 - Redução das sondas batimétricas. Carta Náutica nº 21200.

Lugar	Lat N	Long W	HWF&C	Alturas em metros acima do NR				
				MHWS	MHWN	MLWN	MLWS	MSL
Ilha dos Guarás	0° 36'	57° 54,9'	08h 52min	5,4	4,3	1,7	0,5	3,1
Escola do Igarapé Grande do Curuá	0° 45',8	50° 07'	0h 19min	4,6	3,9	1,1	0,4	2,5
Barra Norte	01° 26',1	49° 13,3'	09h 23min	3,0	2,5	0,7	0,3	1,6
Arco Lamoso								

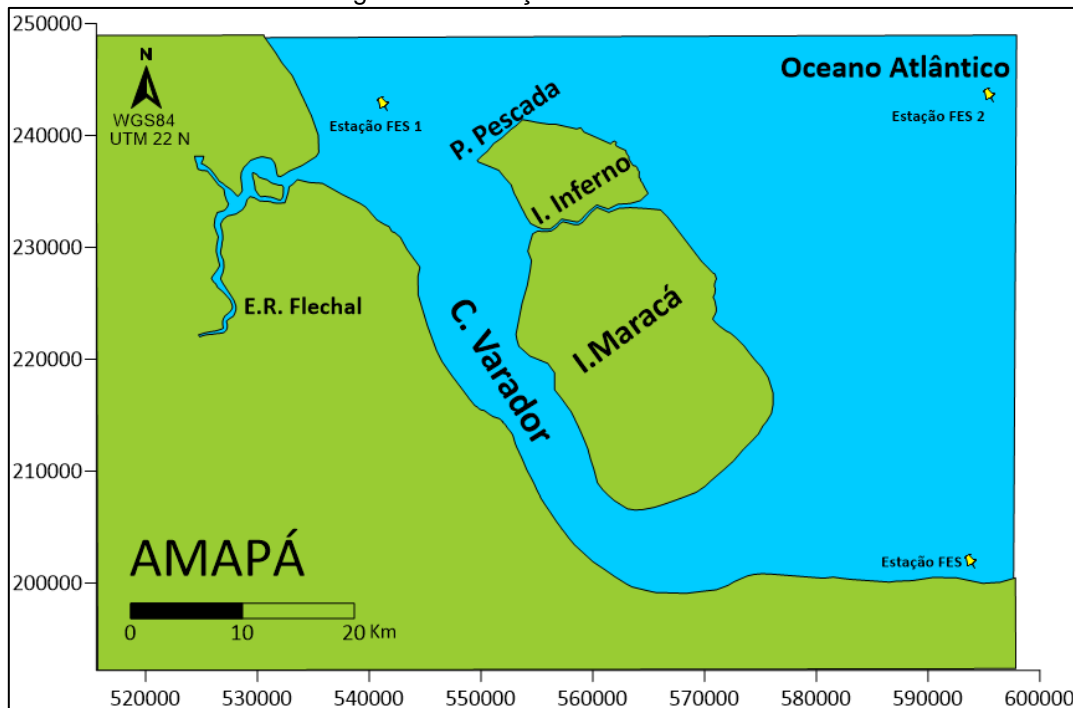
Fonte: Adaptado. DHN (2023).

Conforme Abbot e Basco (1989), adota-se uma rugosidade equivalente de fundo (ϵ), por outro lado, pode-se definir pontualmente os valores de rugosidade para cada ponto da grade, assim como estabelecer um único valor. Definiu-se um único valor à rugosidade de fundo (0,01), constituído de silte e argila (ANTHONY et al., 2021).

- **Dados de maré e dados meteorológicos**

Selecionaram-se três pontos (figura 45) na área de estudo para aquisição dos dados de marés genéricas na região a fim de obter informações referentes às constantes harmônicas (figura 46), as quais foram utilizadas no desenvolvimento da malha e domínio de modelagem no SisBaHia. Foram utilizadas 31 constantes harmônicas (tabela 18) conforme a base de dados FES na aba de ferramentas do SisBaHia.

Figura 45 - Estações de dados FES.



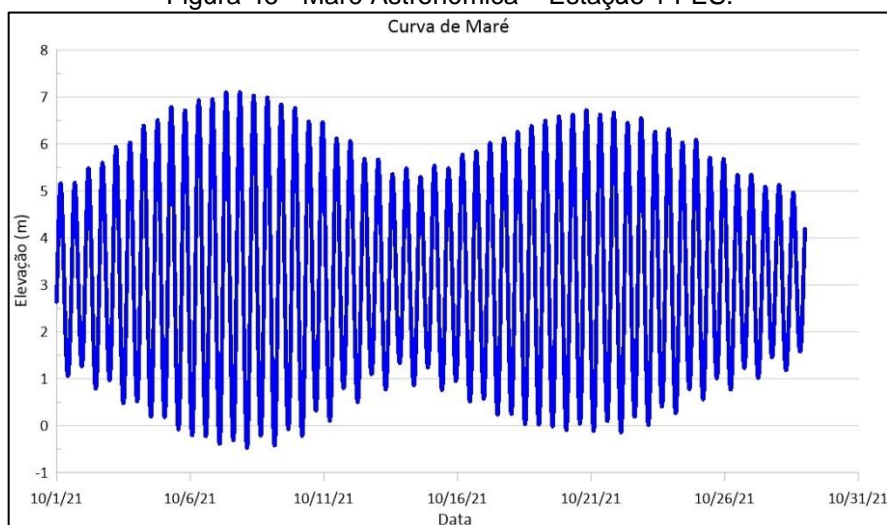
Fonte: Autor (2023).

Tabela 18 - Constantes harmônicas.

Estação 1				Estação 2				Estação 3			
Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)	Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)	Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)
M2	44,714,164	2,451	241,934	M2	4,471,416,431	25,143,195	226,721,405	M2	4,471,416,431	24,513,699	2,419,342,041
S2	43,200,000	0,568	270,822	S2	4,320,000,002	0,5964549	2,555,524,902	S2	4,320,000,002	0,567866	2,708,218,079
N2	45,570,054	0,342	212,892	N2	4,557,005,357	0,3585376	1,997,164,307	N2	4,557,005,357	0,3417581	2,128,923,645
M4	22,357,082	0,206	112,189	M4	2,235,708,217	0,1678514	1,474,654,083	M4	2,235,708,217	0,2056201	112,188,736
K2	43,082,045	0,165	266,990	K2	4,308,204,529	0,1677148	2,514,365,234	K2	4,308,204,529	0,1653524	266,989,563
K1	86,164,091	0,125	245,752	K1	8,616,409,058	0,1255275	2,356,657,867	K1	8,616,409,058	0,1245621	2,457,524,414
nu2	45,453,616	0,107	212,387	nu2	4,545,361,584	0,1054645	198,178,299	nu2	4,545,361,584	0,106503	2,123,874,359
O1	92,949,630	0,103	227,862	O1	929,496,301	0,1045872	217,827,774	O1	929,496,301	0,1033169	2,278,621,368
L2	43,889,833	0,097	248,099	L2	4,388,983,274	0,0903758	2,382,867,432	L2	4,388,983,274	0,0967454	2,480,992,889
MS4	21,972,021	0,055	82,247	M6	1,490,472,144	0,0486747	2,025,115,967	MS4	2,197,202,139	0,0545626	82,247,406
2N2	46,459,348	0,045	215,461	2N2	4,645,934,794	0,0459734	1,957,451,324	2N2	4,645,934,794	0,0452459	2,154,606,934
MN4	22,569,026	0,039	26,474	P1	8,663,720,483	0,034502	2,363,414,307	MN4	2,256,902,603	0,0393937	264,741,211
mu2	46,338,327	0,037	4,113	MS4	2,197,202,139	0,0274119	82,677,948	mu2	4,633,832,735	0,0367386	41,130,443
MSf	1,275,721,423	0,033	21,822	T2	4,325,921,709	0,0264994	2,364,868,011	MSf	1,275,721,423	0,0325084	218,220,463
P1	86,637,205	0,032	250,160	mu2	4,633,832,735	0,0228504	163,081,131	P1	8,663,720,483	0,032183	2,501,604,156
T2	43,259,217	0,026	256,227	Mf	1,180,292,344	0,0220644	52,138,047	T2	4,325,921,709	0,0264454	2,562,265,015
Mm	2,380,713,365	0,026	14,661	MSf	1,275,721,423	0,0206786	203,599,834	Mm	2,380,713,365	0,0257037	146,612,272
Mf	1,180,292,344	0,024	9,425	Mm	2,380,713,365	0,0192754	98,965,673	Mf	1,180,292,344	0,0244405	94,253,082
Q1	96,726,084	0,016	222,727	MN4	2,256,902,603	0,0184092	411,278,687	Q1	9,672,608,376	0,0162773	2,227,271,881
M6	14,904,721	0,014	82,272	Q1	9,672,608,376	0,0172224	2,071,184,387	M6	1,490,472,144	0,0135905	822,720,032
MKS2	44,587,808	0,013	56,278	lambda2	439,983,869	0,0127722	2,132,356,415	MKS2	4,458,780,812	0,0132701	562,782,211
lambda2	43,998,387	0,013	226,795	MKS2	4,458,780,812	0,0121307	438,785,477	lambda2	439,983,869	0,0132586	226,794,693
S1	86,399,989	0,011	200,133	S1	8,639,998,873	0,010072	1,866,452,942	S1	8,639,998,873	0,011073	2,001,331,024
M8	11,178,541	0,011	143,658	Ssa	15778463,36	0,0098357	3,555,348,511	M8	1,117,854,108	0,0109864	1,436,576,538
Ssa	15,778,463,360	0,010	356,273	M8	1,117,854,108	0,0060535	107,004,395	Ssa	15778463,36	0,0104349	3,562,731,934
M3	29,809,443	0,007	141,826	MNS2	4,725,816,272	0,0049361	1,210,527,496	M3	2,980,944,289	0,0069139	1,418,256,226
N4	22,785,027	0,007	30,832	Mtm	7,890,854,144	0,0049099	61,415,205	N4	2,278,502,679	0,0066258	308,321,838
Mtm	789,085,414	0,005	7,902	R2	4,314,094,484	0,0036157	2,359,059,143	Mtm	7,890,854,144	0,0053789	79,022,779
R2	43,140,945	0,004	255,652	J1	8,315,451,628	0,0033795	287,961,731	R2	4,314,094,484	0,0036083	2,556,515,808
S4	21,600,000	0,003	169,910	M3	2,980,944,289	0,0033668	1,440,674,438	S4	21600	0,0034575	1,699,095,001
J1	83,154,516	0,003	314,752	As	31556955,92	0,0023352	195,948,944	J1	8,315,451,628	0,003035	3,147,519,836

Fonte: Rosman (2021).

Figura 46 - Maré Astronômica – Estação 1 FES.

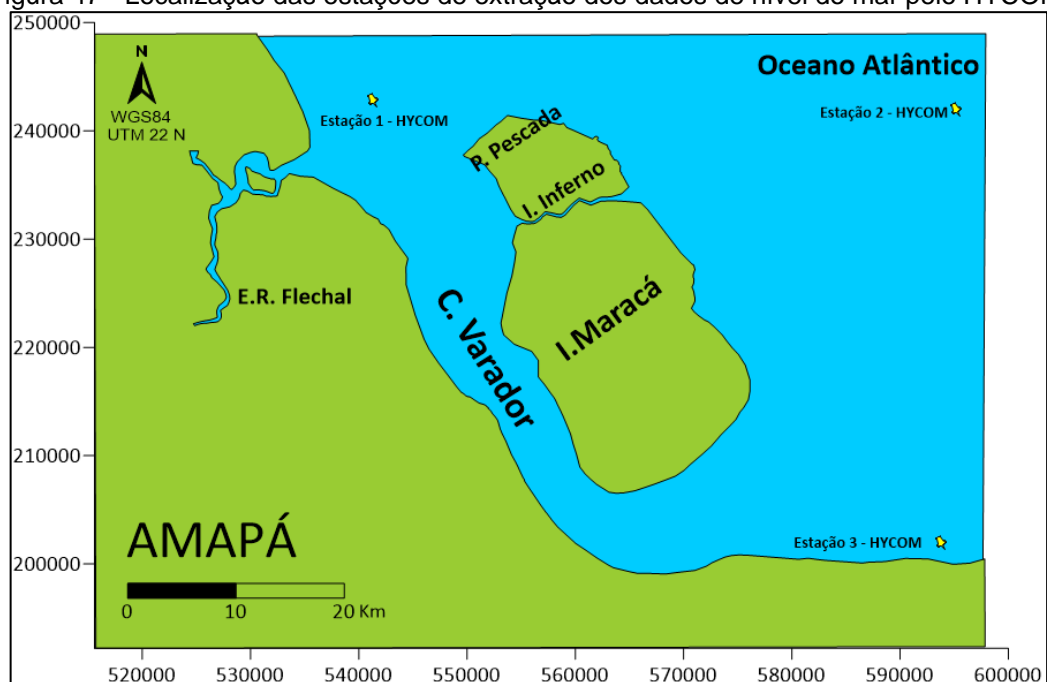


Fonte: Autor (2023).

- **Nível Médio Variado**

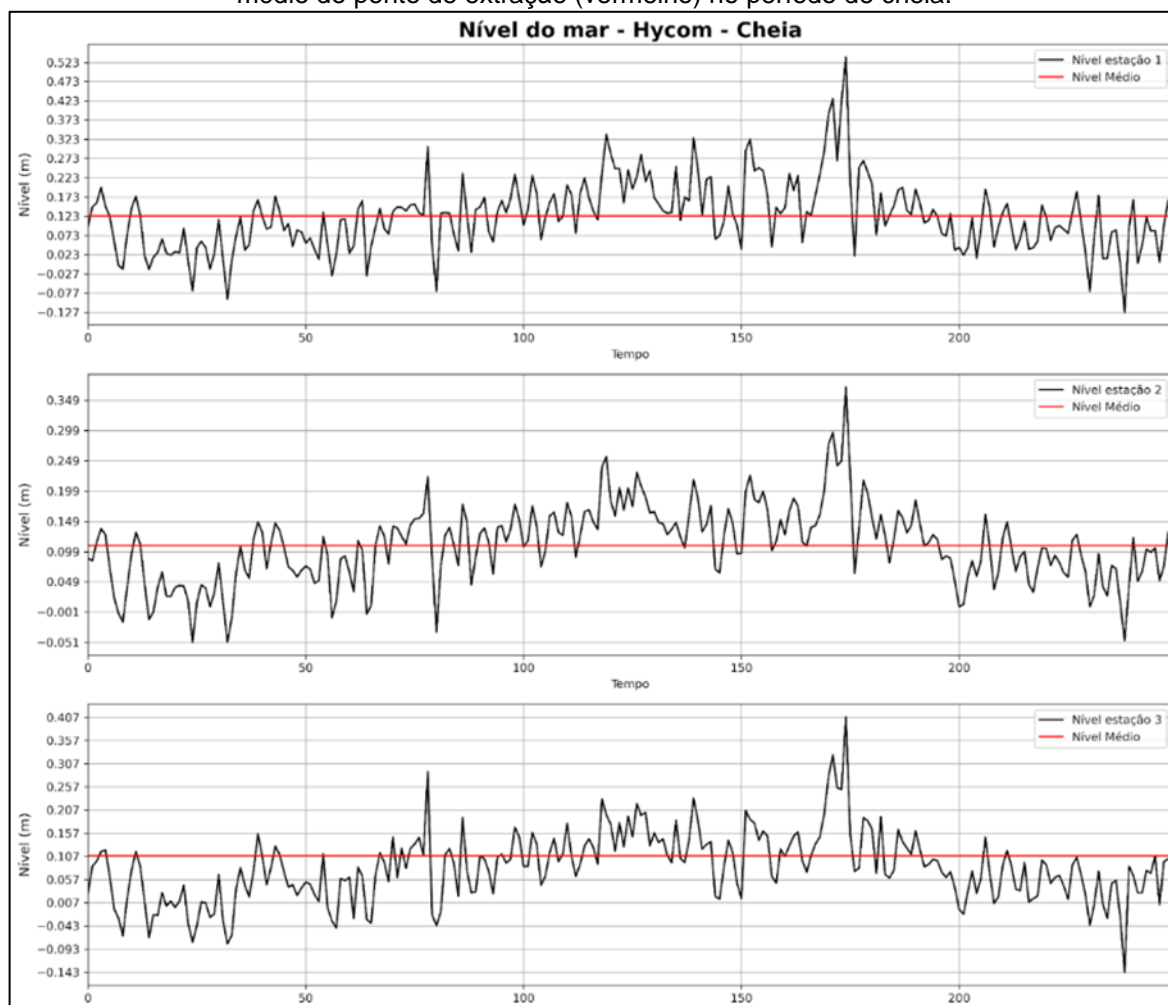
Os valores de nível médio variado foram obtidos através da plataforma de reanálise HYCOM (www.hycom.org), que proporcionou dados médios diários da elevação para estações da área de estudos localizadas dentro da malha (figura 47). Os valores de nível médio variável do mar utilizados para a região podem ser subdivididos entre os cenários de seca e cheia. Para o estudo considerou-se o período de cheia (figura 48).

Figura 47 - Localização das estações de extração dos dados de nível do mar pelo HYCOM.



Fonte: Autor (2023).

Figura 48 - Série temporal de Nível (m), em metros, extraída para as estações do hycom (preto), nível médio do ponto de extração (vermelho) no período de cheia.



Fonte: www.hycom.org (2023).

- **Dados de Vazão**

Além de favorecer o aumento do volume de água nos canais, a vazão atua na circulação hidrodinâmica. As informações de vazão referentes ao ano de 2021 advêm da Agência Nacional de Águas (ANA, 2021) e os dados foram selecionados a partir da estação fluviométrica do município de Macapá, código 19500000 (Latitude: 0,02 e Longitude: -51,05). A estação fluviométrica mais próxima da PCIA é a do município de Macapá, próximo à foz do rio Amazonas. Os dados de vazão para o ano de 2021 apresentaram oscilação mínima de $130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (novembro) e máxima de $510 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (março) (tabela 19).

Tabela 19 - Vazão do Rio Amazonas, mensal máxima, mínima e média.

Mês/ano	Máximo (m ³ /s)	Mínimo (m ³ /s)	Média (m ³ /s)
jan/21	480	160	292
fev/21	460	180	320
mar/21	510	180	340
abr/21	490	180	348
mai/21	440	180	314
jun/21	470	180	313
jul/21	460	180	306
ago/21	480	160	312
set/21	470	150	303
out/21	450	140	278
nov/21	420	130	274
dez/21	430	160	286

Fonte: ANA (2021).

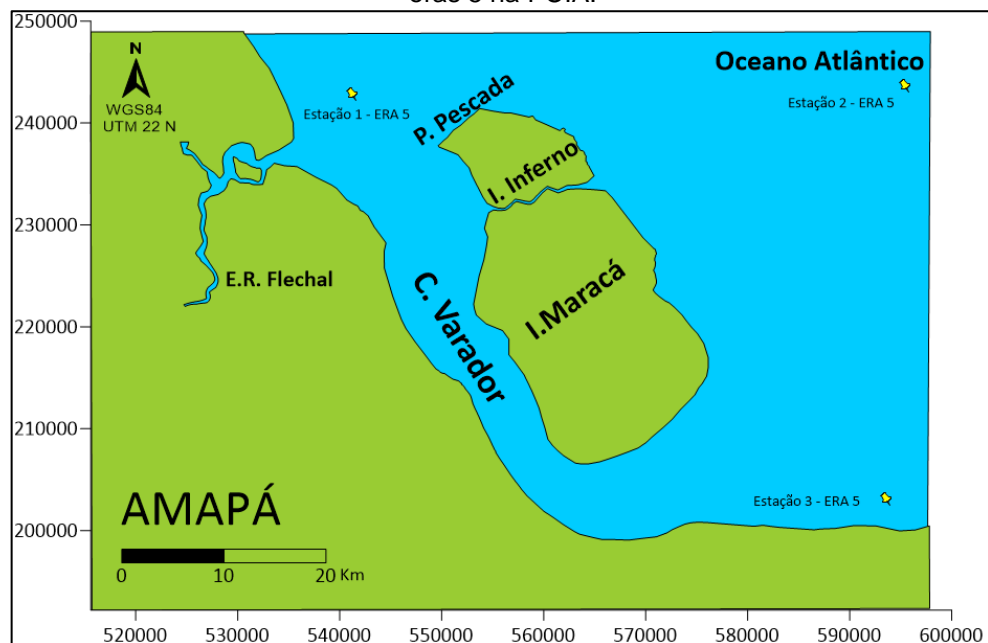
- **Dados de Vento**

A modelagem da circulação hidrodinâmica utiliza dados de vento de várias maneiras ao modelo, podendo ser completamente variáveis no tempo e variados no espaço, assim como constantes no tempo e uniformes no espaço.

Como resultado, o SisBaHiA fornece uma estimativa da distribuição das tensões no leito de um corpo d'água advindo das ondas originadas pelo vento (ROSMAN, 2021). Para o estudo, levou-se em consideração dados meteorológicos de três estações com intensidade média 6,5 m.s⁻¹ e direção ENE.

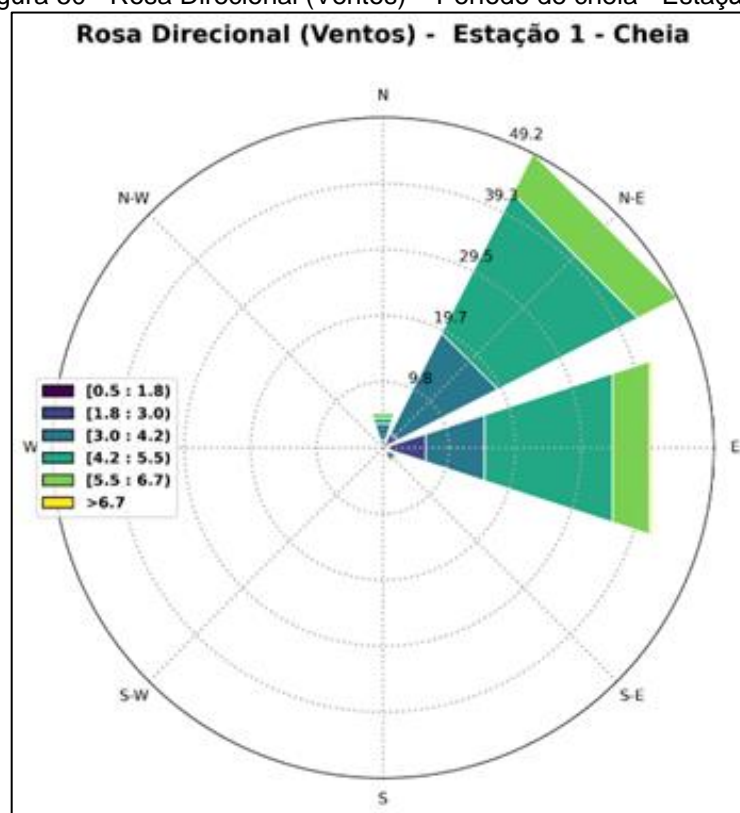
Para modelar cenários mais próximos ao real, foram adicionados dados de ventos variáveis no tempo e no espaço, para isso, foram adquiridas 3 séries temporais de 3 estações situadas dentro da malha (figura 49). Os dados de ventos utilizados são oriundos da reanálise, disponibilizados pela *European Community Medium Scale Weather Forecast - ECMWF*. As rosas dos ventos exibidas representam a direção e intensidade do vento para as 3 estações nos períodos de cheia. As figuras 50, 51 e 52 exibem a rosa direcional de ventos para o período de cheia nas estações 1, 2 e 3.

Figura 49 - localização das estações de extração dos dados de magnitude e direção dos ventos pelo eras 5 na PCIA.



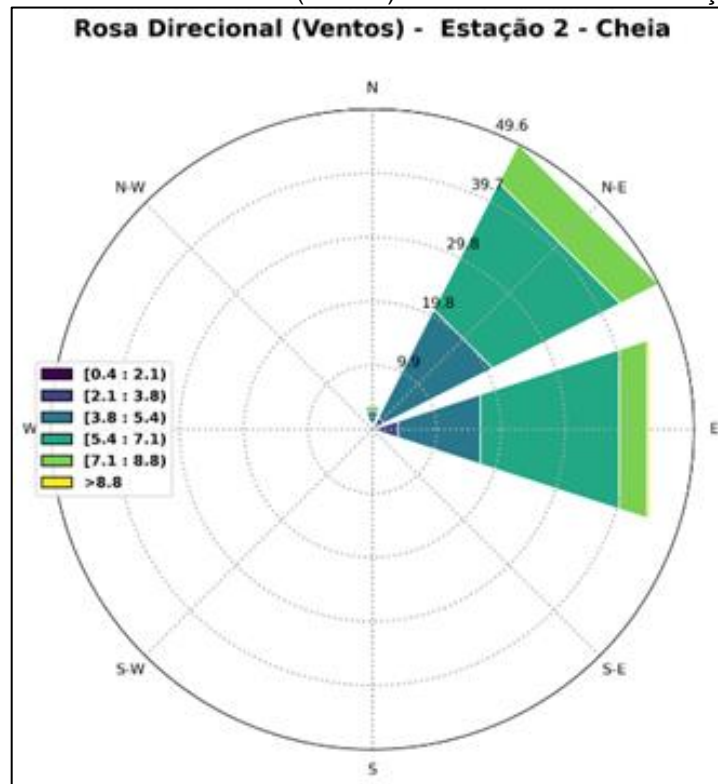
Fonte: Autor (2023).

Figura 50 - Rosa Direcional (Ventos) – Período de cheia - Estação 1.



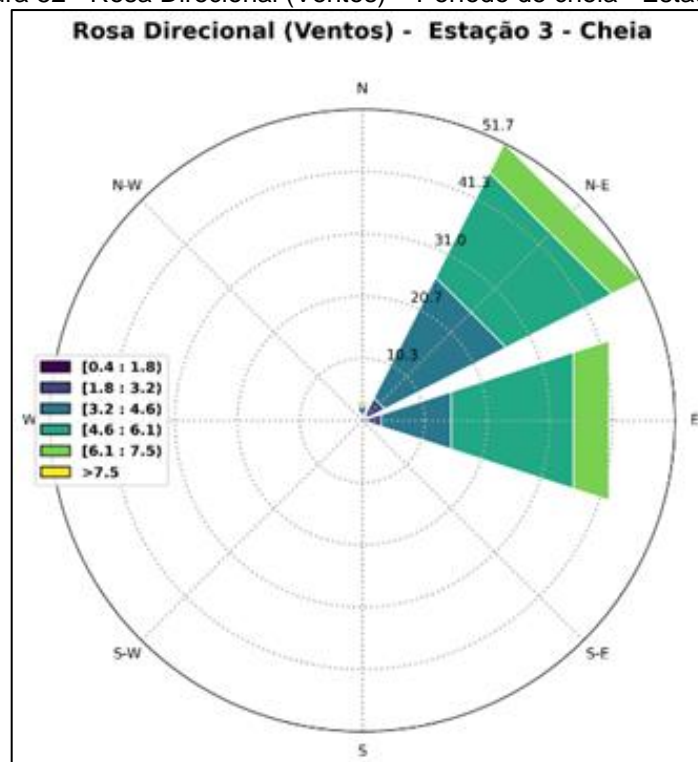
Fonte: Autor (2023).

Figura 51 - Rosa Direcional (Ventos) – Período de cheia - Estação 2.



Fonte: Autor (2023).

Figura 52 - Rosa Direcional (Ventos) – Período de cheia - Estação 3.



Fonte: Autor (2023).