

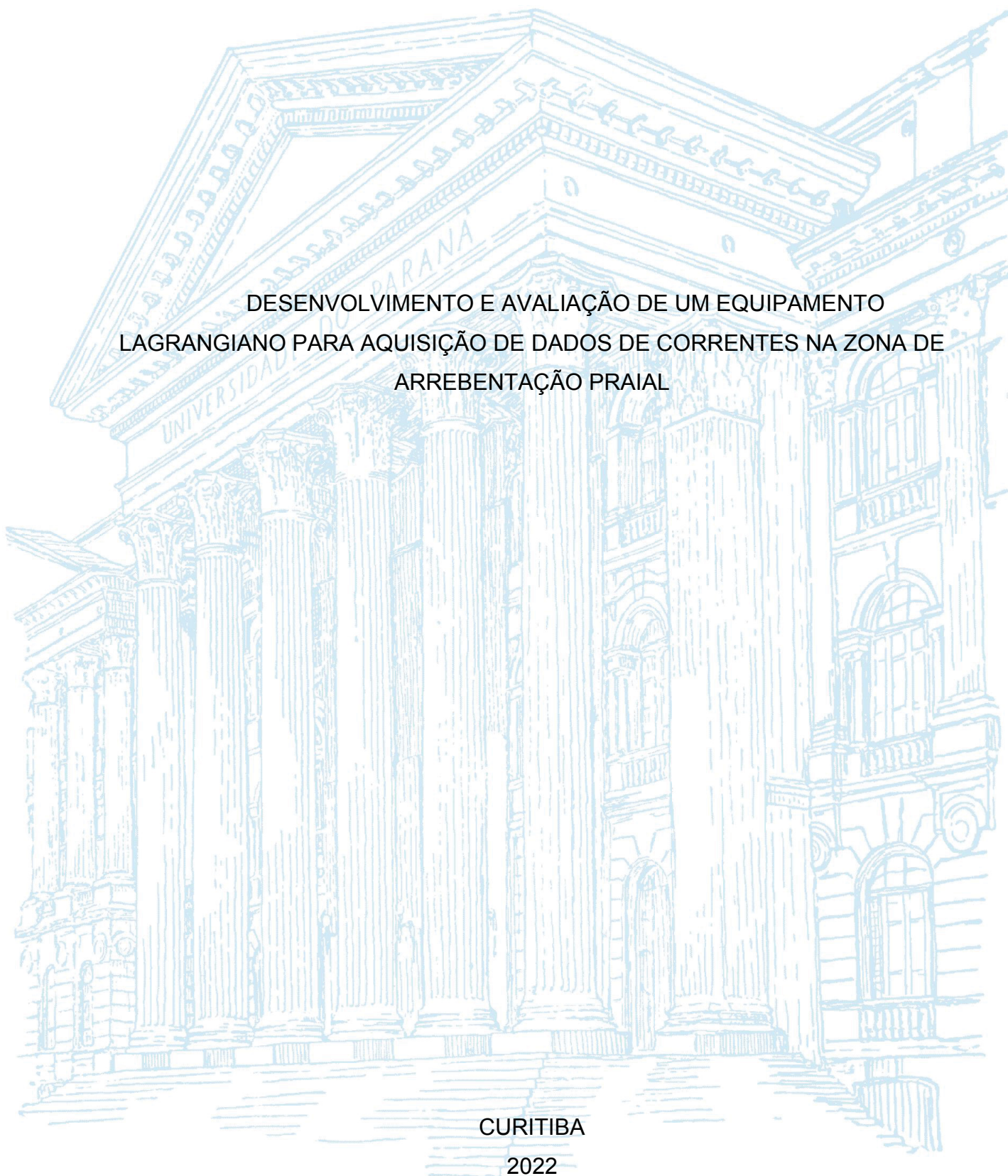
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANILO MILDEMBERGER DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO
LAGRANGIANO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE CORRENTES NA ZONA DE
ARREBENTANÇA PRAIAL

CURITIBA

2022



DANILO MILDEMBERGER DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO
LAGRANGIANO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE CORRENTES NA ZONA DE
ARREBENTAÇÃO PRAIAL

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Dr. José Eduardo Gonçalves

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Danilo Mildemberger de Oliveira

Desenvolvimento e avaliação de um equipamento lagrangiano para aquisição de dados de correntes na zona de arrebenção praial / Danilo Mildemberger de Oliveira. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Dr. José Eduardo Gonçalves

1. Ondas oceânicas. 2. Satélites. 3. Correntes oceânicas. I. Gonçalves, José Eduardo. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021PO

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **DANILO MILDEMBERGER DE OLIVEIRA** intitulada: **Desenvolvimento e avaliação de um equipamento Lagrangiano para aquisição de dados de correntes na zona de arrebentação praial**, sob orientação do Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO GONÇALVES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Dezembro de 2022.

Assinatura Eletrônica
04/01/2023 17:50:06.0
JOSÉ EDUARDO GONÇALVES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
16/01/2023 14:54:16.0
CYNARA DE LOURDES DA NÓBREGA CUNHA
Avaliador Externo (null)

Assinatura Eletrônica
05/01/2023 08:30:38.0
MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ-
CURITIBA)

Assinatura Eletrônica
09/01/2023 10:40:07.0
RAMIRO J. DE JESUS NEVES
Avaliador Externo (55001296)

Assinatura Eletrônica
10/01/2023 11:47:44.0
TOBIAS BERNWARD BLENINGER
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Certamente este trabalho não seria possível sem ajuda de pessoas e instituições que cruzaram meu caminho durante estes anos de desenvolvimento desta tese, as quais deixo aqui o meu muito obrigado:

Primeiramente agradeço à UFPR, instituição que me acolheu pelos últimos 12 anos e que sempre defenderei.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, pela oportunidade de desenvolver minha tese neste programa.

À CAPES pelas bolsas de doutorado e doutorado sanduíche e ao CNPq (Processo 440814/2020-0) pelo apoio financeiro na construção dos equipamentos.

Ao meu orientador, José Eduardo Gonçalves, por todos esses anos de ensinamentos e amizade, por sempre apoiar minhas ideias e por toda a ajuda e esforço para que as campanhas de campo acontecessem em tempos de pandemia.

Aos professores que passaram pelas três etapas de bancas de qualificação, por todas sugestões que contribuíram para a melhoria deste trabalho: Profs. Jorge Centeno, José Ota, Eduardo Gobbi, Cynara Cunha, Tobias Bleninger e Ramiro Neves.

Ao Professor Ramiro Neves e todos os colegas do Maretec, por terem me recebido para realização do estágio sanduíche, uma experiência fundamental para o melhor desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Maurício Noernberg e ao Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento do CEM-UFPR, pela disponibilização dos dados necessários para implementação dos modelos e pelo imenso apoio no desenvolvimento dos derivadores.

Ao Guilherme Franz e ao David Moreira, por toda ajuda no entendimento do funcionamento da modelagem acoplada.

Ao Brazilian Sea Observatory (BSO), pela disponibilização dos resultados de modelos hidrodinâmicos da costa do Paraná.

Ao Alex Kraemer e ao Gabriel Vargas, pelo apoio na construção e programação dos derivadores e também apoio em campo.

Ao SIMEPAR, pela disponibilização de sua estrutura física e equipamentos e também pelo suporte com a logística de campo.

Ao Professor Tobias Bleninger, pela sempre pronta disponibilidade em emprestar o ADCP para as campanhas de campo.

Ao Centro de Educação Física e Desportos (CED-UFPR), pela autorização de acesso à pista de atletismo e ao campo de futebol para a realização dos testes de qualidade do GNSS.

Por fim, agradeço ainda a todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para que esta longa caminhada chamada doutorado chegasse à sua conclusão.

RESUMO

A zona de arrebentação praial é o ambiente mais dinâmico da zona costeira, onde processos hidrodinâmicos e geomorfológicos variam consideravelmente em um curto período de tempo e espaço devido à dissipação da energia transportada pelas ondas. Nesse sentido, é fundamental o estudo e monitoramento deste ambiente para um melhor conhecimento da dinâmica do local, principalmente com foco no planejamento de uso e ocupação da costa. Entretanto, a aquisição de dados na zona de arrebentação representa um grande desafio, devido à dificuldade de navegação e fixação de equipamentos e também pela considerável variabilidade espacial no módulo e na direção das correntes. O presente trabalho, portanto, teve como objetivo desenvolver e avaliar um derivador lagrangiano de baixo custo para ser utilizado na obtenção de intensidades de correntes na zona de arrebentação com objetivo de fornecer informações que permitam validar modelos numéricos que simulem a hidrodinâmica da região considerando a interação entre ondas e correntes. O derivador desenvolvido possui um corpo feito em impressão 3D contendo um sistema de eletrônica embarcada de baixo custo e alta capacidade de personalização, com um sensor de posicionamento por satélite (GNSS) não-diferencial e telemetria de dados em tempo real via protocolo de rádio LoRa. Para avaliar a qualidade do GNSS utilizado, três testes foram realizados, indicando um erro médio absoluto da velocidade na ordem de 1-2 cm/s e boa precisão do sensor para a representação de velocidades médias. Em seguida, três amostragens foram realizadas na zona de arrebentação considerando diferentes condições meteorológicas e oceanográficas para comparar os dados com resultados de modelos numéricos já implementados na mesma região. Os resultados obtidos pelo derivador indicaram uma boa representação das intensidades simuladas pelo modelo que simula efeitos hidrodinâmicos gerados pela interação entre ondas e correntes, entretanto, indicou uma tendência do modelo em formar correntes longitudinais para Sul em duas das três amostragens, enquanto os equipamentos se deslocaram para Norte nas três campanhas. Esse mesmo efeito foi verificado ao comparar o modelo com dados medidos por ADCP. Com base nos resultados obtidos, foi possível confirmar a hipótese levantada inicialmente de que mesmo um equipamento lagrangiano de baixo custo portando um GNSS não-diferencial pode gerar importantes informações sobre as correntes geradas pela quebra de ondas na região praial, possibilitando um melhor conhecimento dessa região e também a validação de modelos numéricos.

Palavras-chave: derivador. correntes longitudinais. GNSS.

ABSTRACT

Surf zone is the most dynamic environment in the coastal zone, where hydrodynamic and geomorphological processes vary considerably in a short period of time and space due to the dissipation of energy carried by waves. In this sense, the study and monitoring of this environment are essential for a better understanding of the dynamics of the region, mainly with a focus on planning the use and occupation of the coast. However, the acquisition of data in the surf zone represents a great challenge, due to the difficulty of navigation and equipment anchoring and also due to the considerable spatial variability in the speed and direction of the currents. The present work, therefore, aimed to develop and evaluate a low-cost lagrangian equipment to be used to obtain current velocities in the surf zone in order to provide information to validate numerical models that simulate the hydrodynamics of the region considering the interaction between waves and currents. The developed drifter has a body made with 3D printing containing a low-cost onboard electronics system with a non-differential satellite positioning sensor (GNSS) and real-time data telemetry via LoRa radio protocol. To evaluate the quality of the GNSS used, three tests were performed, indicating a mean absolute error for speeds in the order of 1-2 cm/s and good sensor accuracy for representing average velocities. Then, three samplings were carried out in the surf zone considering different meteorological and oceanographic conditions to compare the data with results from numerical models already implemented in the same region. The results obtained by the drifter indicated a good representation of the intensities calculated by the model that simulates hydrodynamic effects generated by the interaction between waves and currents, however, it indicated a tendency of the model to indicate longshore currents to the South in two of the three samples, while the equipment moved north in the three campaigns. This same effect was verified when comparing the model with data measured by ADCP. Based on this, it was possible to confirm the hypothesis initially raised that even a low-cost Lagrangian equipment carrying a non-differential GNSS can generate important information about the currents generated by wave breaking in the surf zone, allowing a better knowledge of this region and also the validation of numerical models.

Keywords: drifter. longshore currents. GNSS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de decomposição de componentes de maré	21
Figura 2 – Principais termos utilizados na análise de ondas oceânicas	22
Figura 3 – Energia total transportada pelos principais tipos de ondas presentes no oceano	23
Figura 4 – Diagrama de Bretschneider para estimar altura de onda a partir da extensão da pista e intensidade do vento	24
Figura 5 – Variação do ângulo de incidência da onda devido ao efeito de refração	28
Figura 6 – Sistema de coordenadas (s, n) para análise da refração	29
Figura 7 – Efeito de difração da onda devido a presença de alguma barreira	30
Figura 8 – Exemplo de decomposição de uma série de ondas em termos de espectro de energia	31
Figura 9 – Localização e nomenclatura dos principais componentes de um sistema praiial	32
Figura 10 – Variação do perfil de praia devido à diferentes regimes de ondas	33
Figura 11 – Variação vertical na direção de correntes, originando correntes de retorno de fundo (<i>undertow</i>)	35
Figura 12 – Perfil de velocidades das correntes longitudinais na zona de arrebentação assumindo a quebra de ondas regulares e irregulares	36
Figura 13 – Células de circulação horizontal devido à quebra de ondas na praia	37
Figura 14 – Derivador desenvolvido por Davis (1985)	40
Figura 15 – Derivador desenvolvido por Sabet e Barani (2011)	43
Figura 16 – Esquema de acoplamento de modelos	53
Figura 17 – Mapa geral do litoral paranaense com batimetria da Plataforma Continental e Zona Costeira	54
Figura 18 – Parâmetros de onda observados pela bóia SiMCosta PR entre os meses de Janeiro de 2014 e início de Junho de 2015	57
Figura 19 – Distribuição de frequência para altura significativa de ondas (H_s) observadas pela bóia SiMCosta PR de acordo com a estação do ano	58
Figura 20 – Gráficos de Intensidade vs. Frequência de ondas observados pela bóia SiMCosta PR	59
Figura 21 – Esquema de montagem dos derivadores de correntes longitudinais	62
Figura 22 – Esquema de conexão dos componentes eletrônicos inseridos no derivador sem sistema de telemetria	63
Figura 23 – Imagem do corpo externo dos derivadores construídos e alocação dos componentes eletrônicos	64
Figura 24 – Projeto de derivador impresso em impressora 3D	66

Figura 25 – Ilustração do processo de impressão dos equipamentos	67
Figura 26 – Exemplo do sistema de lastro e vedação na base do derivador	69
Figura 27 – Comparação entre os três modelos de derivadores construídos	69
Figura 28 – Esquema de conexão entre os componentes eletrônicos para a versão do derivador com telemetria de dados	71
Figura 29 – Configuração dos eletrônicos utilizados para a base receptora de dados telemétricos	73
Figura 30 – Exemplos das telas do sistema telemétrico	74
Figura 31 – Quadros de imagem de drone indicando ausência de transporte do derivador devido quebra de ondas	75
Figura 32 – a) antena direcional utilizada para recepção dos dados e b) interface do sistema da base receptora com localização da base e do ponto com maior distância de transmissão	77
Figura 33 – Derivador posicionado em campo aberto para realização do teste estático para avaliação dos sensores GNSS	78
Figura 34 – Nuvem de pontos registrados pelo sensor GNSS durante os caminhamentos do teste cinemático	79
Figura 35 – Levantamento simultâneo com derivador e ADCP na desembocadura do rio Matinhos	81
Figura 36 – Gráficos da variação do deslocamento em relação à latitude (dy) e longitude (dx) médias e do parâmetro HDOP ao longo do tempo de amostragem do teste estático	82
Figura 37 – Área de abrangência da grade 1 – SWAN 500 m	84
Figura 38 – Batimetria interpolada para a Grade 2 – Guaratuba	86
Figura 39 – Batimetria interpolada para a Grade 3 – Riviera	87
Figura 40 – Espacialização das três grades implementadas: 1) SWAN 500m; 2) Domínio Guaratuba; e 3) Domínio Matinhos	88
Figura 41 – Comparação entre dados medidos pela bóia SimCosta PR e calculados pelo SWAN	89
Figura 42 – Gráficos de Intensidade vs. Frequência de ondas observados pela bóia SimCosta PR e calculados pelo SWAN	90
Figura 43 – Gráficos de dispersão com avaliação estatística entre dados observados e calculados	91
Figura 44 – Gráficos de dispersão da posição horizontal dos sensores Neo-6M e Neo-7M em relação ao ponto médio durante o teste estático	94
Figura 45 – Gráficos de dispersão das componentes de velocidade dos sensores Neo-6M e Neo-7M durante o teste estático	95

Figura 46 – Gráfico relacionando velocidades médias calculadas pelo método de cronometragem e obtidas pelo sensor GNSS durante o teste cinemático com ajuste de reta de regressão linear	97
Figura 47 – Gráfico de variação das velocidades médias cronometradas e obtidas pelo GNSS durante caminhada de 800m	98
Figura 48 – Gráfico relacionando velocidades médias calculadas pelo correntômetro acústico ADCP M9 e pelo derivador com cálculo de coeficiente de correlação (R^2)	99
Figura 49 – Resultados da filtragem da velocidade comparando dados brutos com dados filtrados para a amostragem de 19/02/2020	101
Figura 50 – Gráfico de distribuição de frequência e intensidade das velocidades dos dois derivadores lançados dia 20/02/2020	102
Figura 51 – Mapa de distribuição espacial das velocidades instantâneas de ambos derivadores na campanha de 19/02/2020	103
Figura 52 – Resultados da filtragem da velocidade comparando dados brutos com dados filtrados para a amostragem de 15/07/2021	104
Figura 53 – Gráfico de distribuição de frequência e intensidade das velocidades dos dois derivadores lançados dia 15/07/2021	105
Figura 54 – Mapa de distribuição espacial das velocidades instantâneas medidas na campanha de 15/07/2021	106
Figura 55 – Resultados da filtragem da velocidade comparando dados brutos com dados filtrados para a amostragem de 21/05/2022	106
Figura 56 – Gráfico de distribuição de frequência e intensidade das velocidades dos dois derivadores lançados dia 21/05/2022	107
Figura 57 – Mapa de distribuição espacial das velocidades instantâneas medidas na campanha de 21/05/2022	108
Figura 58 – Comparação entre apenas modelo hidrodinâmico (a) e modelo hidrodinâmico acoplado com modelo de ondas para simular interação onda-corrente (b)	109
Figura 59 – Resultados do modelo numérico com interação entre ondas e correntes para os períodos de amostragem com derivador	113
Figura 60 – Comparação entre componentes de velocidade, oscilação da maré e altura significativa de ondas medidas pelo ADCP e calculadas pelo modelo	114
Figura 61 – Gráficos de dispersão e linha de regressão linear para os dados de módulo da velocidade (a), altura significativa de onda (b) e nível d'água (c) medidos pelo ADCP e calculados pelo modelo	114
Figura 62 – Diagrama de intensidade e frequência observados pelo ADCP (a) e calculados pelo modelo (b) para o mesmo período de tempo	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos utilizados pelo SWAN para determinação dos termos fonte da equação do balanço de ação espectral	46
Tabela 2 – Detalhamento de custos para construção de uma unidade do derivador sem sistema de telemetria	65
Tabela 3 – Configurações de impressão 3D utilizadas para confecção dos derivadores	67
Tabela 4 – Tempo de impressão e consumo de filamento para a construção de uma peça completa do derivador	68
Tabela 5 – Protocolo para status de funcionamento dos componentes eletrônicos com o uso de um led RGB	72
Tabela 6 – Detalhamento dos custos para desenvolvimento de uma unidade do derivador impresso 3D e portando sistema de telemetria e da base receptora de dados	75
Tabela 7 – Testes realizados para avaliação da autonomia da bateria com diferentes configurações	76
Tabela 8 – Detalhamento das tomadas parciais de tempo com a respectiva velocidade média calculada para os tempos cronometrados	80
Tabela 9 – Comparação entre valores médio e máximo de altura significativa e período de ondas observados e calculados	90
Tabela 10 – Parâmetros estatísticos calculados para os resíduos no eixo das latitudes (x) e longitudes (y) durante o teste estático	93
Tabela 11 – Parâmetros estatísticos calculados para a variação das componentes u e v e magnitude das velocidades registradas durante o teste estático	94
Tabela 12 – Comparação entre velocidades médias calculadas pela cronometragem do tempo de deslocamento e registradas pelo sensor GNSS para os mesmos instantes de tempo	96
Tabela 13 – Velocidades média, máxima e desvio padrão de cada derivador antes e após filtragem dos dados	100
Tabela 14 – Velocidades média, máxima e mínima em cada ponto de amostragem após filtragem dos dados	103
Tabela 15 – Velocidades média, máxima e desvio padrão após filtragem dos dados medidos na campanha de 21/05/2022	105
Tabela 16 – Comparação entre velocidades médias medidas pelo derivador e calculadas pelo modelo nos períodos de amostragem de dados e parâmetros de ondas calculados pelo modelo na zona de arrebentação	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite (<i>Global Navigation Satellite System</i>)
GPS	<i>Global Positioning System</i> – sistema de navegação GNSS mantida pelo governo dos EUA
GLONASS	<i>Global Navigational Satellite System</i> – sistema de navegação GNSS mantido pelo governo Russo
HDOP	Diluição da precisão horizontal do sinal GNSS
S	Sul
SSW	Sul-Sudoeste
SW	Sudoeste
WSW	Oeste-Sudoeste
W	Oeste
WNW	Oeste-Noroeste
NW	Noroeste
NNW	Norte-Noroeste
N	Norte
NNE	Norte-Nordeste
NE	Nordeste
ENE	Leste-Nordeste
E	Leste
ESE	Leste-Sudeste
SE	Sudeste
SSE	Sul-Sudeste
WW3	<i>Wave Watch III</i> (modelo de ondas - águas profundas)
SWAN	<i>Simulating Waves Nearshore</i> (modelo de ondas - águas costeiras)

MOHID	MOdelo HIDrodinâmico (modelo hidrodinâmico de correntes e maré)
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
ADV	<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>
LoRa	<i>Long Range Radio Protocol</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

H_s	Altura significativa de ondas (m)
T_m	Período médio de ondas (s)
D_m	Direção média de ondas ($^\circ$)
R^2	Coefficiente de correlação
MAE	Erro Médio Absoluto
$RMSE$	Raíz do Erro Quadrático Médio
SI	Índice de Dispersão (adimensional)
STD	Desvio Padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	Processos Hidrodinâmicos	20
3.1.1	Marés	20
3.1.2	Ondas	22
3.1.2.1	Ondas Geradas por Vento	23
3.1.2.2	Teoria Linear de Ondas	24
3.1.2.3	Propagação em Águas Costeiras	27
3.1.2.4	Análise Espectral	30
3.2	Zona Costeira	31
3.2.1	Ambiente Praial	31
3.2.2	Correntes Litorâneas	34
3.3	Método Lagrangiano para Descrição de Correntes	37
3.4	Modelagem Numérica	43
3.4.1	Modelagem de Ondas	43
3.4.2	Modelagem Hidrodinâmica	48
3.4.3	Acoplamento de Modelos	50
3.5	Caracterização do Litoral Paranaense	54
4	METODOLOGIA	61
4.1	Desenvolvimento do Derivador	61
4.1.1	Primeira versão - sem telemetria	61
4.1.1.1	Estrutura Física	61
4.1.1.2	Componentes Eletrônicos	62
4.1.1.3	Precificação	64
4.1.2	Segunda versão - Sistema de telemetria em tempo real	65
4.1.2.1	Estrutura Física	65
4.1.2.2	Componentes Eletrônicos	69
4.1.2.3	Protocolo de Status de Funcionamento	71
4.1.2.4	Base receptora - sistema telemétrico	72
4.1.2.5	Precificação	73
4.2	Avaliação de Desempenho do Derivador	74
4.2.1	Testes de Flutuabilidade e Estabilidade	74

4.2.2	Avaliação de Alcance da Antena	76
4.2.3	Avaliação de Autonomia	76
4.2.4	Avaliação de Qualidade dos Sensores GNSS	77
4.2.4.1	Teste Estático - Campo Aberto	78
4.2.4.2	Teste Cinemático - Pista de Atletismo	79
4.2.4.3	Teste em Canal - Comparação GNSS e ADCP	80
4.3	Modelagem Numérica	82
4.3.1	Modelagem Acoplada – Interação Onda-corrente	85
4.3.2	Validação – Grade 1 – SWAN 500 m	88
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1	Avaliação de Desempenho do Derivador	93
5.1.1	Teste Estático GNSS	93
5.1.2	Teste Cinemático GNSS	95
5.1.3	Teste em Canal - Comparação entre GNSS e ADCP	97
5.2	Amostragem de Dados na Praia Central de Matinhos	99
5.2.1	Amostragem de Verão - 19/02/2020	100
5.2.2	Amostragem em Pré-Frontal - 15/07/2021	103
5.2.3	Amostragem em Pós-Frontal - 21/05/2022	104
5.3	Modelagem Numérica	108
5.3.1	Análise de Sensibilidade - Interação onda-corrente	108
5.3.2	Simulações em períodos de amostragem com derivador	109
6	CONCLUSÕES	116
	REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICES	126
	APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE: ARDUINO NANO - GPS DA- TALOGGER (C++)	127
	APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE: ESP32 LORA - TRANSMIS- SOR (C++)	131
	APÊNDICE C – CÓDIGO FONTE: ESP32 LORA - RECEPTOR (C++)	139
	APÊNDICE D – CÓDIGO FONTE: MONITOR SERIAL EM TEMPO REAL (PYTHON)	141

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das maiores faixas litorâneas do mundo, com cerca de 7.500 km de linha de costa, abrigando, de acordo com dados do Ministério do Meio Ambiente, cerca de um quarto da população brasileira na região costeira, que dependem de recursos marinhos para a sobrevivência. Além disso, o litoral possui grande atratividade turística e importância para o desenvolvimento econômico, como a intensa exploração da atividade portuária.

Dessa forma, a pressão antrópica exercida sobre essa região – como a ocupação desordenada da orla com a supressão da vegetação de restinga – vem modificando profundamente o ambiente costeiro no Brasil, sendo a erosão costeira um dos principais problemas, e que está associado, basicamente, à interferência humana na configuração da linha de costa. Ainda, as consequências do processo de aquecimento global podem agravar a intensidade dos problemas em zonas costeiras devido à elevação do nível do mar e intensificação de eventos meteorológicos extremos, podendo acarretar em drástica mudança na configuração das linhas de costa.

Com isso, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos que busquem uma melhor compreensão da dinâmica presente na região praial, principalmente efeitos ocorridos na zona de arrebenção, uma vez que a interação entre ondas e correntes geram uma importante circulação que é diretamente responsável pela modificação da linha de costa a curto e longo prazo.

Uma das formas de se analisar a dinâmica praial é através da aplicação de modelos numéricos que simulam processos hidrodinâmicos gerados pela interação entre ondas e correntes e consequente transporte de sedimentos em decorrência dessas forçantes hidrodinâmicas, como os modelos desenvolvidos por Franz et al. (2017a) e Moreira (2019). Entretanto, o principal desafio desses sistemas de modelagem é a aquisição de dados de velocidades na zona de arrebenção para uma adequada validação dos resultados simulados, uma vez que a turbulência gerada pela quebra de ondas impõe uma dificuldade para navegação e instalação de equipamentos.

Dentre as técnicas utilizadas para a medição de correntes na zona de arrebenção, estão o uso de equipamentos acústicos como ADCP (JUNG; TOLDO-JR, 2011; TISSOT et al., 2015) e ADV (CASTELLE et al., 2006) e também correntômetros eletromagnéticos (HUBERTZ, 1986; NOERNBERG, 2001), além de medidas indiretas como o uso de análise de imagens de vídeo (CHICKADEL et al., 2003; ALMAR et al., 2016). Entretanto, o lançamento de equipamentos de alto valor em uma região tão turbulenta representa também um risco devido à chance de perda ou danificação (KUMAR et al., 2020).

Ainda, os processos hidrodinâmicos ocorridos na zona de arrebenção praial possuem uma grande variabilidade espacial e temporal devido à variação na altura e

direção das ondas, batimetria irregular e estruturas de engenharia, o que torna difícil o estudo desta área através de métodos tradicionais, como equipamentos fundeados ou transportados em embarcações. Para uma representação espacial mais eficiente desta região seriam necessários uma série de correntômetros em diferentes pontos (SCHMIDT et al., 2003; KUMAR et al., 2020).

Nesse sentido, o uso de equipamentos lagrangianos – que descrevem a trajetória de uma parcela de fluido ao longo do tempo e do espaço – na zona de arrebentação é uma interessante alternativa para a melhor descrição da estrutura horizontal das correntes presentes neste ambiente. Dentre as metodologias para estimativa de velocidades seguindo o referencial lagrangiano, destacam-se os derivadores, que são capazes de gerar importantes dados para analisar a estrutura horizontal do campo de escoamento e que demandariam uma grande quantidade de equipamentos eulerianos instalados em diferentes pontos simultaneamente para se obter um resultado semelhante (JOHNSON et al., 2003).

Atualmente, com o desenvolvimento de tecnologias de componentes eletrônicos de baixo custo e altamente personalizáveis de acordo com as necessidades do usuário, torna-se possível a construção de sensores e equipamentos consideravelmente baratos e que podem ser reproduzidos facilmente em grande quantidade para estudos ambientais. Esses componentes podem ser aplicados no desenvolvimento de derivadores lagrangianos, com o uso de sensores de posicionamento por satélite (GNSS) com uma excelente precisão para a obtenção de velocidades médias ao longo do tempo.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a hipótese de que um equipamento lagrangiano de baixo custo seja capaz de representar satisfatoriamente velocidades médias de correntes na zona de arrebentação praial, gerando dados que possam ser utilizados na validação de modelos numéricos que considerem efeitos da interação entre ondas e correntes para simulação da hidrodinâmica na zona de arrebentação praial.

2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é desenvolver e avaliar um derivador lagrangiano de baixo custo para aquisição de dados de correntes na zona de arrebentação praias e verificar a aplicabilidade desses dados na validação de modelos numéricos que consideram a interação entre onda e correntes na mesma região.

Para atingir o objetivo geral, o trabalho tem como objetivos específicos:

- i) Desenvolver e validar uma metodologia de baixo-custo para aquisição de dados de correntes litorâneas;
- ii) Realizar monitoramento das correntes geradas pela quebra de ondas em uma praia do município de Matinhos, litoral paranaense, em diferentes períodos do ano;
- iii) Simular as correntes litorâneas com o uso de um modelo acoplado que considera interação entre ondas e correntes implementado para a mesma praia do litoral do Paraná monitorada com o equipamento desenvolvido; e
- iv) Analisar a viabilidade do uso dos dados gerados pelos derivadores na zona de arrebentação na validação do modelo numérico que considera interação entre ondas e correntes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos Hidrodinâmicos

3.1.1 Marés

A atração gravitacional gerada pela lua e, em menor parte, pelo sol sobre a superfície da Terra afetam o nível da água dos oceanos, em um movimento de oscilação harmônica denominado maré. O comportamento da maré pode variar conforme a localização da lua em relação ao ponto de interesse, gerando marés altas (preamar) e baixas (baixa-mar) duas vezes ao dia (na maioria dos locais); e também em função da fase lunar, originando marés de sizígia em períodos de lua nova e cheia, e marés de quadratura, durante fases de lua crescente e minguante. Nas marés de sizígia, devido ao alinhamento do sol e da lua em relação à Terra, a oscilação do nível d'água é amplificada devido ao aumento da atração gravitacional. Por outro lado, marés de quadratura ocorrem quando sol e lua formam um ângulo de aproximadamente 90° , o que gera um maior equilíbrio entre as forças gravitacionais, causando variações com amplitudes mais suaves (STEWART, 1997; HICKS, 2006).

Apesar da oscilação das marés ocorrer em um período de aproximadamente 12 horas, conforme apresentado na Figura 1a, a onda completa pode ser decomposta em vários componentes gerados por diferentes ações da atração gravitacional. A Figura 1b mostra os principais componentes que atuam na variação do nível da água oceânica, e que podem ser classificadas como componentes diurnas (único ciclo por dia) ou semidiurna (dois ou mais ciclos por dia) (HICKS, 2006; LIU et al., 2014).

A previsão das marés para fins de modelagem precisa ser feita através da análise histórica do nível do mar registrado em um determinado ponto. A série temporal obtida deve ser decomposta através da análise de frequências, como transformada de Fourier, de modo a se obter as características (amplitude, fase, período) dos diferentes componentes harmônicos que influenciam na variação do nível do mar. Com base nesses componentes, a previsão da variação do nível no ponto observado devido aos efeitos de atração gravitacional é feita somando as principais componentes decompostas, formando as ondas de maré (STEWART, 1997).

Essa técnica de previsão, entretanto, considera apenas a flutuação do nível d'água devido à forças astronômicas. Durante a passagem de sistemas frontais pelo oceano, o vento intenso e constante que sopra sobre a superfície do mar é capaz de transportar considerável quantidade de água. Devido ao efeito de Coriolis gerado pela rotação da Terra, essa água transportada pela ação do vento tende a ser defletida em um ângulo de até 90° para a esquerda no Hemisfério Sul e para a direita no Hemisfério Norte. Quando esta

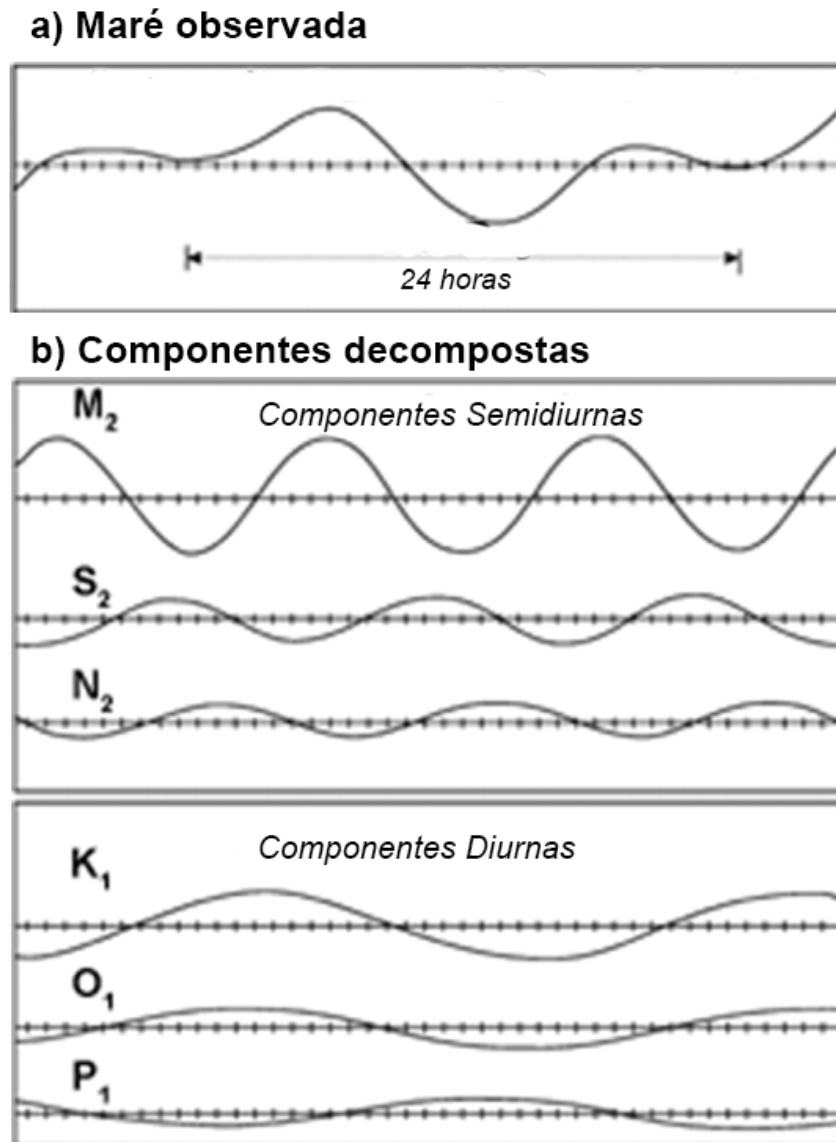


Figura 1 – a) variação de maré observada durante período de um dia; e b) componentes de maré decompostas por análise de frequências harmônicas

Fonte: Adaptado de Liu et al. (2014)

deflecção ocorre na direção de ambientes costeiros, o empilhamento da água na costa atua como um amplificador na oscilação da maré astronômica, gerando as chamadas marés meteorológicas que, quando combinadas com ondas intensas, geram significativa destruição nas praias atingidas (HICKS, 2006).

Ainda, o principal efeito da oscilação vertical do nível d'água devido às marés, principalmente em águas costeiras, é a geração do movimento horizontal da água, originando as correntes de maré. Em ambientes estuarinos e próximo à desembocaduras de estuários, a variação da maré ao longo do dia gera fluxos de correntes na direção interna (correntes de enchente) e externa (correntes de vazante) do estuário. São essas correntes as principais responsáveis pelo transporte de sedimentos e consequente modificação morfológica em ambientes estuarinos e de desembocadura (ROSS, 1995; HICKS, 2006).

Além da circulação induzida por correntes de maré, em ambientes estuarinos e próximos a desembocaduras, a interação entre a água salgada transportada pelas marés e a água doce descarregada pelos rios gera outro importante fenômeno que afeta os processos físicos e biológicos nesses ambientes: a estratificação. De acordo com Fischer et al. (1979), a estratificação salina em ambientes costeiros influencia os campos de velocidade, uma vez que camadas verticais de diferentes densidades podem escoar em velocidades e direções distintas em uma mesma seção, e no comportamento dos processos de mistura turbulenta e difusividade. No ambiente praiial, entretanto, a baixa influência de descargas fluviais juntamente com a elevada turbulência gerada pela quebra das ondas faz com que processos de estratificação não influenciem na hidrodinâmica e, conseqüentemente, no transporte de sedimentos.

3.1.2 Ondas

Ondas podem ser definidas como uma perturbação que se propaga em um movimento harmônico através de um meio de um ponto a outro transportando energia (RAMALHO et al., 1996). Do ponto de vista físico, uma onda (Figura 2) é composta por um comprimento (L), que consiste na distância horizontal entre duas cristas - ou dois cavados; amplitude (a), que é a distância entre a crista da onda e o nível da superfície não perturbada; altura (h), caracterizada pela distância vertical entre a crista e o cavado; período (T), que é a diferença de tempo entre a passagem de uma onda completa; e frequência (f), definida como o inverso do período ($1/T$) e que representa a quantidade de ciclos de ondas propagadas em um determinado período de tempo, sendo comumente definida em termos de ciclos por segundo (Hz).

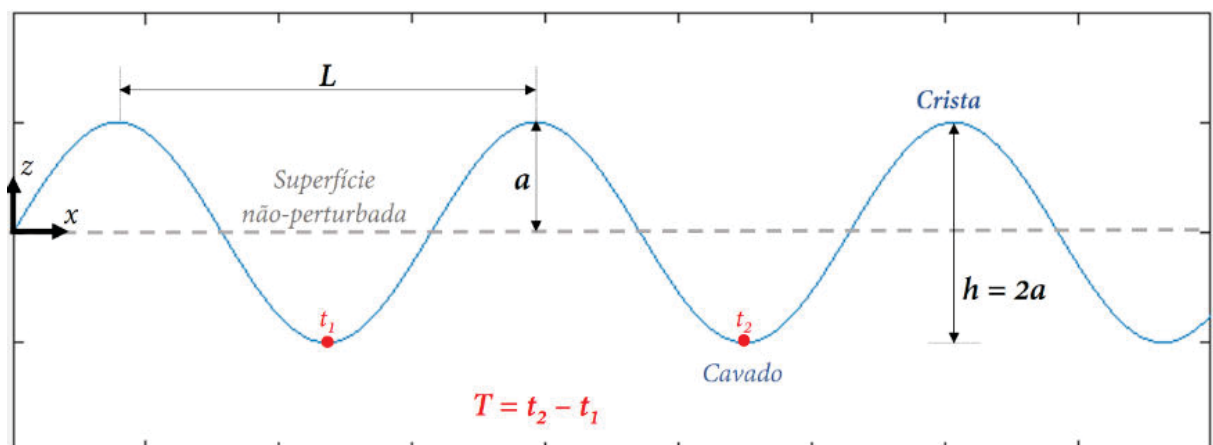


Figura 2 – Principais termos utilizados na análise de ondas oceânicas

As ondas que se deslocam pelo oceano possuem diferentes características, possuindo distintas forças geradoras e restauradoras. O comprimento das ondas pode variar de milhares de quilômetros (ondas de maré e planetárias) até poucos centímetros (ondas capilares). O período das ondas oceânicas também varia da escala de dias a poucos

segundos. A Figura 3 exemplifica o espectro dos diferentes tipos de ondas presentes no oceano, de acordo com o período e forças de geração, destacando a grande importância das ondas geradas pelo vento no transporte de energia (KINSMAN, 1984).

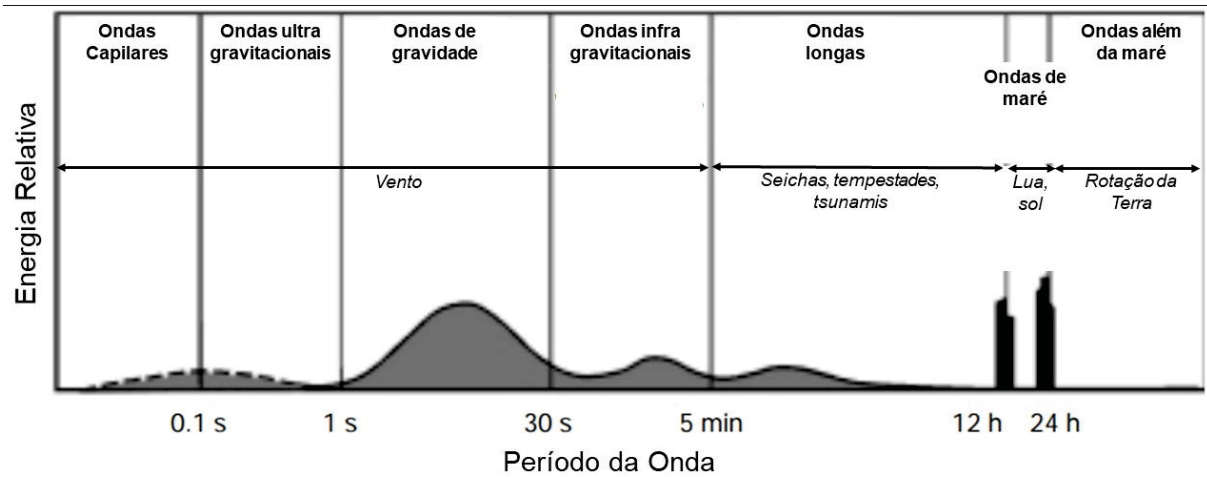


Figura 3 – Energia total transportada pelos principais tipos de ondas presentes no oceano de acordo com força geradora e período

Fonte: Adaptado de Holthuijsen (2007)

As principais ondas que atuam no transporte de sedimentos na região costeira são geradas pelo vento e, em menor escala, pela oscilação das marés. A seguir, serão apresentadas as principais características desses dois tipos de ondas.

3.1.2.1 Ondas Geradas por Vento

Ondas geradas pelo vento são formadas pela transferência de energia entre a atmosfera e a superfície do oceano através da força de atrito. Conforme a força do vento adquire capacidade para perturbar a superfície oceânica, flutuações aleatórias da pressão dão origem à pequenas ondas - as ondas capilares -, que possuem comprimento inferior a 2 cm (PHILLIPS, 1957). Conforme o vento continua a agir sobre a superfície já perturbada, as diferenças de pressão entre crista e cavado aumentam, gerando um crescimento exponencial das ondas (MILES, 1957). Conforme as ondas se desenvolvem, passam a interagir entre si, ocasionando ondas maiores, em um processo de interações não-lineares, transferindo energia para ondas menores (HASSELMANN et al., 1973).

O tamanho que as ondas podem adquirir está diretamente relacionado à intensidade, duração e extensão da área de influência do vento (pista). Bretschneider (1952), analisando o comportamento das ondas durante diferentes eventos de tempestade, estabeleceu uma relação entre a altura significativa das ondas com a velocidade do vento e a extensão da pista de vento, resultando no diagrama de Bretschneider, apresentado na Figura 4.

A classificação das ondas geradas por vento está relacionada ao local de propagação desta onda. Quando ainda estão na área de influência dos ventos geradores, as ondas são classificadas como vagas, e possuem aparência desordenada, sem uma linha de propagação bem definida e período inferior a 10 segundos. À medida que se afastam da área geradora,

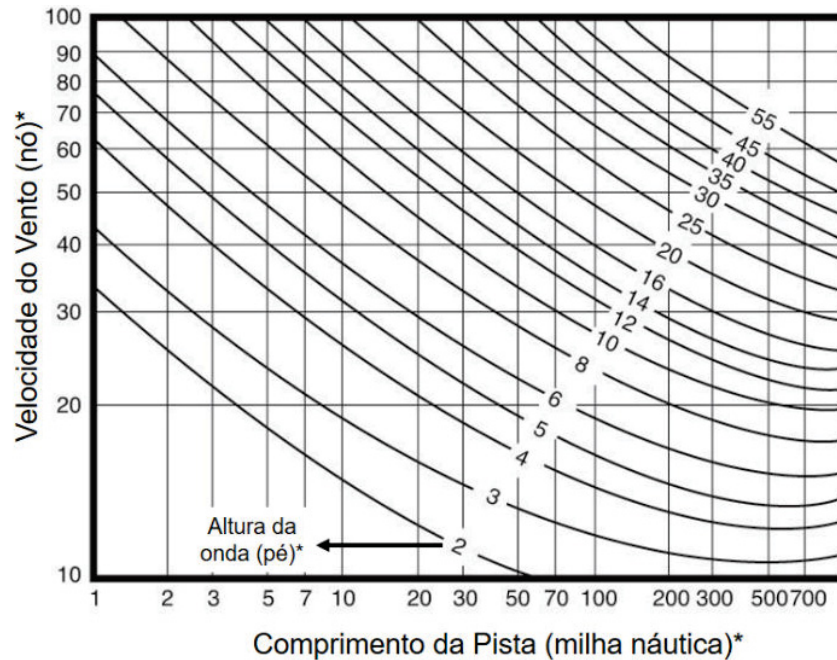


Figura 4 – Diagrama de Bretschneider que estima altura da onda através da relação entre extensão da pista e velocidade do vento; *1 milha náutica = 1,852 km, 1 nó = 1,852 km/h e 1 pé = 0,3048 m

Fonte: Adaptado de Bretschneider (1952)

a diferença de velocidade de propagação entre os diferentes comprimentos de onda faz com que estas se organizem em grupos com aparência bem definida, e são chamadas de ondas de *swell*, ou de marulho, e que são mais longas que ondas de vagas, atingindo períodos de até 30 segundos. A maior parte das ondas que atingem uma costa são geradas pela ação de ventos locais (vagas), entretanto, durante a passagem de sistemas frontais de alta intensidade, é comum a propagação de ondas de *swell* por milhares de quilômetros, atingindo a região costeira (STEWART, 1997; KOMAR, 1998).

3.1.2.2 Teoria Linear de Ondas

A propagação de ondas oceânicas é um fenômeno essencialmente não-linear, uma vez que a solução das equações do movimento exige condições de contorno da superfície, porém, o deslocamento da superfície livre devido às ondas é o que se deseja calcular. Assim, faz-se necessário a adoção de simplificações com o objetivo de tornar possível a representação da propagação seguindo a teoria linear. A teoria apresentada a seguir segue a abordagem considerada por diversos autores (DEAN; DALRYMPLE, 1984; STEWART, 1997; HOLTHUIJSEN, 2007; KUNDU et al., 2012).

Assumindo que a amplitude das ondas é infinitamente pequena em relação à coluna d'água, pode-se considerar uma superfície totalmente plana. Ainda, pode-se considerar um deslocamento bidimensional, com propagação horizontal das ondas apenas na direção x . Também é possível assumir que a força de Coriolis e a viscosidade são desprezíveis e o escoamento é irrotacional. Dessa forma, a elevação da superfície do mar (η) devido às

ondas é calculada pela seguinte relação:

$$\eta(x, t) = a \operatorname{sen}(kx - \omega t) \quad (3.1)$$

Sendo:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad ; \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.2)$$

Onde: a = amplitude da onda (m);

k = número da onda (m^{-1});

ω = frequência angular da onda (rad/s);

t = tempo (s);

f = frequência da onda (Hz);

T = período da onda (s);

L = comprimento da onda (m).

A frequência angular (ω) e o número de onda (k) estão relacionados pela relação de dispersão:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (3.3)$$

Onde: g = aceleração da gravidade (m/s^2);

d = profundidade da coluna d'água no ponto analisado (m).

A relação de dispersão pode ser aproximada de acordo com a profundidade da seção. Em águas profundas, a espessura da coluna d'água assume valores significativamente maiores que o comprimento de onda ($d \gg L$), o que faz com que o argumento da tangente hiperbólica assumira valores muito altos, podendo-se assumir que o resultado de $\tanh kd \approx 1$. Ao atingir águas rasas, a profundidade é significativamente menor que o comprimento da onda ($d \ll L$), fazendo com que o valor do argumento da tangente hiperbólica se aproxime de zero. Nesse caso, o valor da tangente hiperbólica pode ser assumido como igual ao argumento, ou seja, $\tanh kd = kd$.

Portanto, a relação de dispersão pode ser reescrita das seguintes maneiras, para deslocamento de ondas em águas profundas e rasas:

Relação de dispersão para águas profundas ($d > L/4$):

$$\omega^2 = gk \quad (3.4)$$

Relação de dispersão para águas rasas ($d < L/11$):

$$\omega^2 = gk^2 d \quad (3.5)$$

A velocidade em que uma onda se propaga é definida pela razão entre o comprimento e o período da onda. Assim, a velocidade de fase da onda pode ser escrita como:

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (3.6)$$

Em águas profundas, a velocidade de fase depende do comprimento ou frequência da onda, com ondas maiores viajando mais rápido, isto faz com que ondas de águas profundas sejam classificadas como dispersivas (tendência à separação). Em águas rasas, a velocidade de fase passa a ser influenciada apenas pela profundidade, não sofrendo influência da frequência ou comprimento. Ondas se propagando em águas rasas são, portanto, não-dispersivas. Assumindo as simplificações para águas profundas e rasas, a velocidade de fase pode ser reescrita das seguintes formas:

Velocidade de fase em águas profundas:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega} \quad (3.7)$$

Velocidade de fase em águas rasas:

$$c = \sqrt{gd} \quad (3.8)$$

Em um sistema dispersivo, a energia de um componente de onda não se propaga com velocidade igual à velocidade de fase, mas em uma velocidade de grupo (c_g), que pode ser definida como a taxa de variação da relação de dispersão com relação (ω) ao número de onda (k):

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (3.9)$$

Assumindo as aproximações da relação de dispersão, a velocidade de grupo para águas profundas pode ser simplificada de acordo com a expressão abaixo, enquanto em águas rasas – não-dispersiva –, a velocidade de grupo é igual à velocidade de fase ($c_g = c$).

Velocidade de grupo em águas profundas:

$$c_g = \frac{g}{2\omega} = \frac{c}{2} \quad (3.10)$$

3.1.2.3 Propagação em Águas Costeiras

Ondas se propagando em águas rasas sofrem uma série de transformações no padrão de propagação. Dentre as principais mudanças verificadas no trem de ondas ao atingir águas costeiras, está o aumento da amplitude da onda conforme a profundidade diminui (empolamento), a dissipação da energia devido à quebra e a mudança dos raios de ondas devido à refração e difração.

Ao se propagar sobre um fundo com declividade suave e ausência de correntes, uma onda tende a manter sua frequência. Assim, seguindo a relação de dispersão, a redução da profundidade acarreta na diminuição do comprimento e da velocidade de propagação da onda. A consequência desse efeito é o aumento da amplitude, no processo denominado empolamento de onda (HOLTHUIJSEN, 2007).

A relação entre o aumento da amplitude conforme a profundidade é reduzida pode ser feita através da análise da equação do fluxo de energia transportada pela onda. Assumindo o princípio da conservação de energia, o fluxo energético se mantém constante conforme a onda se propaga entre dois pontos com profundidades distintas (DEAN; DALRYMPLE, 1984; HOLTHUIJSEN, 2007):

$$\frac{\rho g a_1^2}{2} c_{g,1} = \frac{\rho g a_2^2}{2} c_{g,2} \quad (3.11)$$

Eliminando os termos constantes, chega-se à relação entre velocidade de propagação e amplitude da onda. Sabendo que em águas rasas a velocidade de grupo é igual à velocidade de fase, e que esta depende apenas da profundidade ($c = \sqrt{gd}$), pode-se estabelecer relação entre a variação da amplitude apenas em função da batimetria:

$$a_2 = a_1 \sqrt{\frac{c_{g,1}}{c_{g,2}}} = a_1 \sqrt[4]{\frac{d_1}{d_2}} \quad (3.12)$$

Ao analisar numericamente a equação do empolamento, conforme a profundidade da seção continua diminuindo, o valor da amplitude tende ao infinito. Na realidade, entretanto, ao atingir uma altura crítica a onda desestabiliza e quebra, dissipando boa parte da energia em forma de turbulência e atrito com o leito. A quebra pode ser classificada como o efeito mais importante na modificação da morfologia praial, entretanto, é um processo complexo e pouco compreendido, sendo difícil de modelar numericamente, o que faz com que as principais informações sobre a dinâmica da quebra de ondas sejam baseadas em dados empíricos (DEAN; DALRYMPLE, 1984; HOLTHUIJSEN, 2007).

Um modelo utilizado por diversos sistemas de modelagem de ondas para simulação do efeito da quebra de ondas foi desenvolvido por Battjes e Janssen (1978), que utiliza a analogia de dissipação de energia ocorrida em ressaltos hidráulicos para estimar a energia perdida pela onda por unidade de tempo e área horizontal devido ao efeito de quebra.

O ângulo de incidência entre a crista da onda e a faixa praial faz com que a velocidade de propagação varie espacialmente para a mesma crista. Essa angulação faz com que parte da onda atinja a seção mais rasa primeiro, reduzindo a velocidade, enquanto outra parte continua se propagando a uma velocidade maior. Esse efeito faz com que o raio da onda se curve em direção à parte que se propaga em velocidade menor, gerando um alinhamento da crista com relação à costa, causando uma quebra quase paralela à praia. Exemplo dessa curvatura do raio da onda é verificado na Figura 5 (HOLTHUIJSEN, 2007).

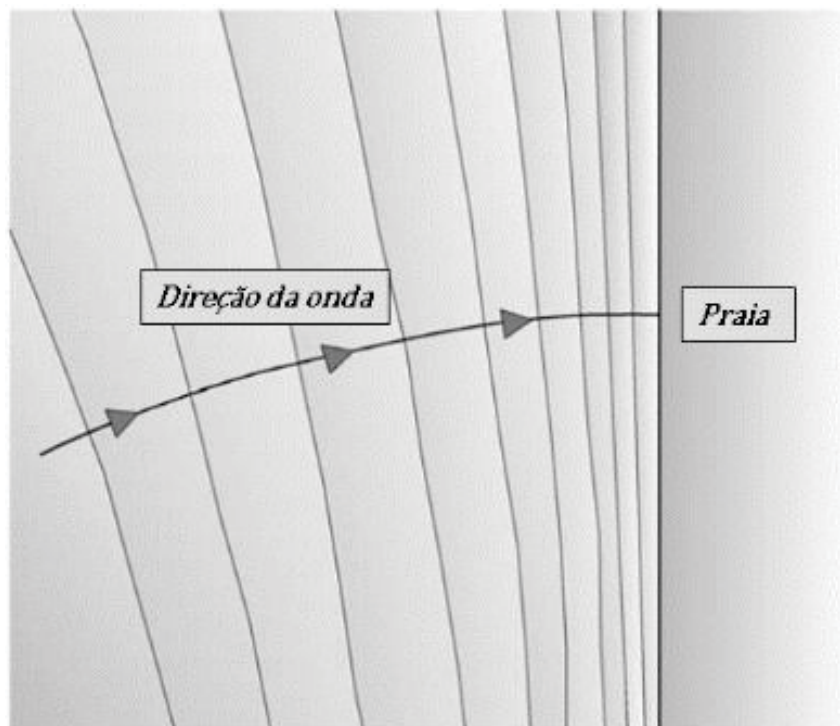


Figura 5 – Variação do ântulo de incidência da onda devido ao efeito de refração
Fonte: Adaptado de Holthuijsen (2007)

A determinação da variação do ângulo de incidência de uma onda devido ao efeito de refração pode ser calculada pela Lei de Snell, considerando casos de propagação apenas na direção x, ou seja, com topografia constante e paralela à praia (DEAN; DALRYMPLE, 1984):

$$\frac{\sin \theta}{c} = \frac{\sin \theta_0}{c_0} \quad (3.13)$$

Onde: θ = ângulo de incidência na seção analisada ($^{\circ}$);

c = velocidade de propagação na seção analisada (m/s);

θ_0 = ângulo de incidência em águas profundas ($^{\circ}$);

c_0 = velocidade de propagação em águas profundas (m/s).

Entretanto, a Lei de Snell é válida apenas para ondas se propagando sem variações na direção y, e considerando contornos topográficos paralelos à costa. Na realidade, a

topografia na zona de arrebentação é irregular e varia consideravelmente ao longo da costa, dessa forma, é necessário a aplicação de uma equação completa para a representação da variação do ângulo de incidência da onda conforme se aproxima da praia (DEAN; DALRYMPLE, 1984):

$$\frac{\partial k \sin \theta}{\partial x} - \frac{\partial k \cos \theta}{\partial y} = 0 \quad (3.14)$$

De modo a facilitar o cálculo da refração, o sistema de coordenadas pode ser transformado em função da direção do vetor do número de onda (k), conforme mostrado na Figura 6. Dessa forma, a equação que relaciona a variação do ângulo de incidência com a topografia pode ser escrita da forma apresentada abaixo, tanto em função do número de onda (k) quanto em função da velocidade de propagação (c):

$$\frac{\partial \theta}{\partial s} = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial n} = -\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial n} \quad (3.15)$$

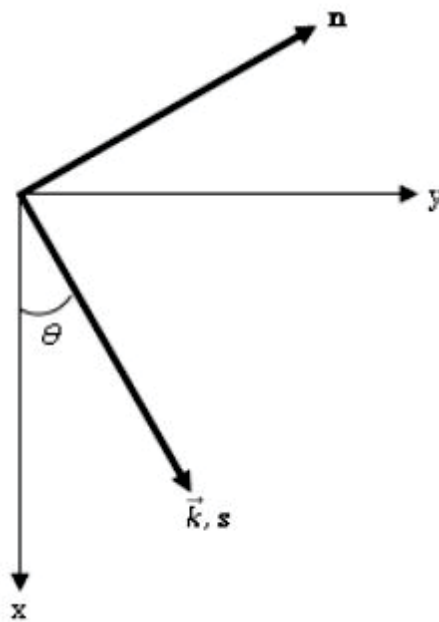


Figura 6 – Sistema de coordenadas (s, n) adaptado em função da direção do vetor do número de onda (k), onde y representa o eixo da posição da linha de costa

Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple (1984)

Outro efeito importante que afeta a propagação de ondas em águas rasas é a difração. Esse processo ocasiona a dispersão da energia transportada por uma onda lateralmente e perpendicular ao ângulo de incidência devido à presença de alguma barreira ao escoamento (p. ex. quebra-mar). A Figura 7 mostra a formação de uma área de sombra devido à barreira. A linha geométrica indica o limite em que as ondas sentem a influência da barreira e difratam, enquanto ondas que não são afetadas pela barreira seguem sua propagação no ângulo de incidência original (DEAN; DALRYMPLE, 1984).

A representação numérica do efeito de difração é realizada através da aplicação da equação de Helmholtz. Essa equação é derivada seguindo a mesma abordagem aplicada

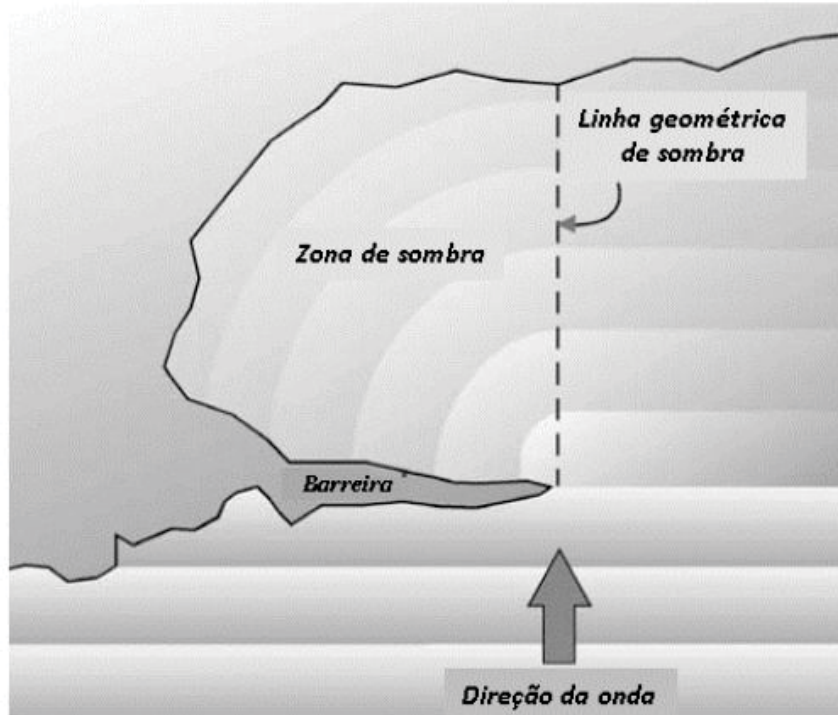


Figura 7 – Efeito de difração da onda devido a presença de alguma barreira
 Fonte: Adaptado de Holthuijsen (2007)

para a solução das equações de Laplace para obtenção da relação de dispersão, entretanto, no cálculo da difração ocorre a variação horizontal também da amplitude, e não apenas da fase da onda. Assim, a equação de Helmholtz é expressa da seguinte forma (HOLTHUIJSEN, 2007):

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + k^2 A \right) f(z) \cos(\omega t) - \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + k^2 B \right) f(z) \sin(\omega t) = 0 \quad (3.16)$$

Onde: $A = a \sin \alpha$;

$B = a \cos \alpha$;

α = fase da onda.

3.1.2.4 Análise Espectral

As ondas registradas em um determinado ponto de medição são compostas por componentes de diversas frequências e amplitudes e diferentes fases, em um movimento não-harmônico, isso impossibilita uma abordagem determinística para a descrição do campo de ondas, demandando a descrição como um processo estocástico, caracterizando todas as observações possíveis durante um intervalo de tempo (HOLTHUIJSEN, 2007).

A classificação de uma série de ondas em termos de espectro de energia é realizada através da aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) em uma série temporal de altura de ondas, de maneira análoga à técnica utilizada para decomposição de séries de maré. Essa análise possibilita determinar valores de amplitude e fase para cada frequência,

e gerando um espectro de amplitude e fase (Figura 8). Assim, as ondas observadas em um determinado ponto podem ser aproximadas para uma soma de vários componentes harmônicos independentes:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad (3.17)$$

Onde: a_i e α_i = amplitude e fase, respectivamente, para cada frequência f_i ;

f_i = frequência de cada componente de onda i (Hz);

t = tempo (s).

Quando relacionadas amplitude e frequência, obtém-se um espectro de amplitude de ondas. Para fins de modelagem, entretanto, o mais comum é a utilização de um espectro de energia, derivada a partir da amplitude (DEAN; DALRYMPLE, 1984). O espectro de energia de ondas indica as características das ondas que se propagam no oceano. Na Figura 8 é mostrado exemplo da transformação de uma série de ondas em termos de espectro de energia. Quando o espectro apresenta um pico de frequência estreito, com poucos registros nas outras faixas do espectro, indica que o movimento ondulatório é harmônico, com ondas bem organizadas. Entretanto, espectros com picos mais suaves, com registro de frequências em várias faixas, indicam um campo de ondas com agitação caótica e desordenada (HOLTHUIJSEN, 2007).

3.2 Zona Costeira

3.2.1 Ambiente Praial

A parte da zona costeira onde a interação entre ondas e os sedimentos de fundo ocorre mais intensamente é um ambiente altamente dinâmico. Komar (1998) define essa

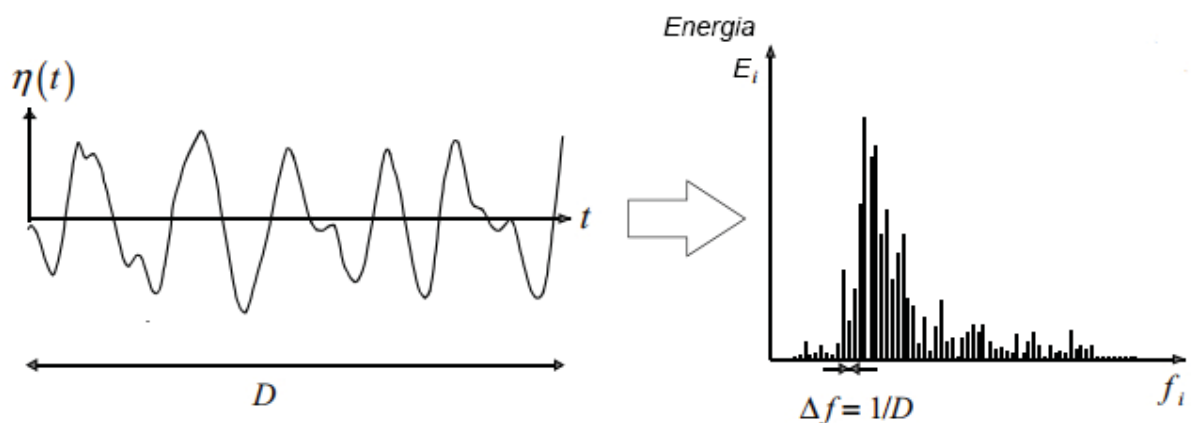


Figura 8 – Exemplo de decomposição de uma série de ondas em termos de espectro de energia

Fonte: Adaptado de Holthuijsen (2007)

região denominada litoral como a zona que se estende entre a parte exposta do perfil praiial até a região submersa com uma profundidade onde as partículas do fundo não sofrem influência da propagação de ondas (geralmente entre 10 e 20 metros de coluna d'água). A Figura 9 esquematiza o exemplo de uma praia com a zonização considerando processos morfológicos e hidrodinâmicos conforme nomenclaturas adotadas por Davis (1985), Komar (1998), Short (1996), Short (1999).

Do ponto de vista morfológico, a praia é separada em zona emersa, que passa a maior parte do tempo fora do nível d'água, podendo ser inundada durante marés de sizígia ou eventos extremos (pós-praia e antepraia superior); e zona submersa (ou imersa), que permanece embaixo d'água durante todo o período de tempo (antepraia inferior). A divisão entre as zonas emersa e imersa é feita pela identificação do nível da maré baixa durante o período de sizígia.

Na zona emersa, a área do pós-praia consiste em uma área plana, podendo haver presença de sistemas dunares, que se estende até uma área de inclinação abrupta causada pela influência das ondas, denominada berma. A área de antepraia superior também pode ser denominada de área entre-marés, e sua extensão é delimitada entre as alturas mínima e máxima durante marés de sizígia (DAVIS, 1985).

A zona da antepraia inferior pode se estender por centenas de metros, e é considerada como a área de maior dinâmica no ambiente costeiro, visto que é nessa região que ocorrem os efeitos de empolamento e consequente quebra das ondas. Ainda, é na antepraia inferior que ocorre a formação de barras submarinas resultantes de sedimentos erodidos durante eventos de tempestade, e que servem de fonte de partículas para a reconstrução da praia durante o verão (DAVIS, 1985; SHORT, 1999).

A divisão da praia com relação à hidrodinâmica pode ser feita em três zonas: i)

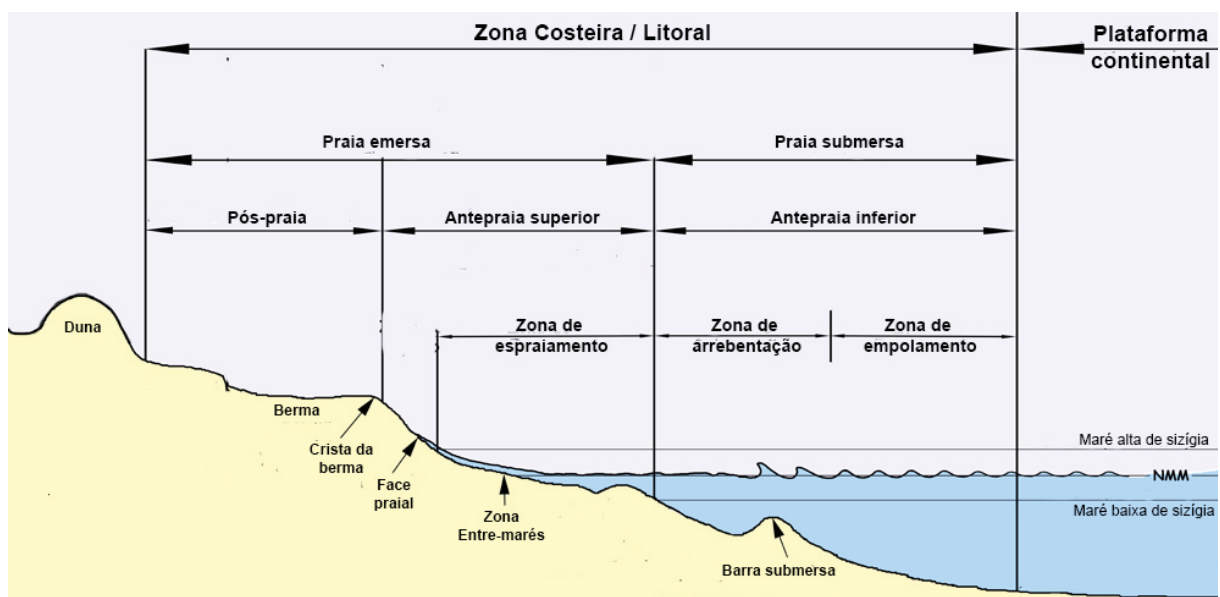


Figura 9 – Localização e nomenclatura dos principais componentes de um sistema praiial
Fonte: Adaptado de APRH-RGCI (2007)

zona de empolamento, onde a amplitude da onda aumenta em função da interação com o fundo; ii) zona de surf, onde ocorre a quebra da onda, com grande dissipação de energia e geração de efeitos turbulentos; e iii) zona de lavagem (ou swash), já na parte emersa da praia, onde ocorre a dissipação final da energia das ondas (SHORT, 1996).

A morfologia de uma praia varia principalmente em função do diâmetro da areia que a forma e do regime de quebra de ondas, havendo também influência da variação das marés e da topografia do terreno (SHORT, 1996). De acordo com Komar (1998), as principais mudanças na configuração do perfil praiial ocorrem devido à variações bruscas nas condições de ondas, resultantes, principalmente, da passagem de tempestades (sistemas frontais). Entretanto, o material erodido durante ondas de tempestade são transportados mar adentro e depositados na zona anterior à linha de arrebentação, formando bancos submersos. Durante o período de verão, a ondulação mais amena (ondas de bom tempo) tende a realocar o material depositado nos bancos novamente em direção à praia, reconstruindo o perfil praiial. Essa variação sazonal do perfil praiial é exemplificada na Figura 10.

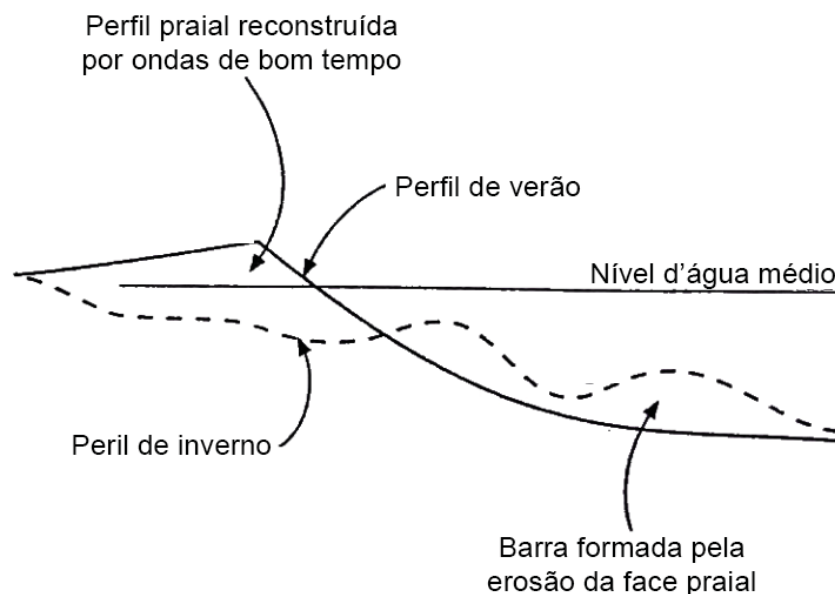


Figura 10 – Variação do perfil de praia devido à diferentes regimes de ondas
Fonte: Adaptado de Short (1999)

Dessa forma, apesar da destruição gerada por ondas de tempestade, as praias tendem a se manter em um estado de equilíbrio morfodinâmico ao longo do ano. Entretanto, a alteração no balanço sedimentar devido à efeitos naturais (mudança no curso de rios, assoreamento e construção de barras longitudinais) ou antrópicos (remoção da vegetação de restinga que retém sedimentos e construção de estruturas que barrem as células de circulação na zona costeira) tendem a romper o equilíbrio morfodinâmico, tornando os efeitos destrutivos mais intensos em relação aos processos de reconstrução do perfil praiial (SHORT, 1999; DAVIDSON-ARNOTT et al., 2010).

A variação morfológica de uma praia pode ser analisada considerando diferentes escalas de tempo: i) instantânea (minutos, hora), que relaciona a análise de processos

relacionados ao transporte de sedimentos para um determinado regime de ondas, ventos e marés; ii) curto-prazo (hora, dias), que estabelece medidas para verificar impactos bruscos causados por tempestade e/ou eventos extremos de ondas; iii) anual, que verifica a variação do perfil praiial considerando a variação dos processos que influenciam o transporte de sedimentos durante as diferentes estações do ano; e iv) decadal, que estabelece medidas durante longos períodos (10-50 anos) para identificar variações no balanço sedimentar, migração de barras, dunas e outras feições devido a atuação das correntes de deriva longitudinal (KOMAR, 1998; DAVIDSON-ARNOTT et al., 2010).

3.2.2 Correntes Litorâneas

O empolamento e conseqüente quebra das ondas resulta em considerável transferência de momento e massa d'água na zona costeira. Dessa forma, a zona de arrebentação é um ambiente considerado altamente dinâmico com relação ao transporte de sedimentos e circulação de correntes, geradas principalmente devido à dissipação de energia decorrente da quebra de ondas (DAVIDSON-ARNOTT et al., 2010).

De acordo com Aagaard e Masselink (1999), apesar do transporte de massa devido à propagação de ondas assimétricas e ao fluxo de maré existir na zona de arrebentação, são as correntes geradas pela quebra das ondas as mais eficazes em termos de velocidade e capacidade de transporte de sedimentos. Essas correntes podem ser classificadas em três tipos distintos: correntes de retorno de fundo (*undertow*), células de corrente de retorno (*rip currents*), e correntes de deriva longitudinal (*longshore currents*).

Correntes de retorno de fundo (*undertow*) são correntes que escoam próximo ao leito na direção oposta à propagação das ondas. A formação dessas correntes ocorre devido a dois fatores principais: i) processos turbulentos gerados pela quebra de ondas, que gera componentes de velocidade na direção oposta; e ii) o acúmulo de massa d'água na face praiial, onde parte consegue retornar ao oceano através das camadas de fundo (DAVIDSON-ARNOTT et al., 2010). A Figura 11 apresenta um exemplo do esquema de funcionamento das correntes de retorno de fundo. Segundo Aagaard e Masselink (1999), devido à alta turbulência presente na zona de quebra de ondas, poucos dados relacionados à essas correntes encontram-se disponíveis, entretanto, estudos indicam que correntes de retorno de fundo possuam intensidade na faixa de 0,2 a 0,3 $m.s^{-1}$, inferior às correntes de retorno e de deriva longitudinal com relação à capacidade de transporte de sedimentos.

Apesar do efeito da refração, que faz com que o trem de ondas incida sobre a costa quase paralelo à praia, a quebra de ondas ainda ocorre com uma pequena angulação - geralmente inferior a 10° (PETHICK, 1984). Esse ângulo de aproximação, somado às demais ondas que continuam se aproximando da costa pela mesma direção, ocasiona um fluxo de momento ao longo da costa, resultando em uma corrente denominada corrente de deriva longitudinal, que atinge velocidades entre 0,2 e 1,0 m/s (INMAN; BAGNOLD, 1963; DAVIDSON-ARNOTT et al., 2010).

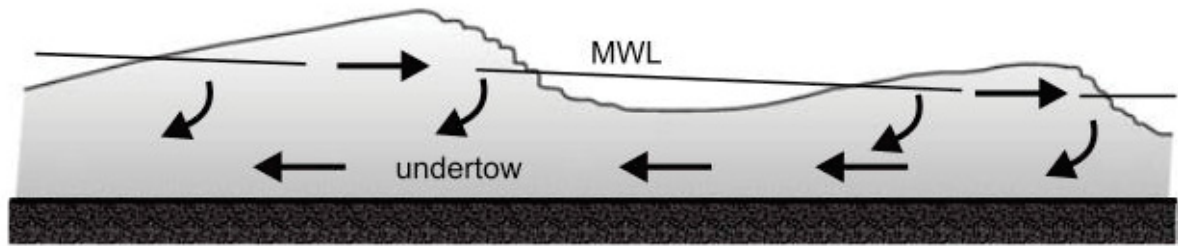


Figura 11 – Variação vertical na direção de correntes, originando correntes de retorno de fundo (*undertow*)

Fonte: Davidson-Arnott et al. (2010)

A intensidade dessas correntes longitudinais é diretamente relacionada com o ângulo de incidência da onda no momento da quebra, quanto maior a inclinação maior a capacidade de gerar correntes fortes, sendo ondas com um ângulo de 45° responsáveis pelas correntes mais intensas (KOMAR, 1998). Ainda, segundo Longuet-Higgins (1970), a velocidade das correntes longitudinais podem ser calculadas através da relação da componente longitudinal da tensão de radiação gerada pela quebra de ondas, definida pelos autores como um gradiente perpendicular de fluxo de momento e que é definida utilizando relações entre a energia e o ângulo de incidência das ondas na zona de arrebentação, como apresentado na equação abaixo.

$$S_{xy} = E \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad (3.18)$$

Onde: E = Energia transportada pela onda por unidade de área (J/m^2);

α = ângulo de incidência da onda em relação à praia;

ρ = densidade da água (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

H = altura da onda (m).

Ainda, é possível prever a corrente longitudinal escoando de forma constante através do balanço entre a tensão de radiação com as forças de atrito sobre o fundo e a viscosidade turbulenta. Longuet-Higgins (1970) estabeleceu uma solução para estimar a velocidade das correntes longitudinais considerando ondas regulares (monocromáticas), a teoria linear de ondas e fundo com declividade constante, chegando a seguinte equação:

$$V = \frac{5\pi \tan \beta}{8 C_f} u_m \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (3.19)$$

Onde: $\tan \beta$ = declividade da zona de arrebentação;

C_f = coeficiente de atrito (0.01);

u_m = velocidade orbital máxima da onda (m/s);

α_b = ângulo de incidência da onda em relação à praia no ponto de quebra.

A equação 3.19 produz um decaimento linear na intensidade da corrente longitudinal entre o ponto de quebra da onda, onde a intensidade é máxima, em direção à praia, onde a intensidade é zero. Isso acontece devido a equação considerar ondas regulares quebrando sempre em um mesmo ponto. Entretanto, a zona de arrebenção é um ambiente onde ondas de diferentes tamanhos quebram em diferentes pontos, produzindo, assim, um perfil de velocidade muito mais suave, conforme ilustrado por Davidson-Arnott et al. (2010) (Figura 12).

São as correntes longitudinais as principais atuantes no transporte sedimentar e modificação da morfologia na região costeira, o que torna o seu conhecimento fundamental no desenvolvimento de modelos voltados para simulação da morfologia praias. O cisalhamento gerado pelas correntes sobre o fundo e ainda os efeitos turbulentos gerados pela quebra das ondas são responsáveis por suspender as partículas de fundo na coluna d'água, que são então transportadas pela componente longitudinal de escoamento, movimentando de centenas a milhares de metros cúbicos de sedimentos por ano no ambiente praias (DAVIDSON-ARNOTT et al., 2010).

Enquanto as correntes de retorno de fundo representam um padrão de circulação vertical na zona costeira, as correntes de retorno (*rip currents*) geram uma célula de circulação horizontal ao longo da praia. Essas células são ocasionadas devido à incidência de ondas que originam as correntes de deriva longitudinal. O escoamento de correntes longitudinais em direções opostas faz com que a direção paralela seja desviada perpendicularmente à praia, gerando fluxo de água em direção ao oceano, perdendo força ao superar a zona de arrebenções dissipando sua energia (DAVIDSON-ARNOTT et al., 2010). De acordo com (BRANDER; SHORT, 2000), devido às correntes de retorno escoarem em uma seção estreita (10-30 m), a velocidade das correntes em direção ao oceano atinge valores significativamente altos, podendo superar $1m.s^{-1}$.

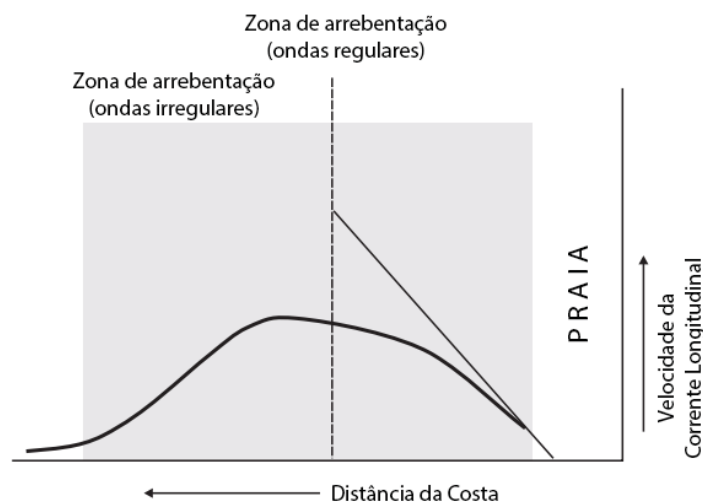


Figura 12 – Perfil de velocidades das correntes longitudinais na zona de arrebenção assumindo a quebra de ondas regulares e irregulares

Fonte: Adaptado de Davidson-Arnott et al. (2010)

A relação entre correntes de retorno e de deriva longitudinal é exemplificada na Figura 13.

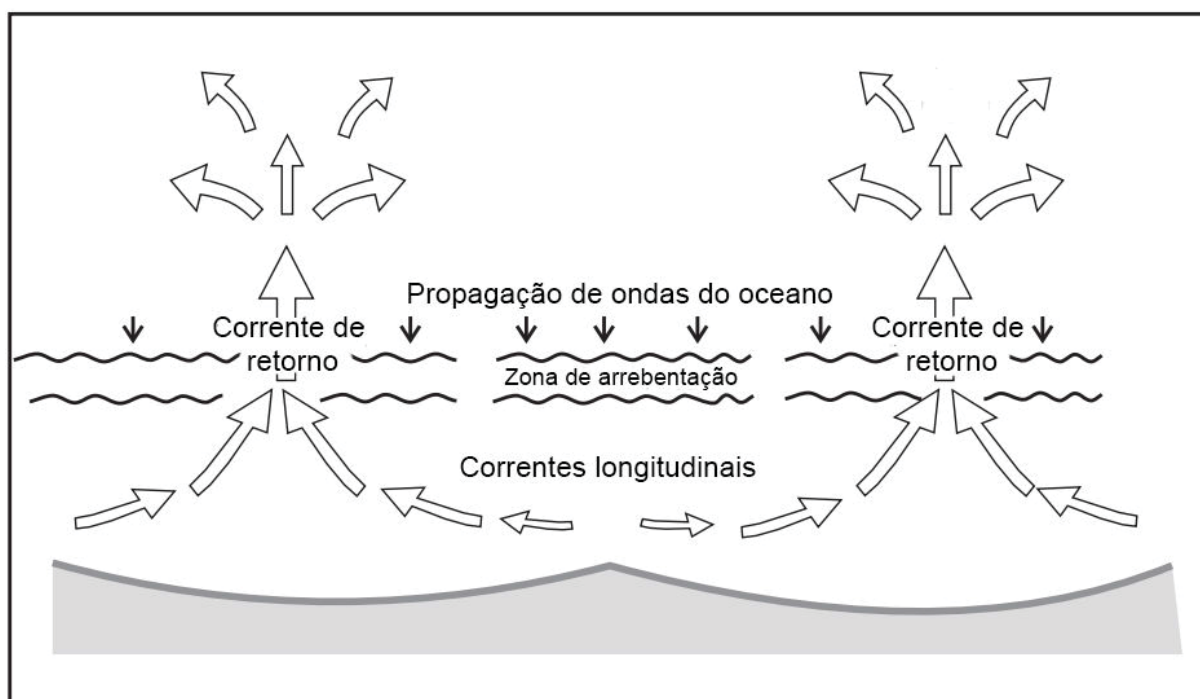


Figura 13 – Células de circulação horizontal devido à quebra de ondas na praia
Fonte: Adaptado de Davidson-Arnott et al. (2010)

3.3 Método Lagrangiano para Descrição de Correntes

A cinemática dos fluidos pode ser descrita de duas formas distintas: a descrição euleriana e a descrição lagrangiana. A primeira, que leva esse nome em homenagem ao matemático Lenhard Euler (1707-1783), é a mais comum na análise da dinâmica dos fluidos. Na velocidade obtida pelo método euleriano, um volume de controle é definido e são analisadas as partículas de fluido que entram e saem deste volume fixo. Dessa forma, equipamentos que utilizam a descrição euleriana permanecem fixos em um determinado ponto medindo a velocidade das partículas que cruzam esta seção em um determinado intervalo de tempo. Dentre os equipamentos eulerianos mais utilizados, destacam-se os correntômetros, que podem ser do tipo eletromagnético ou acústico (STEWART, 1997; ÇENGEL; CIMBALA, 2010).

A abordagem lagrangiana, influenciada pelo matemático italiano Joseph Louis Lagrange (1736-1813), analisa a velocidade de uma determinada partícula ou parcela de fluido ao longo do tempo e do espaço. A descrição de velocidades pelo método lagrangiano representa um desafio, uma vez que não é possível a identificação de uma partícula específica do fluido à medida que ela se movimenta, bem como a interação entre parcelas de fluido não são fáceis de descrever e estas se deformam continuamente à medida que se deslocam (STEWART, 1997; ÇENGEL; CIMBALA, 2010).

De acordo com Rossby (2007), a capacidade do método lagrangiano descrever como as parcelas de fluido movem-se no espaço torna esta abordagem muito valiosa diante da dificuldade que se tem na representação da estrutura horizontal das correntes oceânicas. Para exemplificar a vantagem do método lagrangiano, o autor cita o escoamento em forma de vórtice, onde um correntômetro euleriano permaneceria fixo registrando um escoamento constante em uma determinada direção, enquanto o traçador lagrangiano seria capaz de descrever toda a trajetória e estrutura do vórtice.

Este exemplo é extremamente relevante ao analisarmos o ambiente litorâneo, onde as correntes geradas pela quebra da onda variam significativamente ao longo do espaço, formando células de circulação que variam longitudinalmente (corrente longitudinal) e transversalmente (corrente de retorno) à praia, o que torna interessante a descrição deste ambiente utilizando um método lagrangiano.

Nesse sentido, instrumentos lagrangianos utilizados para cálculo de velocidades em corpos aquáticos podem ser divididos entre de medidas diretas e indiretas. Atualmente, a estimativa de velocidades de forma indireta vem se desenvolvendo juntamente com o avanço na área de geotecnologia, onde o uso de veículos aéreos não tripulados, como *drones*, possibilita o desenvolvimento de uma série de estudos aplicados a esta área. Uma das possibilidades fornecidas por esses equipamentos é a aquisição de vídeos com alta resolução espacial, com inúmeras aplicações para o monitoramento ambiental.

Através do lançamento de traçadores na água com obtenção de imagens aéreas, é possível acompanhar a trajetória das partículas e, através de técnicas de processamento digital de imagem, como os softwares PTV (*Particle Tracking Velocimetry*; Brevis et al. (2011)) e Tracker Video Analysis and Modeling Tool (<<http://physlets.org/tracker/>>), determinar a direção e velocidade de deslocamento dos traçadores com considerável precisão, além de possibilitar uma boa área de cobertura e baixo custo.

Um levantamento piloto utilizando a metodologia de acompanhamento aéreo de traçadores foi realizado em uma seção transversal do Reservatório do Passaúna, na Região Metropolitana de Curitiba (MILDEMBERGER et al., 2019). Após o processamento de vídeo, foi gerado gráfico de evolução da posição nas direções x e y ao longo do tempo determinando, assim, as componentes e a magnitude da velocidade resultante e comparadas as magnitudes com resultados obtidos com equipamento ADCP.

Entretanto, esta metodologia não se mostrou eficaz ao ser aplicada na zona de arrebenção, onde os traçadores sofreram forte influência da quebra das ondas, sendo transportados em direção à costa e não caracterizando de maneira eficaz as correntes litorâneas. Dessa forma, uma outra técnica lagrangiana capaz de solucionar a influência da quebra de ondas é o uso de boias de deriva superficial, maiores e com estruturas capazes de representar as correntes com boa precisão.

Outro método indireto para estimativa de correntes utilizando o referencial lagrangiano é o uso de corantes na água e acompanhamento da dispersão da pluma gerada, como

realizado por Brander e Short (2000) para avaliar a influência de correntes de retorno na modificação morfológica de uma praia. Clarke et al. (2007) também verificaram o efeito espacial e temporal da descarga de contaminantes em três praias da Califórnia.

Dentre os equipamentos que utilizam medida direta, o mais aplicado em estudos oceanográficos são os derivadores – ou boias de deriva superficial –, que são definidos por Lumpkin et al. (2017) como um corpo flutuante que aproximadamente segue as partículas de água na superfície ou subsuperfície, fornecendo dados sobre correntes ou outros parâmetros da água ao longo do tempo e do espaço.

O primeiro registro do uso de derivadores para analisar o comportamento de correntes remonta ao período da Grécia Antiga, com o filósofo Teofrasto lançando uma série de garrafas ao mar para testar sua hipótese de conexão entre o Oceano Atlântico e o Mar Mediterrâneo. Já no período do Renascimento, Leonardo da Vinci projetou um sistema de lastro e garrafas para medir o deslocamento ao longo do tempo em diferentes pontos e profundidades, determinando, assim, a vazão de um canal. Mas foi só a partir do final do século XIX que o uso de boias de deriva passou a ser amplamente difundido pelo órgão de pesquisa costeira dos EUA (*US Coast Survey*) para um melhor conhecimento da circulação oceânica (LUMPKIN et al., 2017).

Após a década de 1980, a aplicação de derivadores passou a ser utilizada em larga escala para o estudo de correntes oceânicas. Um dos estudos pioneiros utilizando boias de deriva equipadas com equipamentos de localização foi realizado na década de 80 pelo oceanógrafo americano Russ Davis, no contexto do projeto CODE - *Coastal Ocean Dynamics Experiment* (DAVIS, 1985). Após uma série de testes em tanques de onda e túnel de vento, Davis desenvolveu um modelo de derivador que serve, até os dias atuais, como inspiração para diversos outros pesquisadores.

Com o objetivo de verificar o deslocamento de correntes próximas à costa, Davis (1985) construiu um equipamento simples, com transmissão da posição via rádio, utilizando um tubo cilíndrico ao qual acoplou quatro paredes verticais feitas de lona com 50 cm de comprimento por 90 cm de altura e com materiais flutuantes em cada uma das extremidades das paredes (Figura 14). A função deste dispositivo, segundo o autor, é atuar como um efeito pára-quadras, aumentando a área do equipamento em contato com a corrente e diminuindo, por consequência, o efeito do vento em seu deslocamento.

Para verificar a capacidade do derivador representar a velocidade das correntes sem a influência do vento, o autor comparou as velocidades obtidas pelo equipamento com dados medidos simultaneamente por um correntômetro sob condições de vento variando entre 10 e 15 m/s, encontrando uma diferença de apenas 5% (3 cm/s) entre os dados medidos pela boia e pelo correntômetro, o que, segundo o autor, pode estar associado a erros de instrumentação - tanto imprecisão do posicionamento das boias quanto dos sensores do correntômetro, indicando uma baixa influência do vento no deslocamento dos derivadores.

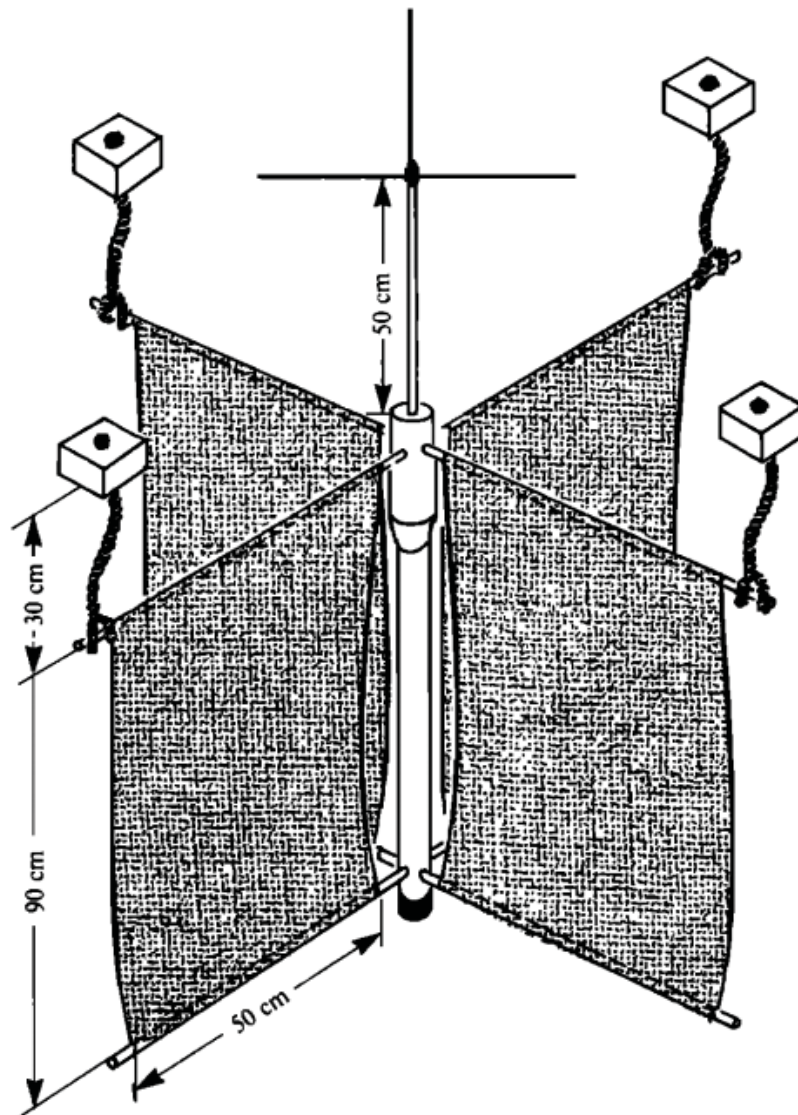


Figura 14 – Derivador desenvolvido por Davis (1985)
Fonte: Davis (1985)

Também com o objetivo de analisar o efeito destas placas laterais no deslocamento de derivadores, Poulain et al. (2009) efetuaram uma comparação entre resultados obtidos por equipamentos contendo este dispositivo e equipamentos sem as placas que visam aumentar a aderência às partículas de água. Utilizando dados adquiridos no projeto CODE no mar Mediterrâneo, os autores estabeleceram correlações entre as velocidades e direções verificadas nos derivadores e medidas por anemômetros.

De acordo com os autores, a correlação entre a velocidade dos derivadores equipados com as placas laterais e a velocidade do vento foi de aproximadamente 3% ($R^2 \approx 0,03$), e o ângulo gerado entre a direção do derivador e do vento variou entre 27° e 42°. Quando comparado os dados de derivadores sem o dispositivo, a correlação entre velocidades aumentou para 22% ($R^2 \approx 0,22$) e o ângulo formado entre a direção do derivador e do vento diminuiu, variando entre 17° e 20°. Com base nisto, foi possível verificar que a instalação de placas laterais possui capacidade significativa de reduzir o efeito do vento

na trajetória dos derivadores, fazendo com que a velocidade real da corrente seja melhor representada.

A partir dos anos 2000, com a remoção da Disponibilidade Seletiva (SA) dos sinais de GNSS, tornou-se possível que a precisão no posicionamento fosse reduzida da faixa da centena de metros para menos de 10 m em usos não militares. Esta melhora da qualidade abriu um leque de possibilidades para o uso do posicionamento por satélites em diversas áreas do conhecimento, o que permitiu a aplicação de derivadores equipados com sensores GNSS para estudos até mesmo de pequena escala, como rios, estuários e zona costeira (JOHNSON et al., 2003).

Os sensores GNSS são diferenciados de acordo com a forma que as coordenadas são obtidas. Um sensor diferencial demanda pelo menos dois receptores e permitem um pós-processamento dos dados ou correção em tempo real, permitindo uma precisão inferior a 1 m. Enquanto sensores absolutos (não-diferencial) obtêm o posicionamento apenas utilizando o código C/A da portadora L1 e não armazenam dados para pós-processamento, resultando em uma imprecisão de até 10 m na obtenção da coordenada (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1997; FIORIO, 2020).

Apesar das limitações dos sensores não-diferenciais, que podem ser atribuídas a erros do relógio do satélite, erro na posição conhecida dos satélites, efeitos atmosféricos na alteração da velocidade da luz e reflexão multicaminho dos sinais devido a obstáculos (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1997), o desvio em relação à posição real é relativamente constante e não gera problemas quando o objetivo do estudo não passa pela determinação exata de uma coordenada, mas sim o deslocamento ao longo do tempo, como na aquisição de velocidades (JOHNSON et al., 2003).

Esta hipótese foi comprovada por Witte e Wilson (2004), que avaliou a confiabilidade de um sensor GNSS não-diferencial, concluindo que a aquisição de velocidades utilizando estes equipamentos é consideravelmente precisa para representação das velocidades médias de deslocamento. Dessa forma, diversos estudos voltados para a zona costeira vêm sendo aplicados com o uso de derivadores portando sensores GNSS.

Nesse sentido, Johnson et al. (2003) desenvolveu uma boia de deriva utilizando tubo de PVC com diâmetro de 10 cm e altura de 32 cm para medir velocidade de correntes na zona de arrebenção, além de ser utilizada em lagos, monitoramento de dispersão de poluentes e propagação de frente de marés em estuários. O derivador foi equipado com um GPS de navegação Garmin GPS36 conectado a um *datalogger* com frequência de aquisição de dados de $0.1Hz$, podendo chegar à $1Hz$ de frequência de amostragem com redução da autonomia do equipamento. Para impedir que o derivador fosse transportado pelas ondas, os autores acoplaram uma espécie de paraquedas no fundo do derivador que, ao encontrar diferenças de velocidade entre camadas superficiais e inferiores da coluna d'água, abre-se aumentando significativamente o arrasto, mantendo o derivador estável.

Ao avaliar o desempenho do sensor não-diferencial utilizado, os autores realizaram

uma validação estática para analisar os erros absolutos do GNSS na aquisição do posicionamento horizontal, tendo encontrado um desvio padrão (STD) de 1.6 m no eixo das latitudes (máx. 5.2 m) e 1.3 m no eixo das longitudes (máx. 4.2 m).

Schmidt et al. (2003) seguindo a mesma ideia proposta por Johnson et al. (2003), também desenvolveram um derivador utilizando tubo de PVC com 10cm de diâmetro. A altura do derivador foi de 50cm, com a instalação de uma antena 70cm acima do topo da estrutura, para evitar a perda de sinal do GNSS diferencial e efetuar transmissão dos dados em tempo real para uma base na praia. Um disco de PVC com 35cm de diâmetro foi acoplado ao fundo do derivador para atuar como um amortecedor de movimentos verticais, fazendo com que a quebra de ondas não seja capaz de transportar o equipamento em direção à praia.

Sabet e Barani (2011) desenvolveram um derivador de baixo custo também utilizando aparelho de GPS de navegação Garmin (não-diferencial) armazenado no interior de um tubo plástico com 8,5cm de diâmetro e 27cm de altura. Inspirado em Schmidt et al. (2003), os autores também acoplaram um disco ao fundo do tubo com o objetivo de amortecer os movimentos verticais e reduzir influência da quebra de ondas no derivador (Figura 15). Os dados de latitude, longitude, data e hora foram armazenados na memória do GPS com uma frequência de 1Hz.

Em um teste cinemático, os autores colocaram dois equipamentos em um pequeno veículo autônomo se movendo a uma velocidade constante de 0.58 m/s durante cinco minutos. Apesar da variação da velocidade medida pelo GNSS oscilar entre 0.4 m/s e 0.75 m/s, atribuídas a ruídos de alta frequência, as velocidades médias calculadas pelos dois equipamentos durante o trajeto foram de 0.58 m/s e 0.59 m/s, com um desvio padrão de 0.07 m/s, corroborando com os resultados obtidos por (WITTE; WILSON, 2004) de que um GNSS não-diferencial é capaz de representar velocidades médias com ótima precisão.

Nasello e Armenio (2016) desenvolveram um protótipo de derivador com formato tronco-cônico, variando o diâmetro de 30cm na parte superior a 20cm na parte inferior. Além do formato do corpo, a principal diferença deste derivador em relação aos apresentados anteriormente é a presença de abas fixadas na lateral do equipamento, semelhantes às utilizadas por Davis (1985) e que, segundo o autor, permite que a velocidade de deslocamento do derivador seja muito semelhante à velocidade da corrente local, visto que estas peças aumentam a área de contato do derivador com a corrente, aderindo as partículas d'água no derivador e reduzindo a influência do vento no transporte.

Também inspirados no derivador de Russ Davis, Novelli et al. (2017), desejando acompanhar a trajetória da água em escala oceânica, desenvolveram um equipamento confeccionado em impressora 3D e em material plástico capaz de ser 85% degradado por bactérias em até 5 anos. O corpo do derivador foi construído em formato de toróide com interior oco para permitir a flutuabilidade com 50 cm de diâmetro. No topo do toróide foi instalado um compartimento para GPS e na parte de baixo foi acoplado um sistema de



Figura 15 – Derivador desenvolvido por (SABET; BARANI, 2011) com destaque para o disco de amortecimento de movimentos verticais
 Fonte: Adaptado de Sabet e Barani (2011)

quatro abas laterais, na mesma configuração feita por Davis (1985).

Kumar et al. (2020) desenvolveram um derivador portando GNSS diferencial Emlid de alta frequência (5-10 Hz) com pós-processamento cinemático dos dados (PPK). Os autores indicaram, após teste estático, um erro de posicionamento vertical na ordem de 1 cm e precisão da velocidade de 2 cm/s (máx. 0.4 cm/s), o que torna o equipamento capaz de representar não apenas a velocidade média de correntes, mas também variações de alta frequência na zona de arrebentação.

3.4 Modelagem Numérica

3.4.1 Modelagem de Ondas

Modelos numéricos que simulam processos físicos representam esses processos pela aplicação de uma série de equações e relações matemáticas que se aproximam das leis fundamentais da física. O nível de aproximação é determinado, basicamente, por dois fatores: o conhecimento dos processos físicos a serem modelados; e limitações computacionais (KOMEN et al., 1994).

O principal fator limitante na aplicação de um determinado modelo numérico é o custo computacional para solução das simulações. Em modelos de ondas, o tempo de computação é diretamente relacionado aos métodos numéricos adotados para o cálculo da propagação das ondas ao longo do espaço. Geralmente, modelos adotam esquemas explícitos, em diferenças finitas, que são métodos simples, robustos e rápidos para águas oceânicas. Em águas costeiras, entretanto, esquemas implícitos demandam um passo de tempo (Δ_t) muito pequeno devido à condição de Courant de estabilidade numérica, que implica que a energia da onda não pode se propagar por mais de uma célula de grade durante um passo de tempo ($\Delta_t < \Delta_{x,y}/c_{gx,y}$) (HOLTHUIJSEN, 2007).

Tomando como exemplo uma onda se propagando em uma praia simulada por grade numérica com resolução espacial de 10 metros e profundidade de 5 metros, o valor máximo do passo de tempo necessário para atender as condições de estabilidade pelo método explícito seria de 1,4 segundos, o que torna inviável a simulação em um tempo computacional aceitável.

Exemplo desse tipo de modelagem são os modelos de fase (*phase resolving*) que resolvem a equação do movimento para computar de forma explícita a elevação da superfície da água para cada onda. Para representar o comprimento de onda, esses modelos exigem alta resolução espacial, tornando inviável sua aplicação em grandes áreas (YOUNG, 1999).

Para possibilitar a simulação de ondas em águas rasas, que demandam alta resolução espacial, é comum a aplicação de modelos espectrais (*phase averaging*), que utilizam a equação do balanço de energia espectral para representar a elevação da superfície do mar devido às ondas nos termos da densidade de energia espectral. Nesse modelo, a densidade de ação (ou energia) é propagada segundo a teoria linear de ondas, com energia sendo adicionada ou removida por termos fonte: quebra, atrito de fundo, crescimento pelo vento, interações onda-onda, etc. (HOLTHUIJSEN, 2007; FOLLEY, 2016).

A história dos modelos espectrais para propagação de ondas remonta à década de 50. O primeiro modelo aplicado para resolução da equação do balanço de energia das ondas através do método espectral foi desenvolvido por Pierson et al. (1955). Phillips (1957) estabeleceu relação para a geração das ondas pelo vento através do sistema de ressonância, com consequente contribuição de Miles (1957), que adicionou a teoria do cisalhamento na interação entre ondas e vento. Durante as últimas décadas, os modelos espectrais passaram por diversas modificações, sendo classificados entre modelos de primeira, segunda ou terceira geração conforme a complexidade das parametrizações de interação e dissipação considerada (KOMEN et al., 1994; HOLTHUIJSEN, 2007).

Modelos espectrais classificados como 1ª geração não consideram as interações quádruplas onda-onda. Hasselmann et al. (1985) desenvolveram modelo com parametrização das interações não lineares, originando os modelos de 2ª geração. Esses modelos, entretanto, não eram capazes de prever condições extremas, demandando uma sofisticação das parametrizações para uma melhor representação das ondas.

Nesse contexto, ainda no final da década de 80 foi desenvolvido o modelo de 3ª geração WAM (*Wave Model*) pelo WANDI Group (HASSELMANN et al., 1988). Esse modelo considera a dedução do espectro de ondas pela integração do balanço de energia espectral. Na mesma época, também foi desenvolvido o modelo Wave Watch III (WW3) (TOLMAN, 1991), amplamente utilizado na simulação de ondas em escala global. A principal vantagem desses modelos é a possibilidade de representação de eventos extremos, sem as limitações de modelos de 1ª e 3ª geração (KOMEN et al., 1994).

Até meados dos anos 90, os modelos de 3ª geração disponíveis focavam apenas na simulação de ondas em águas profundas. Dessa forma, Booij et al. (1996), com aprimoração de Booij et al. (1999), desenvolveram o SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), um modelo computacional de terceira geração, gratuito, de código aberto voltado para simulações em águas rasas, considerando os efeitos de quebra induzida pela redução da profundidade, atrito com o fundo e interações triplas no processo de dissipação da energia do espectro de ondas.

Na sequência, apresenta-se as equações governantes utilizadas pelo SWAN, conforme descrito por Booij et al. (1999) e Holthuijsen (2007). A evolução do espectro de ondas é calculada pelo modelo através da aplicação da equação do balanço de ação espectral que, para coordenadas cartesianas, é representada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial y} \\ + \frac{\partial c_{g,\theta} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{g,\sigma} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta, x, y, t)}{\sigma} \end{aligned} \quad (3.20)$$

No lado esquerdo da equação, o primeiro termo representa a taxa de variação local da densidade de ação (ou energia) no tempo; o segundo e terceiro termos indicam a propagação de ação (ou energia) no espaço geográfico, com velocidade $c_{g,x}$ e $c_{g,y}$ no espaço $x - y$, respectivamente, considerando o efeito de empolamento; o quarto termo calcula os efeitos de refração induzidos pela profundidade e por correntes (velocidade de propagação c_θ no espaço θ); o quinto termo determina as variações na frequência relativa devido a variações na profundidade e correntes, com velocidade de propagação c_σ no espaço σ . A expressão do lado direito da equação representa o termo fonte ou sumidouro em termos de densidade de energia, representando os efeitos da geração, interações não-lineares e dissipação das ondas. A Tabela 1 apresenta os principais métodos utilizados pelo SWAN na simulação desses efeitos.

A transferência de energia do vento para a superfície não-perturbada do oceano é descrita no SWAN através do mecanismo de ressonância proposto por Phillips (1957) e o mecanismo de alimentação de Miles (1957). A influência do vento no termo fonte da equação do balanço de ação é determinada pela soma dos efeitos de crescimento linear e exponencial, conforme a relação abaixo (BOOIJ et al., 1999).

Tabela 1 – Métodos utilizados pelo SWAN para determinação dos termos fonte da equação do balanço de ação espectral

Efeito	Método de Referência
Crescimento linear pelo vento	Cavaleri e Rizzoli (1981)
Crescimento exponencial pelo vento	Komen et al. (1984); Janssen (1991)
<i>Whitecapping</i>	Komen et al. (1984); Janssen (1991); Komen et al. (1994)
Interações onda-onda quádruplas	Hasselmann et al. (1985)
Atrito de fundo	Hasselmann et al. (1973); Collins (1972); Madsen et al. (1989)
Quebra induzida pela profundidade	Battjes e Janssen (1978)
Interações onda-onda triplas	Eldeberky (1997)

Fonte: Booij et al. (1999)

$$S_w(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (3.21)$$

Sendo A e B coeficientes que dependem da frequência e direção da onda e intensidade e direção do vento. O coeficiente A é determinado pelo método do crescimento linear desenvolvido por Cavaleri e Rizzoli (1981), enquanto o crescimento exponencial (Coeficiente B) é calculado por duas expressões no SWAN, cabendo ao usuário determinar o método que melhor se adapta ao estudo desejado: *i*) proposta por Komen et al. (1984), que determina a velocidade de atrito do vento (u^*) através de uma relação com a intensidade do vento medida a 10 metros de altura (U_{10}); e *ii*) definida por Janssen (1991), que considera a interação entre o vento e as ondas através da análise dos efeitos da camada limite atmosférica e rugosidade da superfície do mar (BOOIJ et al., 1999).

A dissipação da energia das ondas é considerada no SWAN pela soma de três fatores: *whitecapping*, atrito com o fundo e quebra pela interação da onda com o leito.

O efeito de *whitecapping* – quebra em água profunda induzida pela inclinação da onda, quando a altura se torna maior que o comprimento – é expresso no SWAN como um pulso de pressão agindo na superfície do mar (HOLTHUIJSEN, 2007), conforme a expressão abaixo:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \sigma' \frac{k}{k'} E(\sigma, \theta) \quad (3.22)$$

Onde: Γ = coeficiente relacionado à inclinação da onda;

k = número da onda (m^{-1});

σ', k' = frequência e número de onda médios.

O valor a ser adotado para Γ depende da formulação escolhida para interação entre vento e superfície do mar. Se o método para geração de ondas pelo vento aplicado for o

proposto por Komen et al. (1984), o valor a se utilizar é o proposto também por Komen et al. (1994). Se o coeficiente B da equação 3.21 for determinado de acordo com Janssen (1991), o efeito de *whitcapping* deve seguir o método gerado pelo mesmo autor no mesmo trabalho.

Em regiões costeiras, a principal influência do leito arenoso na dissipação de energia das ondas é o atrito de fundo, que pode ser representado pela seguinte expressão:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (3.23)$$

Onde: C_{bottom} = coeficiente de atrito de fundo (m^2/s^3);

σ = frequência da onda;

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

k = número de onda (m^{-1});

d = profundidade (m).

O valor de C_{bottom} adotado pelo SWAN varia de acordo com três métodos. O proposto por Hasselmann et al. (1973) foi formulado empiricamente, definindo valores constantes de acordo com o tipo de onda ($0,038m^2/s^3$ para ondas de *swell* e $0,067m^2/s^3$ para ondas em condições de vagas). Collins (1972) propôs o cálculo de coeficiente de atrito do fundo através da relação entre um coeficiente de arrasto e a velocidade orbital da onda sobre o fundo. Já Madsen et al. (1989) determinaram valor do coeficiente de atrito de fundo através da análise da viscosidade turbulenta (BOOIJ et al., 1999).

A quebra de ondas devido à redução da profundidade é um processo pouco entendido e modelado. Entretanto, a dissipação total da energia devido à quebra das ondas pode ser modelada seguindo a formulação proposta por Battjes e Janssen (1978) e convertida para termos de energia espectral por Eldeberky (1995). A taxa média de dissipação de energia por unidade horizontal de área devido à quebra de onda é expressa pela seguinte relação (BOOIJ et al., 1999):

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) H_m^2 \quad (3.24)$$

No SWAN, o valor de α_{BJ} é igual a 1, e Q_b é a fração de ondas se quebrando, determinada por:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (3.25)$$

Sendo H_m a altura máxima possível para uma onda se propagando a uma determinada profundidade ($H_m = \gamma d$), sendo γ um parâmetro de quebra considerado constante no SWAN ($\gamma = 0,73$); e $\bar{\sigma}$ a frequência média.

A dissipação de energia para um componente espectral por unidade de tempo, segundo Eldeberky (1995), é calculada pela seguinte relação:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = \frac{-S_{ds,br,tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (3.26)$$

Onde: E_{tot} = energia total da onda;

$S_{ds,br,tot}$ = taxa de dissipação da E_{tot} devido à quebra induzida pela profundidade de acordo com Battjes e Janssen (1978).

O valor de $S_{ds,br,tot}$ depende do parâmetro de quebra (γ), definido como $\gamma = H_m/d$, sendo H_{max} a máxima altura de onda individual na seção com profundidade d (BOOIJ et al., 1999).

Interações quádruplas onda-onda são importantes em águas profundas, sendo responsável por transferir a energia do pico do espectro para regiões de baixa e alta frequências. Esse processo não é possível de computar de forma completa devido ao alto custo computacional exigido. No SWAN as interações quádruplas são calculadas através de uma aproximação de interação discreta desenvolvida por Hasselmann et al. (1985), que é eficaz na descrição dos fatores essenciais no desenvolvimento do espectro de ondas (KOMEN et al., 1994; BOOIJ et al., 1999).

Em águas rasas, dominam as interações triplas onda-onda. A transformação dessas interações em termos de energia espectral foi feita primeiramente por Eldeberky (1995), através da transformação da amplitude em um modelo de Boussinesq em uma formulação de densidade de energia, com parametrização da bifase de ondas baseado em observações de laboratório. Com base neste trabalho, Eldeberky (1997) derivou uma aproximação definida como *lumped triad approximation* (LTA), a qual é adotada pelo SWAN (BOOIJ et al., 1999; HOLTHUIJSEN, 2007).

3.4.2 Modelagem Hidrodinâmica

Atualmente, uma considerável quantidade de sistemas de modelagem hidrodinâmica encontra-se disponível. Dentre os mais utilizados, destaca-se o MIKE3 (MIKE... , 2012) e o Deflt3D (DELFT3D-FLOW... , 2014), desenvolvidos com uma discretização especial baseado em diferenças finitas; e o Telemac-3D (VILLARET et al., 2013), que utiliza discretização por elementos finitos. Os três sistemas são compostos de módulos que simulam processos hidrodinâmicos tridimensionalmente, transporte de sedimentos e qualidade da água, podendo serem aplicados em estudos de simulações em ambientes estuarinos, costeiros e oceânicos, além de rios, lagos e reservatórios.

Outro sistema de modelagem amplamente utilizado é o MOHID *Water*, desenvolvido pelo grupo Maretec, instituto de pesquisa vinculado ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. O MOHID *Water* consiste no módulo para simulações de processos

hidrodinâmicos do sistema MOHID, que ainda conta com módulos para representação de processos hidrológicos (MOHID *Land*) e simulação de vazão em rios (MOHID *River*).

A primeira versão do MOHID *Water* surgiu com o desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico bidimensional, semi-implícito baseado no método de diferenças finitas por Neves (1985). A primeira modificação no código do modelo foi implementada por Silva (1991), que introduziu o conceito de pressão não-hidrostática e uma condição de fronteira radiativa para as elevações, tornando possível a simulação dos efeitos de ondas de vento. Monteiro (1995) desenvolveu método lagrangiano para simulação da dispersão de rejeitos em emissários estuarinos, enquanto Portela (1996), também aprimorando o módulo de transporte do modelo, utilizou modelo euleriano para simulação de ciclos biogeoquímicos em estuários.

Até então, o principal fator limitante do MOHID era a ausência de simulações 3D. Nesse contexto, Santos (1995) implementou mais uma dimensão no modelo 2D além de efeitos dos gradientes de densidade nos gradientes de pressão, e a possibilidade de utilização de uma coordenada vertical dupla-sigma. Martins (2000) contribuiu no sentido de permitir o uso de uma coordenada vertical genérica, discretizando as equações em volumes finitos.

Assim, atualmente o MOHID conta com um sistema de modelagem hidrodinâmica 3D em linguagem FORTRAN 95 através da abordagem de programação orientada a objetos, capaz de representar corpos d'água como rios, reservatórios, estuários, áreas costeiras e oceânica e as interações desses corpos com a atmosfera e o leito (LEITAO, 2002).

A simulação hidrodinâmica é calculada pelo MOHID *Water* pela aplicação das equações de Navier-Stokes em coordenadas cartesianas, considerando escoamento incompressível, equilíbrio hidrostático e aproximações de Boussinesq e Reynolds (MARTINS, 2000). As equações de conservação de massa e quantidade de movimento consideradas pelo modelo são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = -f u_2 - g \frac{\rho_n}{\rho_0} \frac{\partial n}{\partial x_1} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_1} - \frac{g}{r h o_0} \frac{\int_s^n \partial \rho'}{\partial x_1} \partial x_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_j \frac{\partial u_1}{\partial x_j} \right) \quad (3.28)$$

Onde u_i = componente do vetor velocidade na direção x_i ;

n = elevação da superfície livre;

f = parâmetro de Coriolis;

A = coeficiente de viscosidade turbulenta;

p_s = pressão atmosférica;

ρ = densidade da água.

Uma das grandes vantagens no uso do *MOHID Water* é a possibilidade do uso de grades aninhadas - ou modelos encaixados -, que possibilita a conexão entre múltiplas grades numéricas com diferentes resoluções e áreas de cobertura. Braunschweig et al. (2003) implementaram o *MOHID Water* com a metodologia de grades aninhadas para o Estuário do Tejo, em Portugal, definindo três níveis de modelagem: um nível com resolução mais grosseira, cobrindo quase toda a costa ocidental portuguesa e que serve como condições de contorno para os modelos do segundo nível. Estes modelos, por sua vez, possuem resolução mais refinada, cobrindo somente o Estuário do Tejo, sendo um modelo para simular os processos de transporte ecológicos e outro para servir como condição de contorno para os modelos do nível três, que possuem diversas grades com alto grau de refinamento em áreas de interesse de emissário submarino e descarga de afluentes.

Franz et al. (2016) implementaram um sistema de modelagem hidrodinâmica utilizando grades aninhadas no litoral brasileiro. Utilizando cinco níveis de grade, a resolução espacial variou de 12 km, para o domínio abrangendo toda a costa sul-sudeste brasileira, para 120 m, na grade que representa a área do Complexo Estuarino de Paranaguá. Os autores destacam que a principal vantagem da modelagem através desta técnica é a possibilidade em reproduzir efeitos gerados em alto mar e que influenciam as correntes e elevação do mar em ambiente costeiro, como, por exemplo, maré meteorológica e ressurgência costeira.

Mais estudos realizados utilizando o sistema de modelagem *MOHID* podem ser acessados na biblioteca digital mantida pelos desenvolvedores do modelo (<http://wiki.mohid.com/index.php?title=Mohid_Bibliography>).

3.4.3 Acoplamento de Modelos

Como já mencionado anteriormente, o comportamento das ondas tem influência direta na hidrodinâmica encontrada na região praial. Ainda, a oscilação das marés atua na modificação da profundidade na zona de arrebentação e, conseqüentemente, do regime de quebra de ondas. Essa interação entre ondas, marés e correntes é a principal responsável pela modificação da morfologia praial em diferentes escalas de tempo (dias, semanas, meses ou anos) e essa variação morfológica, por sua vez, possui efeito na alteração dos padrões de ondas e correntes.

Dessa forma, ao utilizar modelos numéricos que busquem caracterizar os processos ocorridos na região litorânea, é de grande importância considerar o máximo de efeitos possíveis para uma melhor simulação. Nesse sentido, uma opção que vem sendo amplamente utilizada na modelagem de sistemas costeiros é o uso de modelos acoplados, onde diferentes modelos ou módulos trocam informações entre si para a construção de cenários mais realistas.

De modo geral, modelos que calculam a propagação de ondas podem gerar condições a serem utilizadas por modelos hidrodinâmicos, que utilizam o estresse gerado pela

propagação e quebra de ondas em correntes, sendo capaz de, em condições de resolução espacial adequada, calcular as correntes resultantes do processo de quebra das ondas na zona de arrebentação. Ainda, o atrito gerado por essas correntes pode servir para alimentar modelos morfológicos para simulação de transporte de sedimentos, enquanto a evolução topo-batimétrica gerada pelo transporte de sedimentos pode fornecer uma batimetria mais realista para os modelos de ondas e correntes.

Dentre os modelos aplicados utilizando o conceito de acoplamento, Kobayashi (2016) cita o sistema desenvolvido pelo grupo *The Nearshore Community* (NearCom), implementado utilizando o modelo espectral SWAN para obtenção de parâmetros gerados por ondas, acoplado ao modelo hidrodinâmico SHORECIRC (*nearSHORE CIRCulation model*, Svendsen et al. (2002)). As condições hidrodinâmicas geradas pelos modelos acoplados são fornecidas ao modelo CSHORE (KOBAYASHI et al., 2009), que aplica fórmulas de transporte de sedimentos tanto longitudinal quanto transversalmente à praia. O modelo foi validado pelos autores simulando a migração de uma barra submersa, apresentando capacidade na reprodução das variações morfológicas durante eventos de tempestade e em regime de ondas amenas.

Warner et al. (2010), com o objetivo de implementar um sistema para modelagem acoplada de processos oceânicos e costeiros, atmosféricos, propagação de ondas e transporte de sedimentos, desenvolveram o COAWST, um sistema de modelagem que integra simulações geradas por diferentes modelos que trocam informações entre si para uma modelagem mais completa do ambiente marinho. Os parâmetros hidrodinâmicos são simulados pelo modelo ROMS (*Regional Ocean Modeling System*), enquanto os processos de geração e propagação de ondas são simulados pelo SWAN. As condições atmosféricas que fornecem parâmetros na interface oceano-atmosfera para os modelos hidrodinâmico e de ondas são calculados pelo WRF (*Weather Research and Forecasting Model*), e o transporte de sedimentos é simulado pelo modelo CSTMS (*Community Sediment Transport Modeling System*).

Jones et al. (2007) desenvolveram um sistema acoplado de modelos com objetivo de simular a dinâmica sedimentar em áreas costeiras. Os autores utilizaram o modelo espectral de ondas MIKE 21 SW juntamente ao módulo hidrodinâmico MIKE 21/3 Flow para simular a tensão exercida por ondas e correntes sobre o leito, utilizando esses dados para determinação do transporte de sedimentos pelo modelo STPQ3, módulo morfológico do modelo MIKE. Através de uma série de testes, os autores verificaram a confiabilidade do modelo na simulação do transporte de sedimentos em áreas costeiras em diferentes condições energéticas, além de testarem o grau de estabilidade do modelo de transporte de sedimentos quando aplicado coeficientes de aceleração morfológica. De acordo com os resultados obtidos, os autores indicam que a confiabilidade do coeficiente de aceleração se dá para valores inferiores a 25, enquanto processos morfológicos com aceleração superior a 25 vezes apresentaram estabilidade limitada em todas as condições simuladas.

Carmo (2005) realizou o acoplamento de modelo hidrodinâmico MOHID Water a um modelo de propagação de ondas (STWAVE) com o objetivo de fornecer condições hidrodinâmicas para simulação de transporte de sedimentos não-coesivos utilizando o módulo MOHID Sand. O autor realizou simulações de transporte de sedimentos em cenários hipotéticos, considerando o efeito de obras costeiras com diferentes configurações (estruturas paralelas e transversais à praia), identificando a evolução morfológica e batimétrica gerada por estas estruturas durante um longo período de tempo.

Delpey et al. (2014) implementou a formulação de tensões de radiação proposta por Longuet-Higgins (1970) para o MOHID, permitindo a computação de velocidades resultantes da interação entre ondas e correntes. Dessa forma, através dos parâmetros de ondas gerados por modelos espectrais, tornou-se possível analisar a formação de correntes longitudinais na região praial.

Franz et al. (2017a), utilizando a formulação desenvolvida por Delpey et al. (2014), integrou os resultados de modelo de ondas (SWAN), hidrodinâmico (MOHID *Water*) e morfológico (desenvolvido por Franz et al. (2017b)). De acordo com os autores, as forças induzidas pelas ondas são repassadas pelo SWAN para o MOHID *Water*, para estimativa das correntes geradas pela propagação de ondas. Ainda, os dados gerados pelo SWAN de altura, período, comprimento, direção e máxima velocidade orbital das ondas são também utilizados pelo MOHID para determinação da tensão de cisalhamento de fundo, que determinam o transporte de sedimentos pelo módulo morfológico. O MOHID *Water*, por outro lado, repassa ao SWAN os campos de nível d'água devido oscilação das marés e correntes, que afetam a posição da quebra das ondas. A modificação topo-batimétrica gerada pelo módulo morfológico são informadas ao MOHID *Water* e SWAN, uma vez que a batimetria afeta o padrão de correntes e de propagação de ondas.

Franz et al. (2017a) realizaram uma série de testes para verificar a confiabilidade na aplicação de modelos acoplados para a simulação de correntes e transporte de sedimentos em ambiente costeiro. Os autores foram capazes de simular as variações morfológicas de uma praia esquemática considerando diferentes tipos de obras de proteção costeira (paralela e perpendicular à costa). Ainda, aplicaram a metodologia para simulação do transporte de sedimentos em uma praia real, considerando desde regime de ondas calmas até situações extremas. Com esses testes, os autores concluem que o uso de modelos acoplados apresentou resultados satisfatórios para a simulação da dinâmica do transporte de sedimentos em ambiente praial, tanto na simulação de estruturas de proteção costeira quando na verificação do impacto de ondas extremas na costa.

Utilizando as técnicas desenvolvidas por Franz et al. (2017a), Moreira (2019) simulou o transporte de sedimentos na costa paranaense, utilizando modelo bidimensional e sem considerar a variação batimétrica ao longo do tempo de simulação que influenciam o comportamento da quebra das ondas. Ainda, o autor indica a presença de transporte de sedimentos na direção sudoeste, entretanto, devido ao pequeno período de simulação e

ausência de forçantes e simplificações utilizadas, sugere o aprimoramento do modelo para uma melhor caracterização dos processos morfológicos ocorridos na costa paranaense.

O presente trabalho utilizará o acoplamento entre o modelo de ondas SWAN e o modelo hidrodinâmico MOHID, na mesma abordagem utilizada por Franz et al. (2017a) e Moreira (2019), entretanto, sem considerar o fator de transporte de sedimentos e evolução morfológica. A Figura 16 apresenta o esquema de acoplamento dos modelos, com as informações trocadas entre os diferentes módulos. Considerando um instante inicial, o primeiro modelo a ser simulado é o SWAN, e os parâmetros de onda calculados são fornecidos ao MOHID que calcula, a partir do parâmetro de tensões de radiação, as correntes induzidas pela propagação das ondas. Os dados de elevação da superfície (maré) calculados pelo MOHID são então repassados para o SWAN, que utiliza este nível para atualizar as profundidades de cada célula no passo de tempo seguinte.

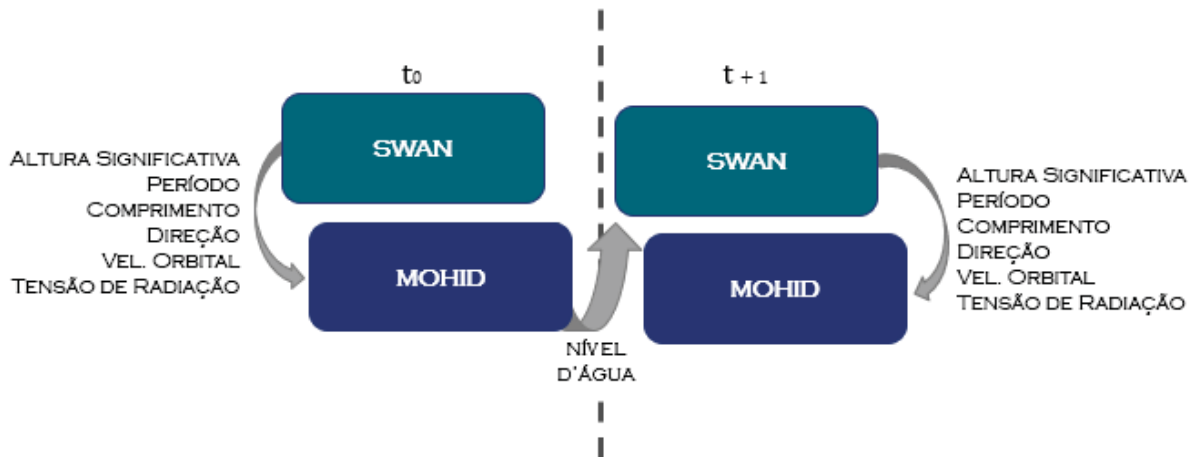


Figura 16 – Esquema de acoplamento de modelos

3.5 Caracterização do Litoral Paranaense

A plataforma continental sul brasileira (Figura 17) se estende, em média, 130 km mar adentro, com gradiente suave de declividade. A plataforma rasa – profundidade inferior a 15 m – tem comprimento médio de 11 km. O litoral paranaense é caracterizado pela pequena extensão linear – cerca de 130 km de linha de costa – com a presença de dois estuários que aportam água doce para a plataforma continental: a baía de Guaratuba, que possui uma única desembocadura, e o Complexo Estuarino de Paranaguá, com duas desembocaduras e dois eixos de orientação – eixo leste-oeste com 56 km de extensão e eixo norte-sul com 30 km de extensão (LAMOUR et al., 2004). No interior do CEP encontram-se instalados os portos de Paranaguá e Antonina, sendo o acesso a esses portos realizado através do canal navegável, que vem sendo submetido a sucessivas obras de dragagens ao longo das últimas décadas para aprofundamento e manutenção da profundidade (LAMOUR; SOARES, 2007).

O arco praial Pontal do Sul - Matinhos possui orientação nordeste-sudoeste, com aproximadamente 35 km de extensão, sendo caracterizado por praias intermediárias a dissipativas, com face praias larga e declividade entre 2° e 3°. Entretanto, essas características não são verificadas na área próxima à praia brava de Matinhos. Na década de 60, Bigarella et al. (1966) identificaram a predominância de areias finas e médias, com granulometria

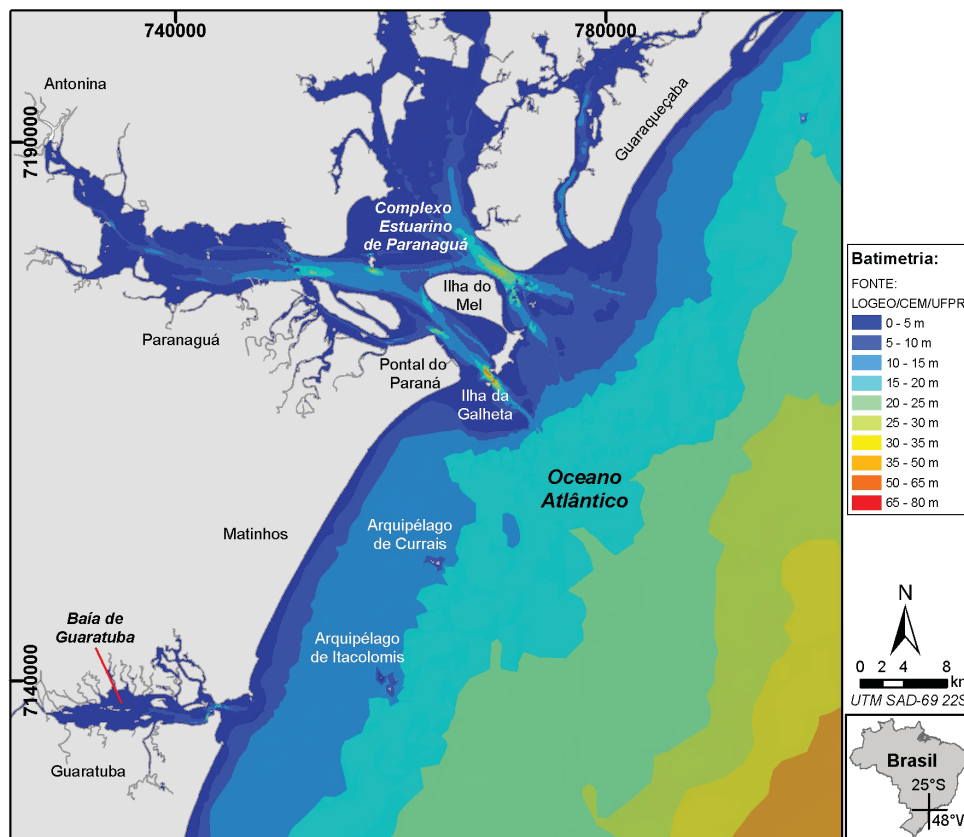


Figura 17 – Mapa geral do litoral paranaense com batimetria da Plataforma Continental e Zona Costeira

e inclinação da praia aumentando de sul para norte. Já na década de 90, Basso (1997) verificou aumento do diâmetro médio, variando de areias médias para grossas, indicando a intensificação dos processos erosivos na praia.

Novak (2017) efetuou mapeamento da vulnerabilidade da zona costeira paranaense aos processos erosivos, identificando condição crítica de erosão nos Balneários Caiobá, Riviera e Flamingo, mesmos balneários onde o processo de urbanização na zona pós-praia foi mais intenso, e onde ocorrem obras de proteção costeira para preservação de calçadas e avenidas.

De acordo com Angulo e Andrade (1981), o motivo do aumento da erosão foi, em grande parte, pela construção inadequada da avenida Beira Mar, que suprimiu a vegetação de restinga e ocupou área onde haviam dunas, que serviam como amortecedores de ondas em eventos extremos, e como reserva de sedimentos. Para conter a erosão praiial, foram realizadas obras de contenção, com construção de esporões transversais à praia, o que ocasionou na escassez de sedimentos nas praias ao norte (ANGULO, 1992). Desde então, vários projetos vêm sendo sugeridos para o reestabelecimento do equilíbrio dinâmico nas praias de Matinhos, como a instalação de novas estruturas perpendiculares à costa e o engordamento da praia com sedimentos oriundos da dragagem do canal de acesso aos portos de Paranaguá e Antonina.

Com relação à hidrodinâmica do local, a costa paranaense foi classificada por Angulo (1993) e Marone et al. (1995) como dominada por ondas, com regime de micromaré (amplitude média de $1.5m$) e ventos predominantes dos quadrantes NE e SE, sendo os de SE de maior intensidade e resultantes da passagem de sistemas frontais durante os meses de inverno.

Somado às maiores alturas das ondas de tempestade, há também a amplificação das marés, no fenômeno denominado maré meteorológica, quando ocorre o empilhamento da água em direção à costa devido aos fortes ventos que sopram em alto mar. PORTOBRAS (1983) identificou, durante dois eventos de frentes frias, o aumento de 60 cm do nível do mar devido a passagem dos sistemas frontais, o que representa um acréscimo de 40% na amplitude das marés, de acordo com levantamentos realizados pelo mesmo estudo.

Marone e Camargo (1994), analisando um evento de ressaca ocorrido em agosto de 1993, identificaram um aumento anormal do nível do mar na região do Porto de Paranaguá que superou em $80cm$ o valor máximo da maré astronômica prevista, e que foi, segundo os autores, relacionado à atuação dos fortes ventos em alto mar que ocasionaram o empilhamento da água em direção à costa e conseqüente amplificação da onda de maré, sendo responsável por uma série de danos na costa, principalmente nas praias do município de Matinhos.

Sobre o padrão de ondas que chegam à costa paranaense, Bandeira (1974) foi o pioneiro no estudo. Durante campanha de medição com equipamento ondógrafo fundeado próximo à praia de Leste em uma profundidade de $10m$ entre os meses de abril de 1972

e março de 1973, com aquisição de dados por 12 minutos três vezes por dia, o autor estabeleceu 553 registros no período analisado. Após processamento dos dados, o autor definiu as ondas que se aproximam à costa como predominantemente de SE e com estado de vagas (apenas 6.6% de ondas de *swell*). Com relação às alturas verificadas, o valor de H_s variou entre 0.3m e 2.9m, com uma média de $H_s = 0.8m$, sendo as maiores alturas verificadas entre os meses de julho e dezembro.

Estudo realizado por PORTOBRAS (1983) identificou a existência de dois trens preferenciais de ondas, provenientes das direções ENE e SSE/SE, sendo as maiores ondas propagadas do quadrante SE. Ainda segundo este levantamento, as ondas vindas de ENE são geradas pela atuação dos ventos associados ao anticiclone tropical do Atlântico Sul, sendo ondas bastante regulares e de tamanho intermediário. Já as ondas propagadas da direção SSE/SE estão relacionadas à passagem de sistemas frontais, gerando as ondas de tempestade que geralmente causam eventos de ressaca, sendo as principais responsáveis pela erosão da costa.

Noernberg (2001), utilizando imagens de satélite Landsat, caracterizou ondas que se propagavam em direção à desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá após a passagem de um sistema frontal, ocorrido em setembro de 1999, em um ponto com profundidade de 20m. Segundo o autor, as ondas se propagavam na direção de 115° (proveniente de SE), tendo um período de 9.13s e velocidade de propagação estimada em 2.03m/s.

Martins (2002), durante oito campanhas de campo com 12 horas de duração, fundeou um ondógrafo na região do balneário Atami, logo após a linha de arrebentação das ondas. A autora encontrou as direções S e SE como preferenciais das ondas medidas, com altura máxima registrada de 1,48m (onda de SE), e período máximo de 7,3s (onda de S).

Nemes e Marone (2013) utilizando ondógrafos fundeados em dois pontos do litoral paranaense (18m e 30m de profundidade) por um período de 16 meses (jun/2009 a nov/2010), definiram as ondas que se aproximam da costa como predominantemente de SSE e SE (ocorrência > 50%), com ondas provenientes de S importantes durante o período do outono. Com relação à altura, foram classificadas como leves (66% de ocorrência com $H_s < 1.25m$ e 94% de $H_s < 2.0m$) e com predominância de ondas de vagas, geradas por ventos mais próximos à costa. As ondas de *swell* apresentaram maior importância durante o período de outono (43.17%), enquanto o verão foi o período com menor ocorrência dessas ondas (25.24%), onde prevaleceram as ondas de vagas.

Através da análise de cartas sinóticas obtidas para o período de fundeio, os autores verificaram que as ondas em estado de vagas foram influenciadas por ventos próximos à costa, com distância inferior a 1000km, enquanto as ondas com características de *swell* foram geradas por pistas de ventos distantes a mais de 1200km, possivelmente localizadas até 2500km do litoral paranaense e com intensidade de vento próxima a 100km/h.

Com o objetivo de monitorar as ondas que atingem a costa paranaense, esteve em funcionamento entre o período de janeiro de 2014 até junho de 2015 uma bóia oceanográfica instalada pelo projeto SiMCosta (Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira; <http://www.simcosta.furg.br>) em parceria com o Centro de Estudos do Mar da UFPR a cerca de 10 km da costa no município de Pontal do Paraná (-25.6630° , -48.3249°). Os dados brutos medidos pela bóia foram analisados e os principais parâmetros de onda são apresentados na Figura 18.

Assim como encontrado por outros autores, os dados da bóia indicam a predominância de ondas provenientes do quadrante S-E. Com relação às alturas, o valor médio de altura significativa (H_s) observado foi de $1.01m$, com uma altura máxima registrada de $2.26m$ durante o inverno de 2014. As ondas que chegam ao litoral podem ser definidas como predominantemente leves ($H_s < 1.25m$), de acordo com a classificação da Organização Meteorológica Mundial (WMO), com cerca de 88% das ondas registradas pela bóia tendo apresentado altura significativa inferior a $1.25m$.

O período (T) médio das ondas registrado foi de $6.6s$. Uma forma de avaliar o tipo de onda que se propaga é classificá-las entre ondas com períodos maior e menor que $8.0s$, valor que define se a onda foi gerada por efeitos locais (vagas) ou geradas em alto-mar e propagada por grandes distâncias até chegar à costa (*swell*). Assim, pode-se definir que as ondas medidas pela bóia foram predominantemente geradas por efeitos locais (87%), com apenas 13% das ondas apresentando $T > 8.0s$. Entretanto, apesar da baixa frequência,

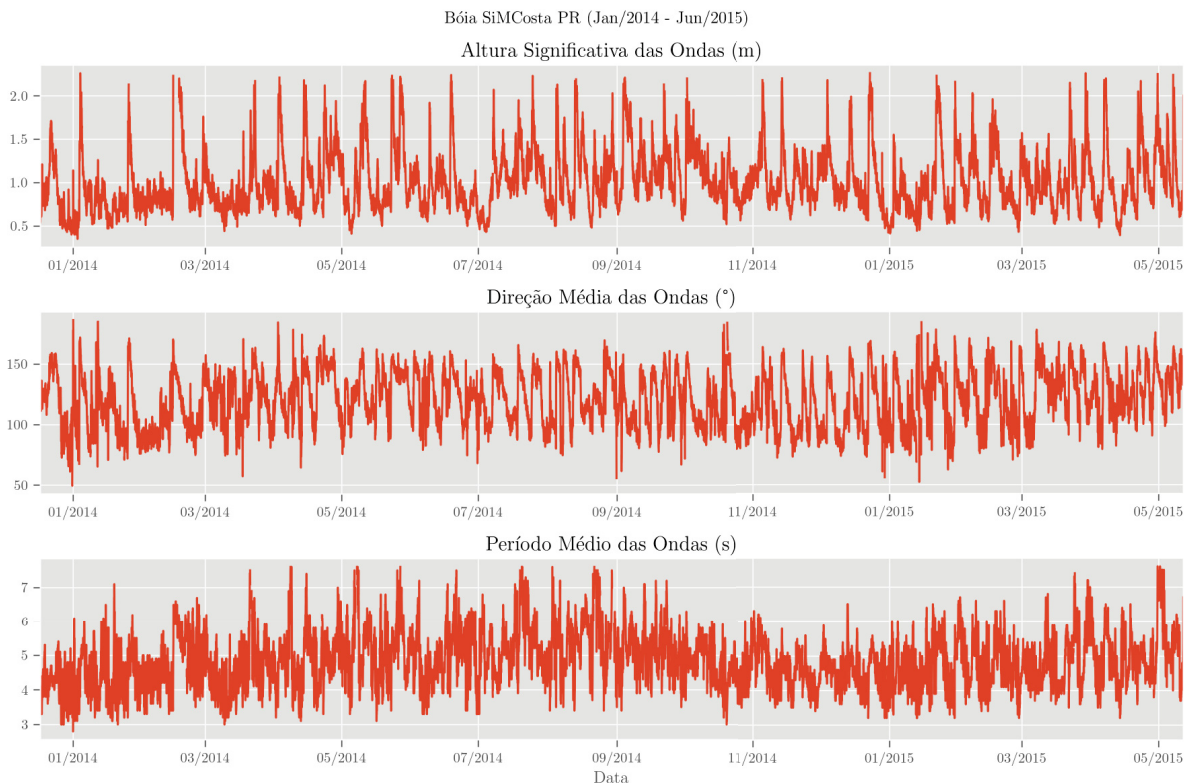


Figura 18 – Parâmetros de onda observados pela bóia SiMCosta PR entre os meses de Janeiro de 2014 e início de Junho de 2015

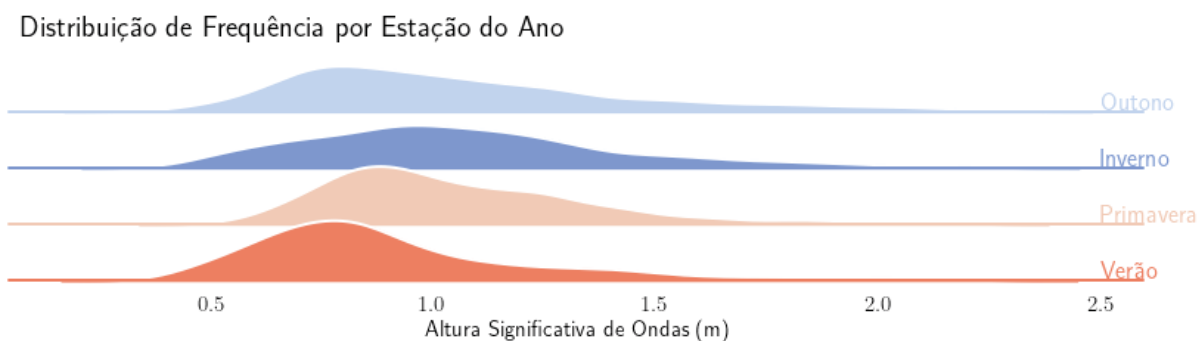


Figura 19 – Distribuição de frequência para altura significativa de ondas (H_s) observadas pela bóia SiMCosta PR de acordo com a estação do ano

ondas de *swell* possuem grande importância na circulação costeira, visto que a altura significativa média em ondas com estas condições apresentaram valor cerca de 20% superior às ondas com $T < 8.0s$.

Apesar dos valores médios não apresentarem diferenças consideráveis, ao se analisar a distribuição de frequências para os valores de H_s de acordo com a estação do ano (Figura 19) é possível verificar uma maior frequência de ondas mais altas durante os períodos de outono, inverno e primavera em relação ao verão. Isto fica mais claro ao se calcular a quantidade de ondas com H_s superior a 1.25 metro em cada estação - o que indica ondas moderadas segundo a *WMO* - onde verifica-se que durante o inverno 26% das ondas medidas pela bóia apresentaram $H_s > 1.25m$, enquanto no período de verão apenas 14% das ondas registradas indicaram ondas moderadas. Outono e primavera apresentaram 24% e 25% de ondas com altura significativa superior a 1.25 metro, respectivamente.

Esta variação na altura das ondas entre o verão e as demais estações parece estar diretamente relacionada com os efeitos de passagem de sistemas frontais pela região, predominando durante períodos de inverno as ondas geradas a uma considerável distância da costa (*swell*), enquanto no verão predominam as ondas geradas por efeitos locais (vagas). Isto é verificado quando comparadas as diferenças entre os valores de período (T) das ondas para cada uma das estações. Ao se analisar a frequência de ondas com período superior a 8 segundos, que indicam a predominância de ondas de *swell*, o período do inverno registrou aproximadamente 26% das ondas com $T > 8.0s$, enquanto no período de verão apenas 6% das ondas indicaram o mesmo comportamento.

Com relação às direções observadas durante o período de funcionamento da bóia SiMCosta PR, considerando todo o período analisado, foi identificada a predominância de ondas provenientes de ESE (29.98%) e SE (29.40%), porém com as maiores alturas de onda vindas da direção SSE ($\overline{H_s} = 1.35m$), provavelmente associadas à sistemas frontais. Quando analisadas as direções de acordo com a estação do ano, no período de outono (20a) predominaram ondas de SE (36.67%) e ESE (30.30%), comportamento semelhante ao verificado no inverno (20b; 33.56% de ESE e 31.41% de ondas de SE). Na primavera (20c) e no verão (20d), predominaram ondas de E (35.35% e 30.92%, respectivamente),

sendo a direção ESE a segunda mais frequente para as duas estações (30.83% na primavera e 27.45% durante o verão).

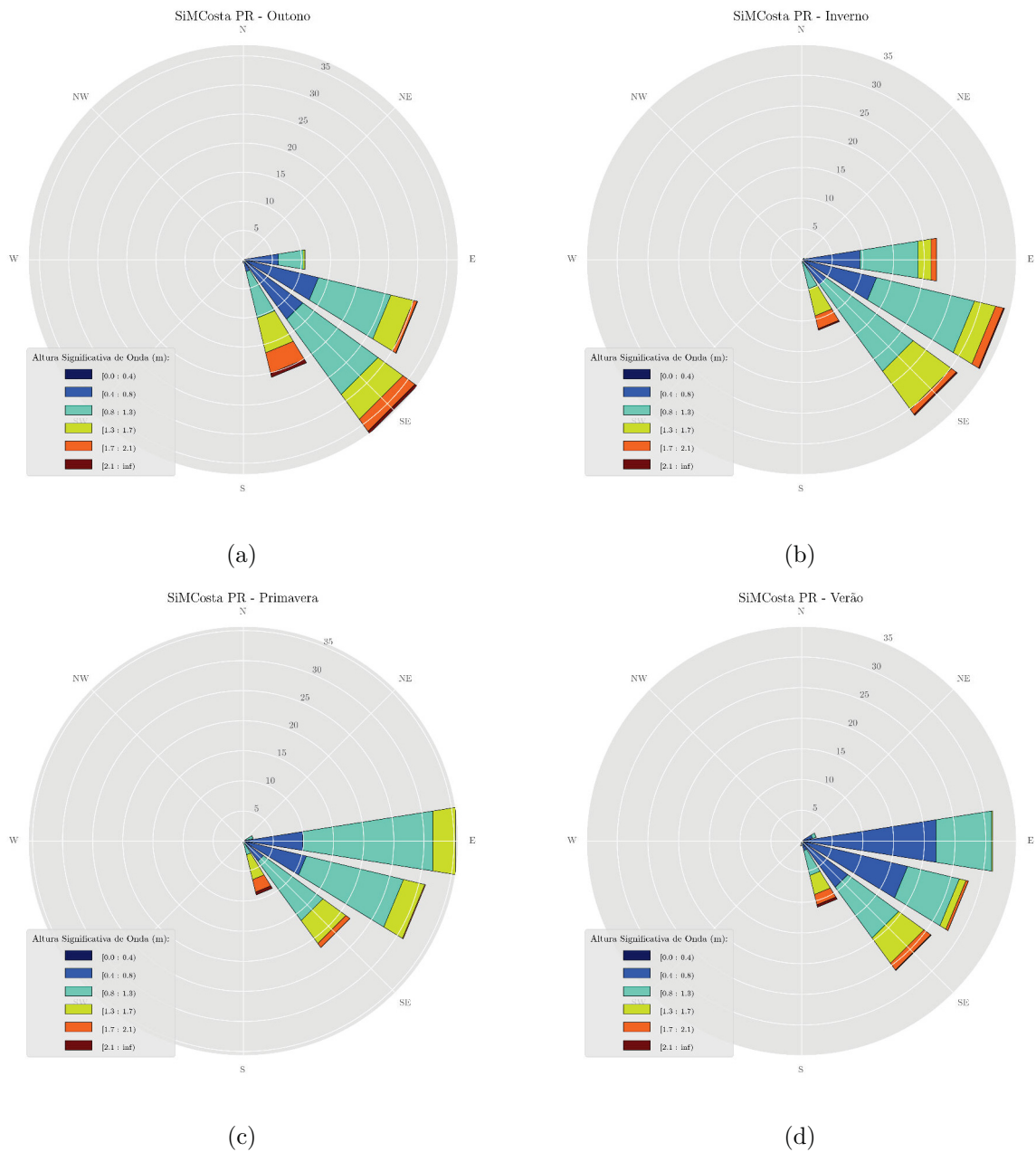


Figura 20 – Gráficos de Intensidade vs. Frequência de ondas observados pela bóia SiMCosta PR de acordo com a estação do ano

Devido ao predomínio das ondas propagadas da direção S-SE, a corrente de deriva litorânea na costa paranaense é orientada preferencialmente para o Norte (BIGARELLA et al., 1978). Este padrão também foi verificado por Angulo (1992), pela análise da orientação das desembocaduras e morfologia dos deltas de vazante dos estuários de Paranaguá e Guaratuba, e por Marone et al. (1995), através do lançamento de garrafas de deriva que se deslocaram predominantemente para a direção norte do litoral.

Gobbi (1997), através de modelagem de propagação de ondas, definiu o transporte residual de sedimentos na costa do Paraná como de sul para norte devido a atuação das

correntes de deriva litorânea, chegando a uma taxa de transporte residual de areia para norte na faixa de 50 a 100 mil m^3/ano .

Noernberg (2001) analisou dados de boias oceanográficas, decompondo dados de correntometria para obter apenas componentes na direção SW-NE, determinando, assim, a predominância do deslocamento de correntes paralelas à costa na direção Norte, com velocidade, em condições normais, inferiores a 25 cm/s, e em condições atípicas de ondas, superando a velocidade de 75 cm/s. De acordo com o autor, a capacidade dessas correntes movimentarem sedimentos de fundo está associada a ondas com elevada energia, relacionadas à passagem de sistemas frontais vindos do sul, o que torna o transporte de sedimentos ao longo da costa paranaense predominantemente para Norte.

Utilizando análises granulométricas e vetores de tendência de transporte sedimentar nas praias do município de Pontal do Paraná, Alves (2011) identificou transporte sedimentar em ambos sentidos do arco praiial, definindo duas zonas de convergência do transporte (balneários Pontal do Sul e Guarapari), podendo indicar áreas de acúmulo de sedimentos; enquanto nas regiões dos balneários Ipanema e Praia de Leste a autora identificou áreas de divergência do transporte, indicando possíveis áreas com tendências erosivas.

Moreira (2019), utilizando modelagem numérica de ondas e marés para simulação de transporte de sedimentos na região da praia central de Matinhos, encontrou, para o inverno de 2018 – descrito pelo autor como um período sem eventos com características extremas/destrutivas –, um padrão de circulação com correntes litorâneas e consequente transporte de sedimentos predominantemente para sudoeste (SW) no período analisado, indicando que, apesar da componente residual da deriva longitudinal apontar para norte, importantes processos podem ocorrer também para o sentido sul em determinados períodos.

4 METODOLOGIA

4.1 Desenvolvimento do Derivador

4.1.1 Primeira versão - sem telemetria

4.1.1.1 Estrutura Física

Baseado nos trabalhos já desenvolvidos no uso de derivadores de correntes, um protótipo de derivador foi desenvolvido utilizando um tubo de PVC, aplicado comercialmente em instalações de esgoto, com diâmetro de 10cm (100mm) e 40cm de altura. Seguindo a ideia proposta por Schmidt et al. (2003) e Sabet e Barani (2011), acoplou-se ao fundo do tubo um disco confeccionado em acrílico com 3mm de espessura e 30cm de diâmetro para agir como amortecedor de movimentos verticais, impedindo que a quebra das ondas transporte o derivador em direção à praia. Ainda, utilizando também acrílico com 3mm de espessura, foram instaladas quatro placas laterais inspirado nos trabalhos de Davis (1985), Nasello e Armenio (2016) e Novelli et al. (2017) para aumentar a aderência do corpo às correntes e reduzir o efeito do vento em seu deslocamento.

Após os primeiros testes, verificou-se que o tubo com 10cm de diâmetro exigiu quantidade significativa de lastro para manter-se estável na água, deixando o equipamento pesado e de difícil transporte. Dessa forma, um segundo protótipo foi desenvolvido com o objetivo de ser um equipamento mais compacto, de fácil transporte e que possa ser utilizado em ambientes ainda mais rasos. Para isto, foram utilizados tubo PVC com $7,5\text{cm}$ de diâmetro (75mm), com 30cm de altura e disco de amortecimento vertical de $22,5\text{cm}$. O esquema de montagem dos derivadores com as dimensões utilizadas é apresentado na Figura 21.

As peças de acrílico foram fixadas ao tubo de PVC utilizando cola de cianoacrilato de alta viscosidade, e o fundo do tubo foi selado com o uso de fita veda-rosca e aplicação de silicone acrílico nas partes externa e interna das conexões. Ainda, para melhor vedação, o fundo foi preenchido com uma camada de 5cm de espuma de poliuretano. Para tornar o objeto estável na água, um disco de chumbo moldado no formato do tubo com aproximadamente 500g foi fixado no fundo do tubo. A metade inferior dos tubos ainda foi preenchida com areia de praia, de modo a deslocar o centro de massa do objeto para baixo, melhorando a flutuabilidade do corpo.

Somando-se os componentes do corpo, lastro e aparelhos eletrônicos, o derivador com tubo de 100mm possui uma massa de $3,1\text{kg}$ e a segunda versão, com tubo de 75mm tem uma massa de $2,2\text{kg}$, o que resulta em uma densidade do objeto de cerca de $860\text{kg}/\text{m}^3$ para ambos, suficiente para flutuar na água. Ainda, o lastreamento do corpo até atingir esta massa total foi calculado com base no Princípio de Arquimedes de estabilidade de

corpos flutuantes, para que apenas uma pequena parte do tubo (≈ 8 cm) permaneça emersa para localização visual do derivador dentro d'água. Esta configuração indica que aproximadamente 86% do volume do derivador e 92% da área devam permanecer submersos, o que torna o objeto menos suscetível ao efeito do vento.

4.1.1.2 Componentes Eletrônicos

Com relação ao sistema eletrônico para registro da velocidade, optou-se pelo uso de sensores instalados em placas de Arduino, que apresentam um baixo custo aliado a uma maior qualidade dos dados quando comparados a aparelhos de GNSS de navegação comercial aplicados em trabalhos citados como inspiração para este projeto. O esquema eletrônico adotado é apresentado na Figura 22.

Para registrar as velocidades do derivador, foi utilizado um Arduino Nano (1), placa microcontroladora contendo 14 portas digitais e 8 portas analógicas, com capacidade de armazenamento (*flash memory*) de 32 kb e memória de processamento (SRAM) de 2 kb. Ao Arduino foi conectado um sensor GNSS modelo Ublox-6M (2) que possui precisão no posicionamento horizontal inferior a 2,5 m, podendo determinar o módulo e direção do deslocamento com erro inferior a $0,1\text{m/s}$ e $0,5^\circ$, respectivamente. O GNSS foi utilizado com a configuração de fábrica, que atualiza a posição com uma frequência de 1Hz (uma aquisição por segundo), podendo ser configurado para até 5Hz de acordo com as necessidades do usuário. Os dados de data, hora, latitude, longitude, velocidade, direção e quantidade de satélites obtidos a cada instante de medição foram armazenados em formato de arquivo de texto (ASCII) utilizando um módulo de cartão MicroSD (3) também conectado ao Arduino contendo um cartão com capacidade de armazenamento de

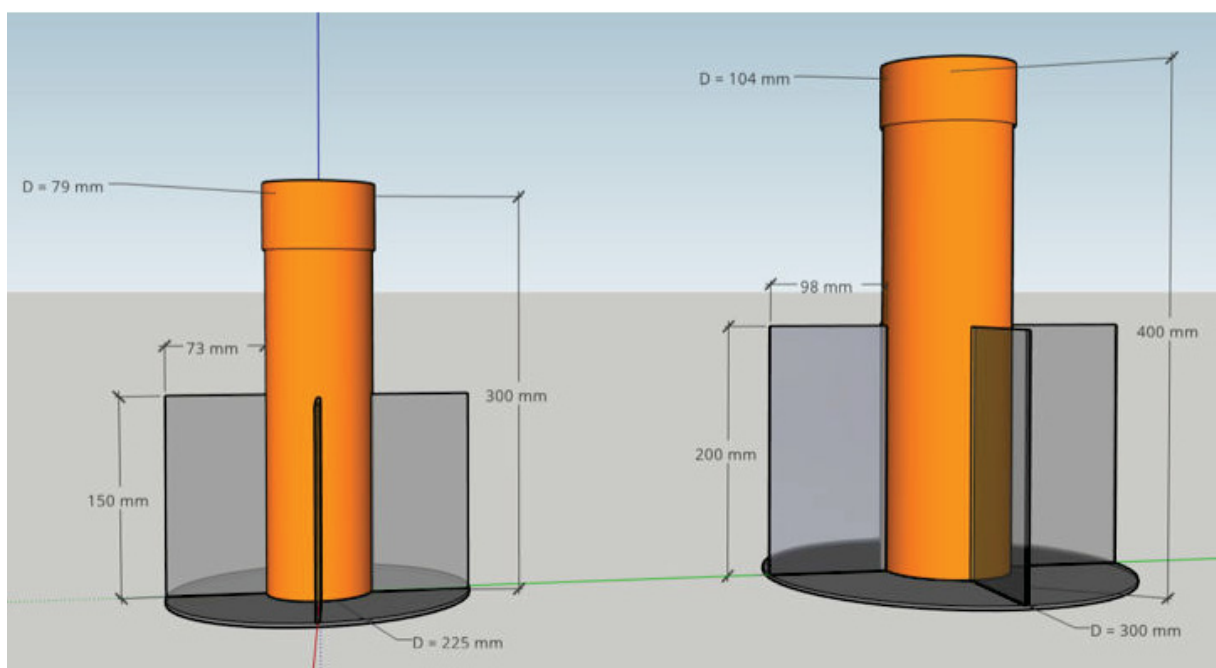


Figura 21 – Esquema de montagem dos derivadores de correntes longitudinais

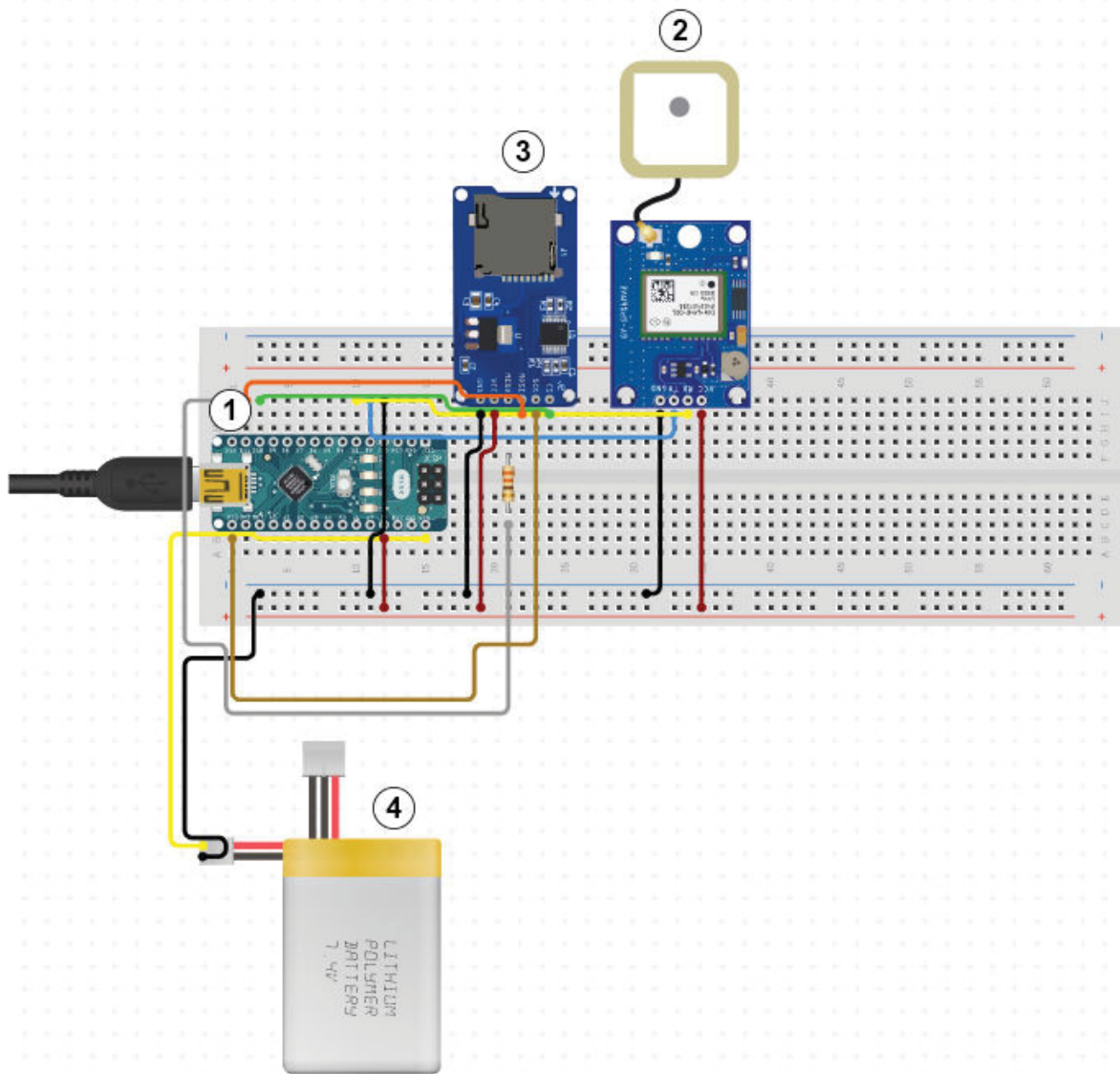


Figura 22 – Esquema de conexão dos componentes eletrônicos inseridos no derivador sem sistema de telemetria

4 Gb. A alimentação do Arduino e seus componentes eletrônicos foi efetuada através de uma bateria recarregável (4) com tensão de 9 V conectada a um regulador de tensão capaz de transformar a tensão da bateria para 5 V, valor máximo suportado pelo Arduino.

O sistema responsável pelo gerenciamento dos dados medidos pelo derivador foi construído em linguagem C++ utilizando bibliotecas para o sensor GNSS e módulo microSD disponíveis na comunidade arduino (código-fonte no Apêndice A). O código utiliza a programação orientada ao objeto para estabelecer a comunicação dos módulos com a placa controladora, convertendo os parâmetros GNSS medidos no padrão NMEA para variáveis que podem ser escritas em um padrão de arquivos ASCII separado por vírgulas (CSV), que permite uma fácil leitura dos arquivos de saída em diversos programas de análise de dados.

A Figura 23 mostra o corpo dos derivadores construídos (a), com destaque para

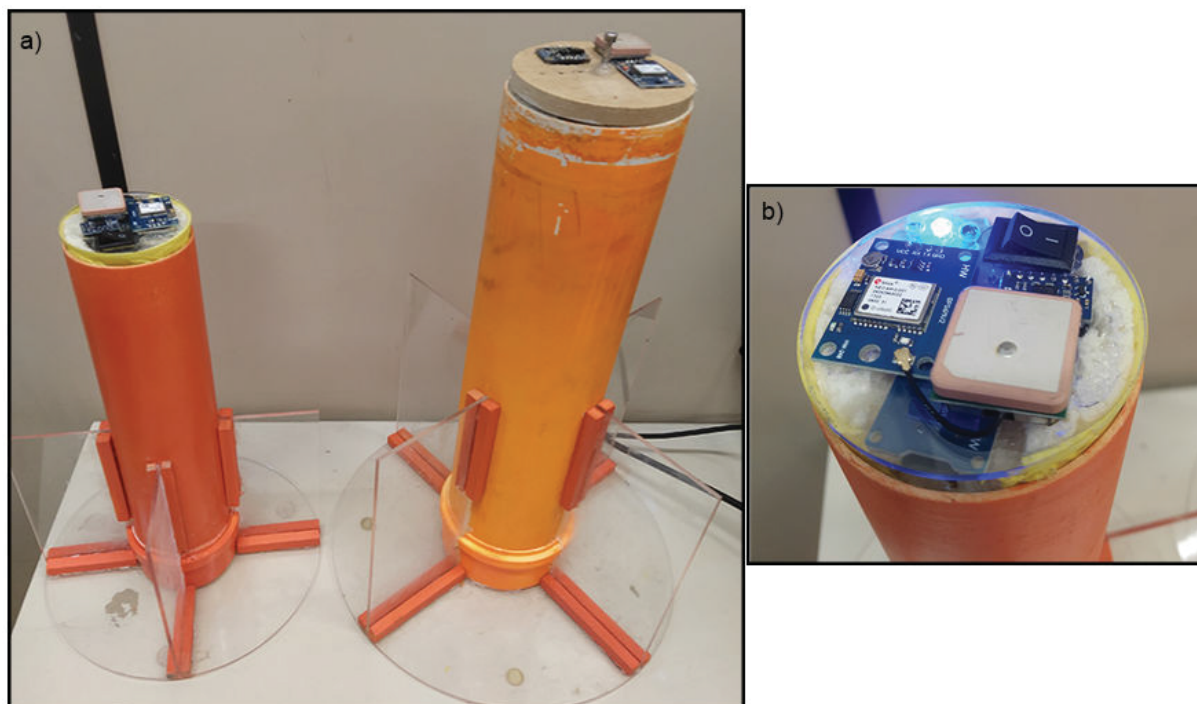


Figura 23 – Imagem do corpo externo dos derivadores com 75mm e 100mm de diâmetro (a) e estrutura para abrigo dos componentes eletrônicos (b)

a estrutura utilizada para armazenar os componentes eletrônicos no interior do tubo (b). A estrutura foi feita com espuma de poliuretano moldada no mesmo diâmetro do tubo e presa a um disco de acrílico onde foram fixados na parte superior o sensor GNSS, a chave liga-desliga e os leds de status de funcionamento do equipamento, enquanto o módulo microSD, a placa controladora e a bateria ficam fixas na parte inferior. Esta alocação permite que todos os componentes permaneçam imóveis dentro do tubo, evitando problemas de mal contato e desconexão de cabos. O fechamento dos equipamentos é feito com tampas próprias para tubos de esgoto e que contam com um anel de vedação que impede a entrada da água, mas permitindo uma fácil abertura do derivador em campo para ativação e desativação dos sensores.

4.1.1.3 Precificação

Seguindo uma lógica de equipamento de baixo custo, a Tabela 2 detalha os custos para a construção de um derivador com as configurações descritas nesta seção. A cotação foi feita de acordo com os valores de peças e materiais em junho de 2022, sendo o custo total para uma unidade de aproximadamente R\$449.00, comprovando ser um equipamento consideravelmente barato quando comparado com aparelhos vendidos comercialmente, quase sempre disponíveis apenas no exterior e com necessidade de importação. Ainda, esses valores podem ser reduzidos para a construção de mais unidades, visto que os materiais de consumo podem ser melhor aproveitados e também há possibilidade de melhores preços para os componentes eletrônicos em maior quantidade.

Tabela 2 – Detalhamento de custos para construção de uma unidade do derivador sem sistema de telemetria

Estrutura do Equipamento	
Tubos e conexões	R\$ 35,00
Peças em acrílico	R\$ 100,00
Materiais adicionais (cola, espuma, lastro, etc.)	R\$ 100,00
CUSTO TOTAL COM ESTRUTURA	RS 235,00
Sistema Eletrônico	
Placa Arduino Nano v3	R\$ 70,00
GNSS Neo-6M	R\$ 65,00
Módulo MicroSD	R\$ 9,00
Bateria recarregável	R\$ 40,00
Acessórios diversos (jumpers, leds, etc.)	R\$ 30,00
CUSTO TOTAL DO SISTEMA ELETRÔNICO	R\$ 214,00
TOTAL DERIVADOR SEM TELEMETRIA	R\$ 449,00

4.1.2 Segunda versão - Sistema de telemetria em tempo real

Diante da possibilidade de perda visual do equipamento na água devido às correntes de retorno e também atendendo as demandas do projeto intitulado "Sistema multiescala de detecção e modelagem de óleo" coordenado pelo Centro de Estudos do Mar da UFPR em parceria com o Simepar e outras instituições, e que tem como um dos objetivos a construção de bóias de deriva que auxiliarão na calibração de modelos de dispersão de óleo, uma segunda versão do derivador foi desenvolvida com a adição de um sistema de telemetria de dados em tempo real para uma estação-base.

A possibilidade de receber a localização do derivador na água permite, além da aplicação na zona de arrebentação, o uso também em estuário e alto mar por longos períodos (entre ciclos de maré a dias de amostragem). Para suprir essa necessidade, o novo equipamento foi projetado baseado em impressão 3D, para facilitar tanto a montagem do corpo quanto a alocação dos componentes eletrônicos, e utilizando uma placa microcontroladora mais robusta em relação ao Arduino, com suporte para a transmissão de dados via rádio de longo alcance e com possibilidade de integração à tecnologia de internet das coisas (*IoT*).

4.1.2.1 Estrutura Física

O design do equipamento seguiu as mesmas características implementadas na primeira versão (formato cilíndrico com placas laterais e disco de amortecimento vertical), porém com altura reduzida para 24cm de modo a facilitar o uso em águas mais rasas e também otimizar o tempo de impressão, mantendo o diâmetro interno em 75mm para a alocação dos equipamentos eletrônicos. O projeto para impressão foi realizado em software de modelagem 3D sendo desenhada uma tampa com rosca para abertura e fechamento do

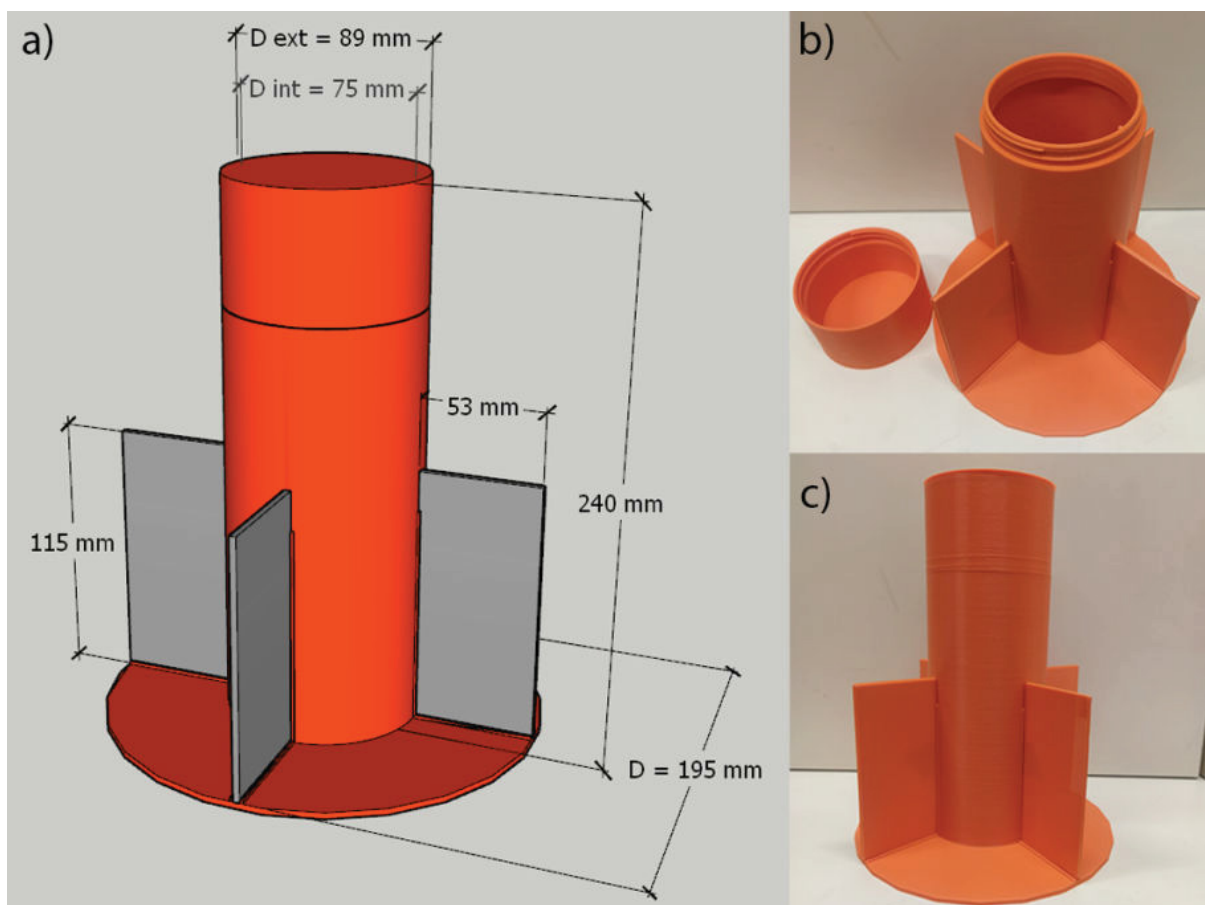


Figura 24 – Projeto 3D do corpo com dimensões utilizadas (a); derivador finalizado com destaque para tampa com rosca (b); e derivador fechado para uso em campo (c)

equipamento com facilidade e uma espessura de 3 mm na parede do tubo para garantir resistência a impactos e completa vedação da parte interna. A Figura 24a apresenta o projeto desenvolvido para a impressão do derivador com as respectivas medidas utilizadas.

A impressão do equipamento foi realizada em uma impressora 3D modelo GTMax3D Core H4, que conta com uma mesa de impressão com 30cm x 20cm e capacidade de imprimir objetos com até 45cm de altura. Essa impressora é considerada um aparelho com alta resolução, contendo um bico de impressão com diâmetro de 0.4mm e resolução vertical de camadas podendo ser configurada entre 0.05mm e 0.40mm, com velocidade de impressão de até 180mm/s, além de possuir cápsula fechada, impedindo a oscilação de temperatura durante o processo de impressão, fornecendo peças de grande qualidade e precisão em detalhes, mesmo de pequenos tamanhos.

O material utilizado para a impressão foi filamento ABS (acrilonitrila butadieno estireno), um plástico com excelente resistência mecânica e térmica, que não sofre degradação nem deformação pela exposição constante à água e luz solar, sendo ideal para projetos funcionais em ambientes de natureza e que estejam sujeitos a impactos, como o caso dos derivadores na zona de arrebentação. A cor escolhida para impressão foi a laranja, para facilitar a localização visual dos equipamentos na água, mesmo em grandes distâncias.

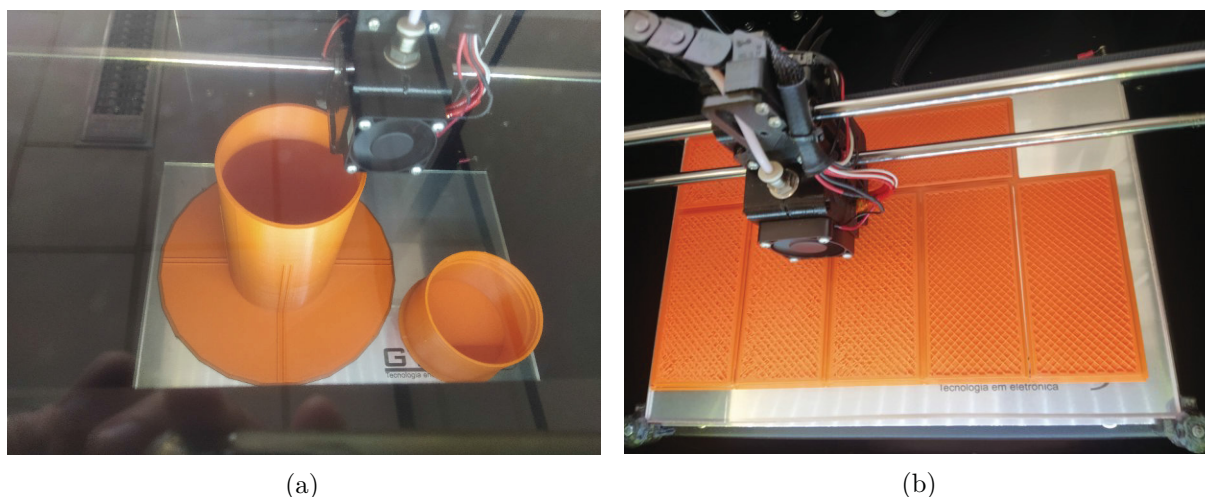
Com relação às configurações utilizadas para a impressão, foi escolhida a opção de

Tabela 3 – Configurações de impressão 3D utilizadas para confecção dos derivadores

Parâmetro	Configuração utilizada
Nº camadas sólidas - base	4
Nº camadas sólidas - topo	6
Preenchimento interno	20%
Padrão de preenchimento	Retangular
Temperatura da mesa	110 °C
Temperatura do bico extrusor	225 °C
Velocidade de impressão	120 mm/s
Resolução da camada vertical	0.15 mm

qualidade média para a impressora utilizada, que permite a obtenção de peças com ótima resistência sem demandar um longo tempo para a conclusão da peça. A Tabela 3 detalha os principais parâmetros utilizados para a confecção do derivador.

Após a finalização do projeto 3D e a definição das configurações dos parâmetros de impressão, optou-se por imprimir as placas laterais separadas do corpo do derivador, uma vez que a impressão dessas peças na posição horizontal fornece uma maior resistência física do que se a placa - com 2 mm de espessura - fosse construída na posição vertical. Essa maior resistência acontece devido ao padrão de preenchimento cruzado utilizado na impressão horizontal (Figura 25b), padrão que não seria possível de ser efetuado verticalmente. Devido ao tamanho da mesa de impressão, o corpo e a tampa puderam ser impressos de forma simultânea (25a).



(a) (b)
Figura 25 – Ilustração do processo de impressão dos equipamentos

Com relação ao tempo de impressão e consumo de filamento, devido às configurações de qualidade média utilizadas, é possível obter um equipamento completo em apenas 1 dia de trabalho e com um baixíssimo consumo de material, possibilitando a confecção de 3 peças inteiras com um único rolo de filamento ABS. A Tabela 4 apresenta o tempo de impressão e consumo de filamento para cada peça, sendo gasto um total de 22 horas e 40 minutos de impressão consumindo 312 gramas de filamento para a construção do corpo com tampa e as 4 placas laterais, sem considerar os tempos de pré-aquecimento e

Tabela 4 – Tempo de impressão e consumo de filamento para a construção de uma peça completa do derivador

Peça	Tempo de impressão	Consumo de filamento
Corpo do derivador	17h50m	208 g.
Tampa	3h48m	55 g.
Placas laterais (4 un.)	1h2m	49 g.
TOTAL	22h40m	312 g.

resfriamento da impressora.

Devido ao padrão de funcionamento da impressora 3D com a impressão em camadas horizontais, a peça construída possui certa porosidade que permite a entrada de água no interior do tubo. Para impermeabilizar o equipamento, foi aplicado um solvente a base de cetonas, vendido comercialmente como solução limpadora para PVC, que reage com a superfície do ABS unindo as camadas e impedindo a infiltração da água. O solvente foi aplicado com duas demãos tanto na parte externa quanto interna do derivador. Ainda, no fundo da parte interna do tubo, foi aplicada uma camada de borracha termoplástica para impedir a entrada de água em casos de trincas ou rachaduras no disco inferior do equipamento.

Com relação à flutuabilidade do derivador, foram adicionados $0.5kg$ de chumbo granulado no fundo do tubo para agir como lastro e deslocar o centro de gravidade do corpo para próximo da base, melhorando, assim, a estabilidade na água. Para evitar o contato do chumbo com os equipamentos eletrônicos, uma camada de espuma expansiva foi aplicada para isolar o material utilizado para lastro. A Figura 26 ilustra as camadas de borracha termoplástica, chumbo granulado e espuma expansiva inseridas para isolamento e lastreamento do equipamento utilizando um recipiente transparente com o mesmo diâmetro do derivador.

Considerando a estrutura do corpo, lastro e componentes eletrônicos, a segunda versão do derivador possui uma massa de $1.1kg$, resultando em uma densidade de $722kg/m^3$, densidade inferior às versões construídas com tubo PVC para possibilitar que uma altura de cerca de $7cm$ permaneça emersa para localização visual e também para facilitar a transmissão de dados pela antena LoRa. Com o lastreamento utilizado e utilizando o Princípio de Arquimedes para cálculo da flutuabilidade, o volume do corpo submerso foi estimado em cerca de 81% e área superficial submersa na faixa de 85%, valores semelhantes aos equipamentos desenvolvidos na primeira versão e também indicando um baixo efeito do vento no deslocamento dos equipamentos.

Na Figura 27, os três equipamentos desenvolvidos são comparados lado a lado, tendo a esquerda o primeiro corpo construído em tubo PVC com $10cm$ de diâmetro e $40cm$ de altura, com o segundo modelo desenvolvido ao centro, ainda com a primeira versão de componentes eletrônicos (sem telemetria), e que possui $7,5cm$ de diâmetro interno com $30cm$ de altura. Por fim, à direita o derivador construído utilizando impressão 3D, mais compacto que os demais porém mantendo espaço interno suficiente para alocação dos

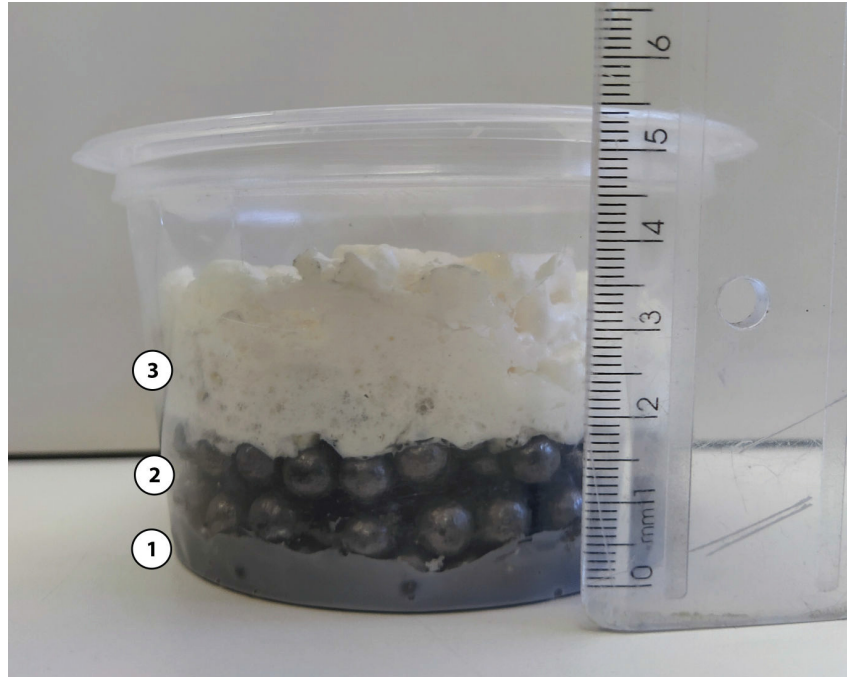


Figura 26 – Exemplo do sistema de lastro e vedação na base do derivador: 1 - borracha termoplástica; 2 - chumbo granulado; 3 - espuma de poliuretano

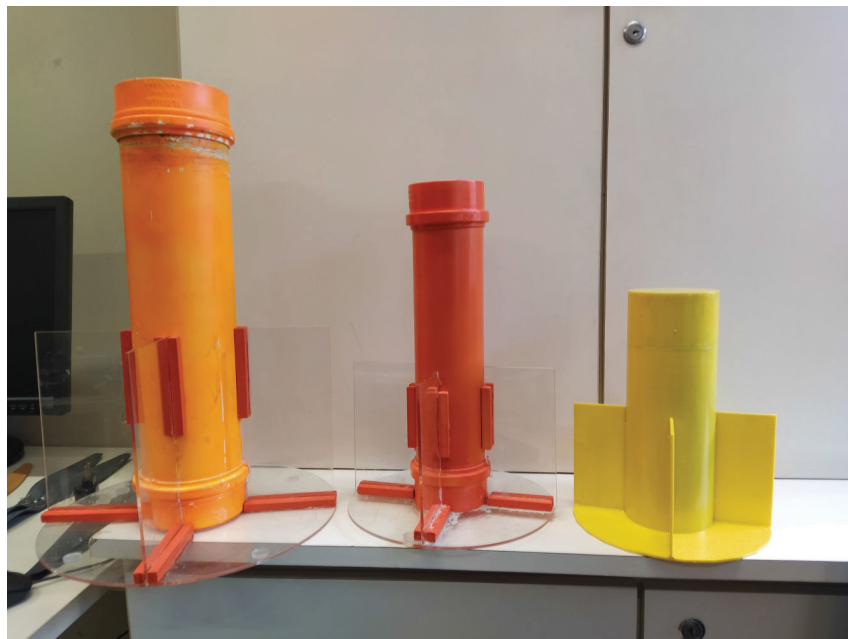


Figura 27 – Comparação entre os três modelos de derivadores construídos

componentes eletrônicos.

4.1.2.2 Componentes Eletrônicos

Sistema de eletrônica embarcada no derivador

Para possibilitar a implementação do sistema de telemetria de dados nessa versão do derivador, foram feitas três modificações principais na configuração dos eletrônicos: i) a adoção de uma placa microcontroladora com sistema de transmissão via rádio de longo

alcance com baixo consumo de energia; ii) uso de um sensor GNSS com menor consumo de energia; e iii) adoção de uma bateria com grande capacidade porém de tamanho compacto devido à redução no tamanho do corpo do equipamento impresso.

A placa microcontroladora escolhida foi a placa Heltec ESP32 WiFi v2.0 (especificações), desenvolvida principalmente para ser utilizada em aplicações de "internet das coisas" (*IoT - internet of things*), por contar com uma boa capacidade de processamento e possibilidade de comunicação via internet (WiFi) e via protocolo de rádio LoRa. O chip microprocessador é o modelo ESP32-D0WDQ6, que conta com memória SRAM de 520kb e 4MB de memória flash. O chip de rádio LoRa instalado na placa é o SX1276, que permite a transmissão e recepção de dados com longo alcance aliado a um baixo consumo de energia com um ganho de até $20dBm$ para a comunicação.

Com relação ao sensor GNSS, foi escolhido o sensor modelo Neo-7M (datasheet), versão atualizada no Neo-6M, e que tem como principal característica a capacidade de aquisição de dados do sistema de posicionamento GLONASS além do GPS, o que torna o tempo de obtenção da quantidade mínima de satélites ser reduzido em relação ao antecessor, sendo necessário apenas cerca de 30 segundos após ser ligado para estar pronto para uso e, em caso de perda momentânea de sinal durante a amostragem, a reaquisição acontece entre 1 e 3 segundos. Com relação à precisão de posicionamento, os valores máximos são semelhantes ao Neo-6M, com erro de posicionamento horizontal na faixa de $2.5\ m$ e imprecisão de velocidade máxima de até $10\ cm/s$. Outra vantagem deste módulo em relação ao utilizado na versão sem telemetria é o menor consumo de energia (17 mA de consumo médio no Neo-7M contra 45 mA no Neo-6M), permitindo uma maior autonomia da bateria.

O módulo SD utilizado foi o mesmo modelo aplicado na primeira versão do derivador. Por ser um módulo que utiliza o protocolo de comunicação SPI para enviar e receber dados da placa microcontroladora, mesmo protocolo utilizado pelo chip LoRa, algumas adaptações foram necessárias para o correto funcionamento do sistema sem a ocorrência de conflitos de sinal. Assim, foram inseridos blocos no código do programa para que tanto o módulo SD quanto o chip LoRa sejam ativados apenas no momento de uso, sendo desligados logo em seguida. Para estabilizar a corrente e evitar que o módulo SD interfira no chip LoRa quando esse estiver ativo, um resistor de 2200Ω foi instalado entre o pino MISO do módulo SD e o respectivo pino da placa microcontroladora.

Com relação à alimentação de todo o sistema eletrônico, foi escolhida uma bateria portátil utilizada comumente para o carregamento de aparelhos celulares (*Power Bank*), devido ao pequeno tamanho e grande capacidade de armazenamento ($5000mAh$), além da facilidade em alimentar a placa microcontroladora com uma tensão de $5V$ utilizando comunicação via USB, dispensando o uso de reguladores de tensão que ocupam espaço e dissipam parte da energia da bateria.

A Figura 28 ilustra o esquema de conexão dos componentes eletrônicos e sistema

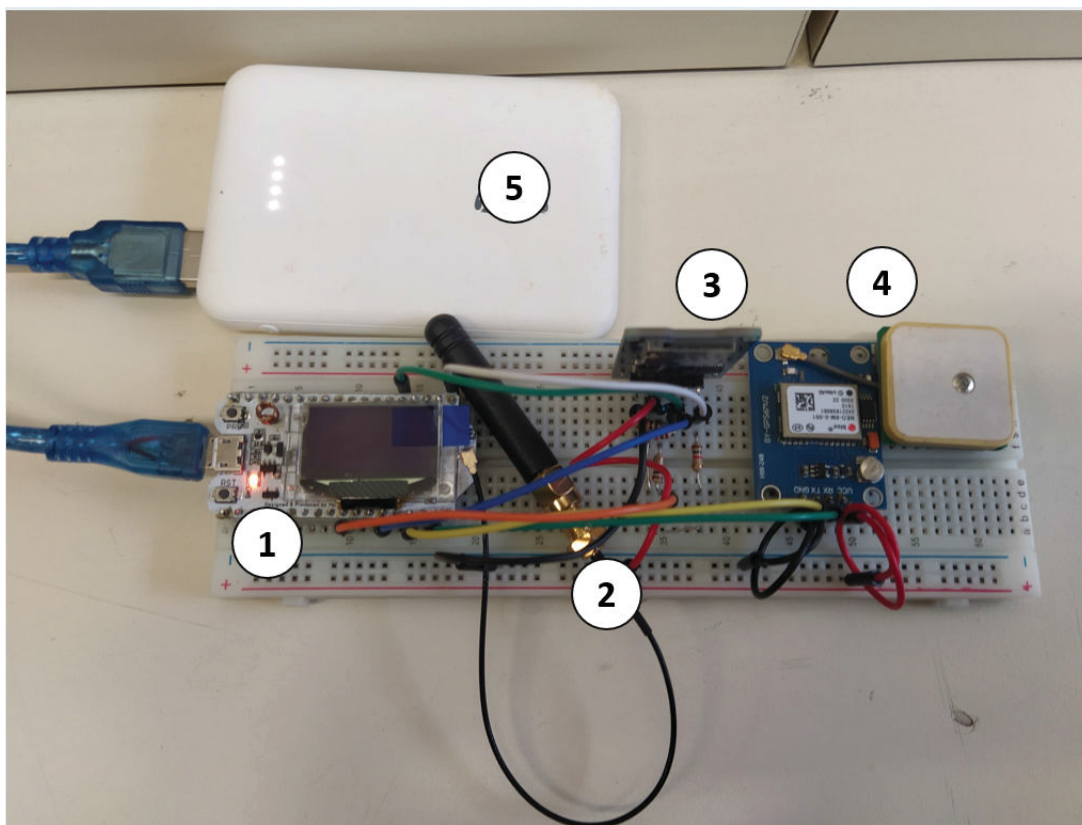


Figura 28 – Esquema de conexão entre os componentes eletrônicos para a versão do derivador com telemetria de dados

de alimentação, sendo 1) placa microcontroladora; 2) antena para transmissão via LoRa; 3) módulo micro SD (*datalogger*); 4) sensor GNSS; e 5) bateria para alimentação.

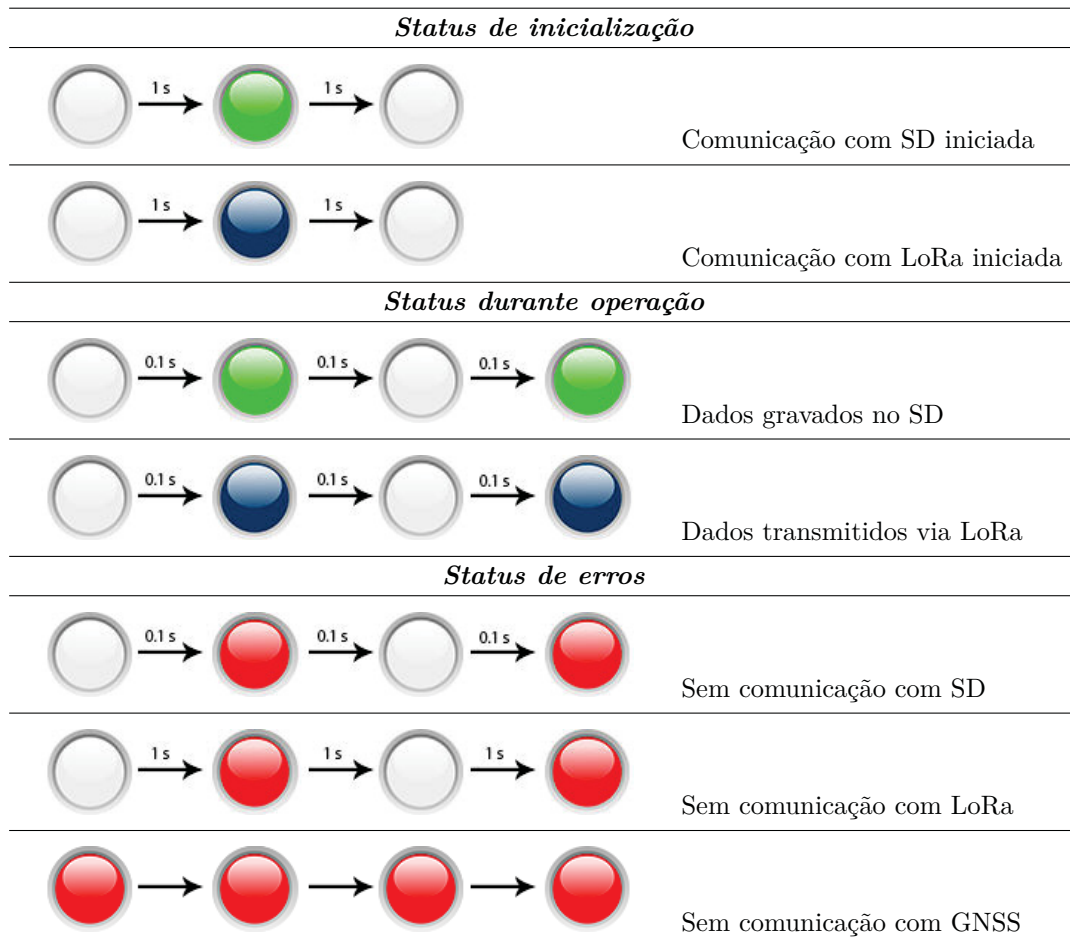
4.1.2.3 Protocolo de Status de Funcionamento

Para facilitar o uso do equipamento em campo, um *led* RGB foi inserido na parte superior, próximo à placa do sensor GNSS, de modo a ficar visível apenas com a abertura da tampa do equipamento. Esse tipo de *led* permite utilizar as cores vermelho, verde e azul em um mesmo diodo, sendo definido um protocolo com diferentes cores e frequências de acionamento do led para possibilitar uma rápida verificação quanto ao status de funcionamento do derivador. Esse protocolo considera o status de inicialização do equipamento (*setup*), para verificar se todos os componentes foram conectados corretamente; status de funcionamento, para indicar se o aparelho está gravando e transmitindo dados da forma correta; e um protocolo para indicar possíveis erros de funcionamento.

A Tabela 5 detalha o comportamento do led para cada etapa do protocolo de status de funcionamento. Os status de inicialização e de operação consideram apenas os módulos SD e LoRa pois o sensor GNSS fica visível ao ser aberto e possui um *led* embutido em sua placa que serve para indicar que o sensor está operando com a quantidade mínima de satélites para uma boa qualidade de posicionamento. Caso o sensor esteja se comunicando com os satélites, mas não tenha comunicação com o microcontrolador, um protocolo de

erro irá indicar a falha no *led* RGB.

Tabela 5 – Protocolo para status de funcionamento dos componentes eletrônicos com o uso de um led RGB



4.1.2.4 Base receptora - sistema telemétrico

Para a captura do sinal enviado pelos derivadores, foi utilizada uma placa microcontroladora igual à embarcada nos equipamentos, e a esta placa foi conectado também um GNSS Neo-7M para possibilitar a localização da base no mapa e consequente cálculo da distância entre a base e o equipamento a ser resgatado. A Figura 29a mostra os aparelhos eletrônicos alocados dentro de um *case* construído em impressão 3D (a) e o *case* fechado pronto para uso em campo (b). O software desenvolvido para recepção dos sinais enviados pelos derivadores foi construído em linguagem C++ e pode ser verificado no Apêndice C.

Para aumentar a área de alcance da telemetria, a antena pequena omnidirecional da placa com 3 dbi de ganho pode ser substituída por uma antena tipo Yagi direcional com ganho de 12 dbi, sendo esperado um aumento no alcance de cerca de 8 vezes em relação à antena original.

O monitoramento da telemetria em campo é feito através da captura dos dados recebidos pela base via comunicação serial pela porta USB de um computador. Esses dados

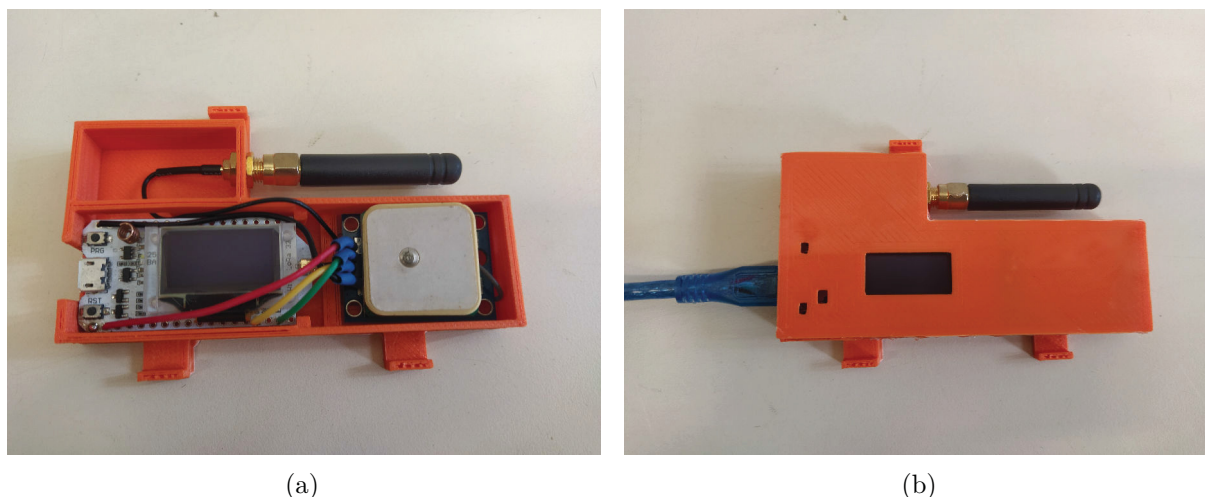


Figura 29 – Configuração dos eletrônicos utilizados para a base receptora de dados telemétricos

são interpretados por um software desenvolvido em linguagem Python (Apêndice D) que calcula, através da posição atual da base e a última localização recebida do derivador, a distância do transmissor e a direção geográfica a se deslocar para recuperar o equipamento. Ainda, todos os dados recebidos são salvos em um arquivo *log*, possibilitando uma análise prévia dos dados mesmo durante a amostragem e, mais importante, permitindo a obtenção dos dados medidos em caso de perda do equipamento ou problemas de arquivos corrompidos no *datalogger*.

A Figura 30 exemplifica as principais funções do software para monitoramento dos dados telemétricos recebidos: a) tela contendo os dados brutos enviados pelos derivadores; b) interface html com localização em tempo real do derivador (marcador laranja) e distância e azimute em relação à base (marcador azul); e c) arquivo *log* com todas as informações recebidas pela base durante a amostragem de dados.

4.1.2.5 Precificação

A versão do derivador com um sistema de telemetria de dados em tempo real possui um custo cerca de 30% superior à primeira versão do derivador, tendo gerado um gasto de cerca de R\$571,00 de acordo com os preços em junho de 2022. Esse aumento no valor é pequeno se considerar a importância que um sistema de telemetria possui na aquisição de dados em campo, além da facilidade e agilidade na construção do corpo utilizando impressão 3D.

A base receptora apresenta a maior fatia de gastos no sistema de telemetria, entretanto, com uma única base é possível monitorar inúmeros equipamentos em funcionamento dentro de um raio de alguns quilômetros de distância. Ainda, para o uso em ambientes menores, onde os equipamentos não se afastem por mais de 1km da base, é possível dispensar o uso de uma antena direcional de alta potência, reduzindo o custo da base receptora em mais de 60%.

A Tabela 6 detalha os custos com a estrutura física e sistema eletrônico do derivador

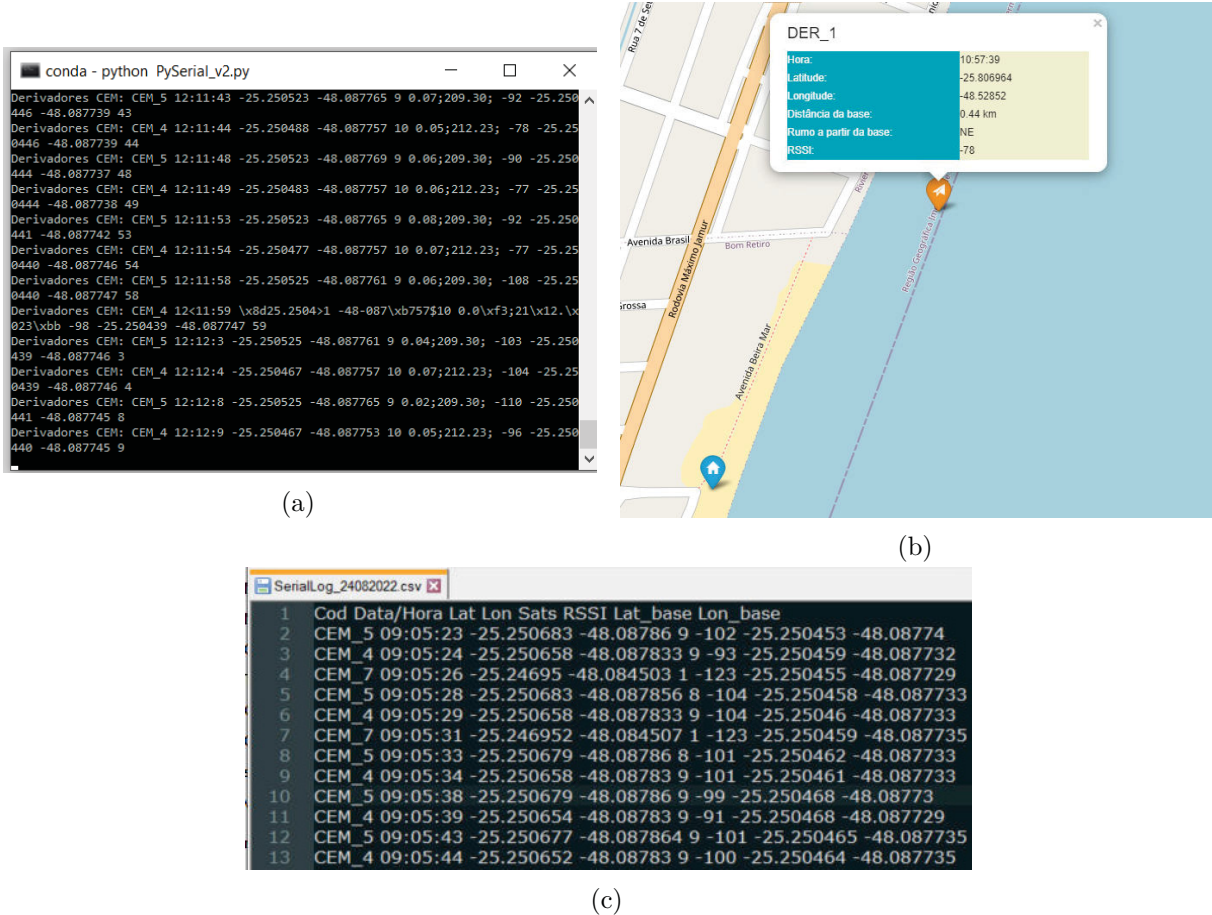


Figura 30 – Exemplos das telas do sistema telemétrico: a) dados brutos recebidos via porta serial; b) interface com localização da base e derivadores no mapa; e c) log salvo na base com dados recebidos dos derivadores

e da base receptora para o sistema de telemetria de dados em tempo real considerando valores praticados em junho de 2022.

4.2 Avaliação de Desempenho do Derivador

4.2.1 Testes de Flutuabilidade e Estabilidade

Os testes de flutuabilidade e estabilidade do derivador foram realizados na região da praia central de Matinhos utilizando o primeiro protótipo construído. Inicialmente, verificou-se a estabilidade e o lastro de chumbo colocado junto ao fundo foi complementado com uma quantidade de areia de praia, tornando o corpo mais estável na água. As duas outras versões de derivadores tiveram a quantidade de lastro calculada de forma a obter-se a mesma densidade que foi obtida no teste em campo com o primeiro protótipo para ter flutuabilidades semelhantes.

Com relação ao efeito da quebra de ondas na trajetória do derivador, o deslocamento na zona de arrebenção foi monitorado com o auxílio de um *drone* que permaneceu em uma posição fixa registrando imagens em vídeo. A Figura 31 mostra a eficiência do disco

Tabela 6 – Detalhamento dos custos para desenvolvimento de uma unidade do derivador impresso 3D e portando sistema de telemetria e da base receptora de dados

Estrutura do Equipamento	
Filamento ABS Premium	R\$ 30,00*
Materiais adicionais (solvente, cola, lastro, etc.)	R\$ 120,00
Energia elétrica para impressão	R\$ 12,00**
CUSTO TOTAL COM ESTRUTURA	R\$ 162,00
Sistema Eletrônico	
Placa ESP-32 LoRa Wi-Fi v2	R\$ 250,00
GNSS Neo-7M	R\$ 80,00
Módulo MicroSD	R\$ 9,00
Power Bank 5000mAh	R\$ 40,00
Acessórios diversos (jumpers, leds, etc.)	R\$ 30,00
CUSTO TOTAL DO SISTEMA ELETRÔNICO	R\$ 409,00
Base Receptora	
Placa ESP-32 LoRa Wi-Fi v2	R\$ 250,00
GNSS Neo-7M	R\$ 80,00
Antena direcional 915mHz 12dbi	R\$ 580,00
Cabo coaxial N-SMA	R\$ 50,00
CUSTO TOTAL DA BASE RECEPTORA	R\$ 960,00
TOTAL DERIVADOR COM TELEMETRIA	R\$ 1693,00

*Consumo aproximado de 330g de filamento (R\$ 89,90/kg)

**Considerando um ciclo de impressão de 24 horas em uma impressora com 600W de potência e custo da energia elétrica no estado do Paraná em junho de 2022

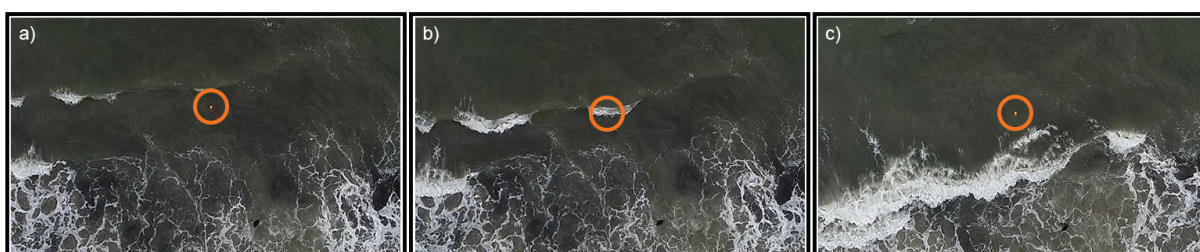


Figura 31 – Quadros de imagem de drone indicando ausência de transporte do derivador devido quebra de ondas: a) antes, b) durante, e c) após a quebra de uma onda na localização do derivador

de amortecimento vertical para impedir que a quebra de ondas transporte o equipamento em direção à praia. A imagem é separada em três quadros distintos, onde a posição do equipamento é destacada pelo círculo laranja. No primeiro quadro (a), a crista da onda aproxima-se do derivador, quebrando, posteriormente, na mesma posição em que o equipamento encontrava-se (b), sendo que este afunda neste momento. Já o quadro (c) foi capturado após a quebra da onda, e pode-se identificar que o derivador permaneceu na mesma posição, sem sofrer transporte devido à quebra da onda.

Tabela 7 – Testes realizados para avaliação da autonomia da bateria com diferentes configurações

Teste	Sensor GNSS	Frequência de Transmissão	Potência da Antena LoRa	Autonomia
1	Neo-6M	60 s.	14 dbi	17h55m
2	Neo-7M	60 s.	14 dbi	19h53m
3	Neo-7M	1 s.	14 dbi	15h47m
4	Neo-7M	1 s.	20 dbi	14h25m

4.2.2 Avaliação de Alcance da Antena

O teste com objetivo de avaliar o alcance da antena para recepção do sinal enviado pelos derivadores foi realizado no canal do Varadouro, na divisa entre o litoral do Paraná e a costa de São Paulo, que possui uma seção com aproximadamente $50m$ de largura e cuja circulação hidrodinâmica é dominada pelas marés. Durante o teste, sete derivadores foram lançados na água, sendo três equipamentos configurados com a máxima potência da antena permitida pela placa microcontroladora ($20dbi$) e os outros quatro operando com uma frequência de $14dbi$, valor padrão recomendado na documentação do chip LoRa.

Durante o teste, os derivadores foram lançados com um espaçamento de cerca de $100m$ ao longo do canal e o barco utilizado como base permaneceu fixo a montante com a antena apontada na direção dos equipamentos (Figura 32a). Após o processamento do *log* salvo pela telemetria dos dados, a maior distância identificada entre a base e o transmissor foi de $1.48km$, e enviada por um derivador configurado com $14dbi$ de ganho, indicando que a potência enviada pela placa não influencia no alcance, visto que as limitações da antena instalada no equipamento impedem a transmissão do sinal com potências maiores. Portanto, é possível o uso de valores menores na configuração da antena para aumentar a autonomia do equipamento sem prejudicar o alcance do sinal transmitido.

Ainda, o alcance máximo do sistema de telemetria pode ser ainda superior a $1.48km$ em situações de campo aberto, visto que todos equipamentos perderam comunicação próximo a um trecho de curva do canal, o que faz com que o sinal de rádio seja obstruído pela vegetação das margens.

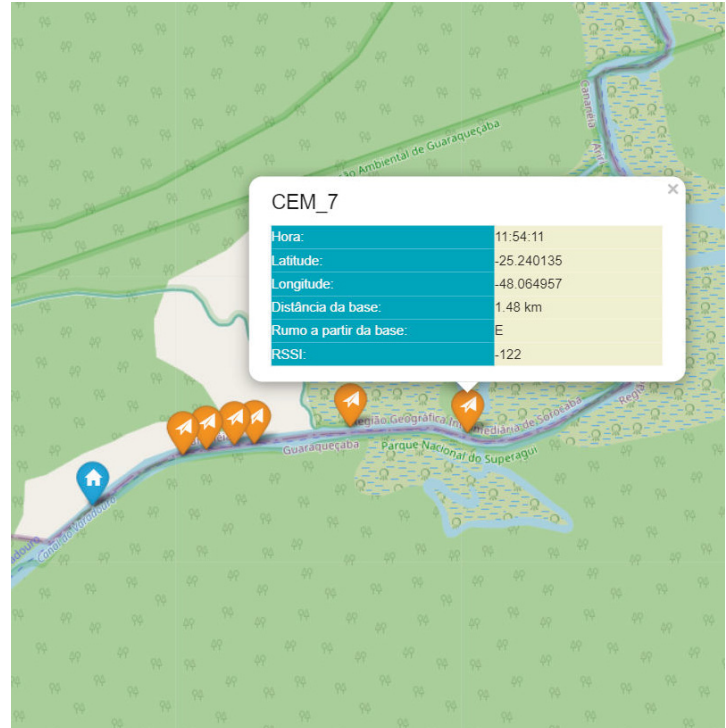
4.2.3 Avaliação de Autonomia

Os principais fatores que afetam a autonomia da bateria no derivador são o consumo de energia do sensor GNSS, a potência configurada para a antena e a frequência de transmissão dos dados via LoRa. Para avaliar a autonomia considerando o efeito desses três fatores citados, foram realizados quatro testes variando o sensor GNSS, a potência da antena e frequência de transmissão, conforme detalhado na Tabela 7.

Após a análise dos testes, verificou-se que o sensor GNSS Neo-7M realmente possui menor consumo conforme especificações do fabricante, tendo resultado em uma autonomia 11% superior ao modelo Neo-6M, o que representa uma acréscimo de cerca de 2 horas de



(a)



(b)

Figura 32 – a) antena direcional utilizada para recepção dos dados e b) interface do sistema da base receptora com localização da base e do ponto com maior distância de transmissão

operação quando a taxa de transmissão de dados é configurada em 1 minuto. A comparação entre os testes 2 e 3 indicam que a transmissão dos dados via rádio com intervalo de 1 segundo resulta em uma queda de 20% do tempo de operação quando comparado ao equipamento com taxa de transmissão de 1 minuto equipado com o mesmo GNSS. E, por fim, o aumento da potência enviada pela placa para a antena de 14dbi para 20dbi reduziu a autonomia em cerca de 9% quando considerada uma taxa de 1 segundo para transmissão via LoRa.

4.2.4 Avaliação de Qualidade dos Sensores GNSS

Para avaliar a capacidade dos sensores GNSS utilizados em representar velocidades médias, uma série de testes foram realizados. O primeiro teste efetuado foi estático, para verificar os erros médios dos sensores, nos mesmos moldes dos testes desenvolvidos por Johnson et al. (2003), Sabet e Barani (2011) e Kumar et al. (2020). O segundo teste foi o cinemático com deslocamento em distância e tempo conhecidos, semelhante ao realizado por Sabet e Barani (2011). E, por fim, um teste na água para avaliar a precisão na aquisição de velocidades de correntes quando comparado a um perfilador de correntes acústico, baseado nos experimentos de Johnson et al. (2003) e Sabet e Barani (2011).



Figura 33 – Derivador posicionado em campo aberto para realização do teste estático para avaliação dos sensores GNSS

4.2.4.1 Teste Estático - Campo Aberto

Com o objetivo de verificar os erros decorrentes a efeitos atmosféricos e imprecisões da antena dos sensores GNSS utilizados, dois derivadores foram mantidos em uma posição fixa durante aproximadamente 60 minutos, um portando a versão GNSS Neo-6M e outro equipado com o sensor Neo-7M. Os equipamentos permaneceram gravando a posição obtida pelos sensores com frequência de $1Hz$ no centro do campo de futebol do Centro de Educação e Desportos CED-UFPR (Figura 33) para evitar interferências de construções e árvores na qualidade do sinal e com um espaçamento de aproximadamente 5 metros entre os equipamentos para diminuir possíveis interferências entre as antenas dos sensores.

Através das posições gravadas no arquivo *log* dos equipamentos, calculou-se os valores médios de latitude e longitude. Em seguida, subtraiu-se estes valores médios de cada posição instantânea, de modo a obter o deslocamento em relação à posição média (resíduo) no eixo y (latitudes) e eixo x (longitudes). O erro médio dos sensores para a latitude e longitude (em relação à posição média) e da velocidade foram calculados utilizando o método do Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error - MAE*), ou seja, a partir da média dos resíduos nos eixos x e y e das velocidades instantâneas registradas durante todo o período de amostragem, como exemplificado na equação 4.1. Os resultados obtidos após o teste estático são apresentados na seção 5.1.1.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.1)$$



Figura 34 – Nuvem de pontos registrados pelo sensor GNSS durante os caminhamentos do teste cinemático

Onde: y_i = valor real (latitude ou longitude médias ou 0 para velocidade);

\hat{y}_i = valor instantâneo registrado pelo sensor GNSS;

n = número de registros.

4.2.4.2 Teste Cinemático - Pista de Atletismo

De modo a analisar a precisão do derivador na obtenção de velocidades médias, o teste cinemático foi feito através do caminhada na pista de atletismo do Centro de Educação e Desportos CED-UFPR, uma pista com certificação internacional nível A2, contendo exatos $400m$ de extensão em sua raia interna e com demarcação de distâncias na pista a cada $100m$. A escolha desta pista para o teste cinemático se deu pela possibilidade de cronometrar a distância exata percorrida para cálculo da velocidade média e, assim, efetuar a comparação com a velocidade média calculada pelo sensor GNSS Neo-6M no mesmo intervalo de tempo. A nuvem de pontos registrada durante o teste é apresentada na Figura 34.

Dessa forma, com o derivador configurado para obtenção da posição do GNSS com frequência de $1Hz$, foram realizados 15 caminhamentos com cronometragem, variando a distância total percorrida entre $100m$ e $800m$ e ritmo de velocidade variando entre $0.4m/s$ e $1.45m/s$, faixa de velocidade compatível com correntes verificadas na zona de arrebrantação. Ainda, durante os caminhamentos com distância superior a $100m$, tomadas de tempo parciais foram anotadas nas marcações de $200m$, $400m$ e $600m$, totalizando 25 tomadas de tempo para comparação com os resultados obtidos pelo GNSS. A Tabela 8

Tabela 8 – Detalhamento das tomadas parciais de tempo com a respectiva velocidade média calculada para os tempos cronometrados

Tempo (s)	Vel. Média (m/s)	Tempo (s)	Vel. Média (m/s)	Tempo (s)	Vel. Média (m/s)	Tempo (s)	Vel. Média (m/s)	Tempo (s)	Vel. Média (m/s)
244	0.41	-	-	-	-	-	-	-	-
227	0.44	-	-	-	-	-	-	-	-
152	0.66	-	-	-	-	-	-	-	-
172	0.58	-	-	-	-	-	-	-	-
85	1.18	-	-	-	-	-	-	-	-
130	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-
146	0.68	-	-	-	-	-	-	-	-
99	1.01	-	-	-	-	-	-	-	-
70	1.43	-	-	-	-	-	-	-	-
123	0.81	242	0.83	-	-	-	-	-	-
70	1.43	142	1.41	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	530	0.75	-	-	-	-
-	-	-	-	282	1.42	-	-	-	-
95	1.05	183	1.09	354	1.13	525	1.14	697	1.15
69	1.45	171	1.17	300	1.33	570	1.05	712	1.12
P1 (100m)		P2 (200m)		P3 (400m)		P4 (600m)		P5 (800m)	

sintetiza as velocidades médias cronometradas durante os caminhamentos com o derivador para diferentes distâncias.

Antes do início do teste, foi garantido que o relógio do aparelho celular utilizado para cronometragem estava sincronizado com o relógio do GPS, isso permitiu que a cronometragem das distâncias percorridas fosse feita através da anotação do horário exato de início e fim do caminhamento. Com a anotação dos horários, foi possível filtrar o arquivo *log* registrado pelo derivador para que fosse calculada a velocidade média registrada pelo GNSS exatamente nos mesmos instantes de tempo dos caminhamentos.

Com o cálculo das velocidades médias calculadas pela cronometragem e pelo GNSS nas 25 parciais de tempo, esses dados foram comparados através da aplicação de uma regressão linear simples para estabelecer o coeficiente de correlação (R^2) e, assim, verificar a precisão do sensor GNSS no cálculo de velocidades médias. Ainda, com o intuito de identificar a sensibilidade do sensor à mudanças de velocidade, um dos caminhamentos com distância total de 800m foi feito com variação na intensidade de caminhada, variando entre ritmo rápido e lento a cada parcial. Os dados medidos pelo GNSS foram relacionados com as velocidades médias cronometradas para verificar a resposta do sensor à rápida mudança da velocidade.

Os resultados do teste cinemático são apresentados em detalhes na seção 5.1.2.

4.2.4.3 Teste em Canal - Comparação GNSS e ADCP

O terceiro teste realizado para a avaliação da qualidade do sensor GNSS na representação de velocidades médias teve como objetivo avaliar o desempenho do derivador na



Figura 35 – Levantamento simultâneo com derivador e ADCP na desembocadura do rio Matinhos

aquisição de dados de correntes. Para isso, foi escolhido um canal com seção constante na desembocadura do rio Matinhos onde fixou-se um correntômetro acústico tipo ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) modelo Sontek M9, que permaneceu parado no centro do canal adquirindo dados de velocidade com frequência de 1 segundo e com resolução vertical de células de 2cm (Figura 35).

Com o ADCP em operação, o derivador foi lançado a cerca de 10m a montante e recuperado 10m a jusante da seção em que o equipamento foi fixado. No total, foram realizados 30 lançamentos do derivador, tendo sido descartados 5 registros devido à colisões do derivador com a prancha do ADCP, totalizando, assim, 25 registros válidos para a comparação entre as velocidades médias obtidas pelo equipamento acústico e pelo sensor GNSS. Os lançamentos ocorreram durante o final do período de maré vazante, com o objetivo de medir diferentes intensidades de correntes para uma melhor comparação dos dados.

Para permitir a comparação entre os dados, o relógio do ADCP e um relógio digital utilizado para as anotações de campo foram sincronizados com o horário do sensor GNSS do derivador. Assim, foram anotados os horários de cada lançamento e resgate do derivador em uma planilha. Em laboratório, essas anotações foram digitalizadas para extrair os registros dos 25 lançamentos no arquivo *log* do derivador. Como a velocidade pode variar consideravelmente mesmo em pequenas distâncias no canal, foi delimitado um raio de 5m da posição em que o ADCP foi instalado e apenas os pontos inseridos dentro deste

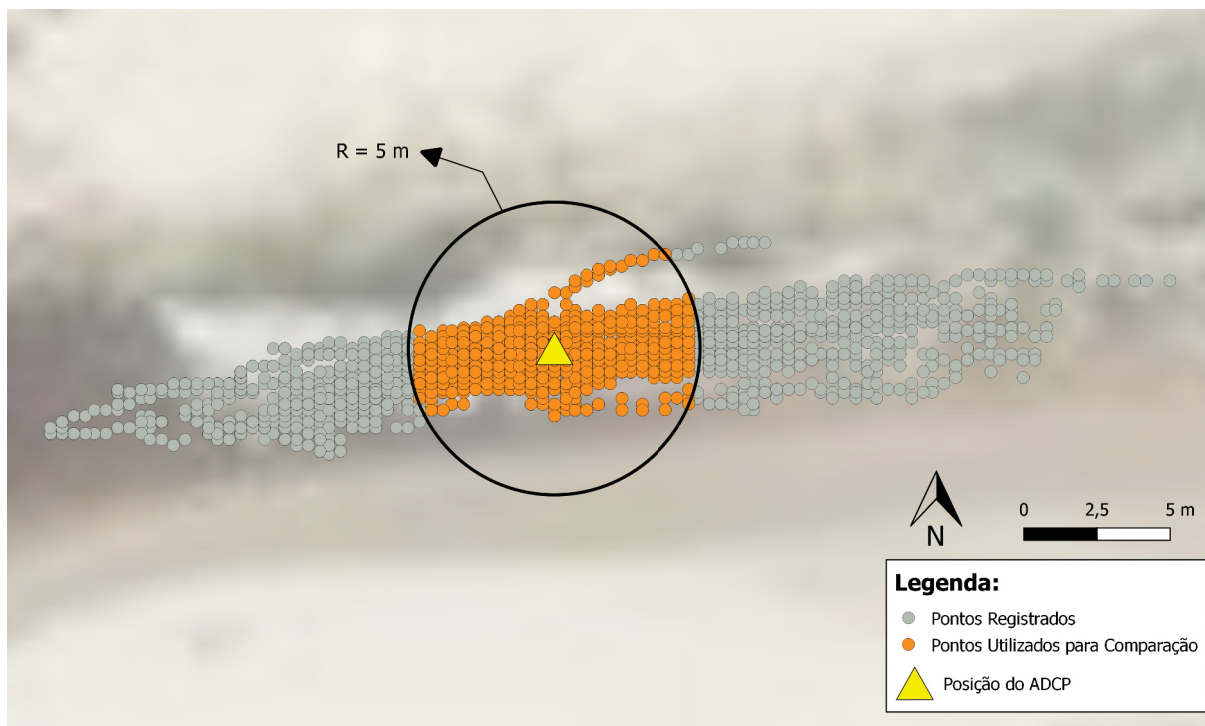


Figura 36 – Gráficos da variação do deslocamento em relação à latitude (dy) e longitude (dx) médias e do parâmetro HDOP ao longo do tempo de amostragem do teste estático

raio foram utilizados para cálculo da velocidade média de cada lançamento. A Figura 36 mostra a nuvem de pontos utilizadas na comparação com o ADCP (em laranja) e os pontos registrados porém desconsiderados por estarem a uma distância superior a 5m do correntômetro acústico (pontos em cinza).

Com as séries temporais recortadas para todos os lançamentos, foram extraídos os registros para os mesmos instantes de tempo registrados pelo ADCP. Primeiramente, foram calculadas as velocidades médias instantâneas registradas pelas primeiras 10 células do ADCP, o que resulta na representação da velocidade média dos primeiros 20cm da coluna d'água, profundidade compatível com a altura submersa do derivador. Na sequência, calculou-se a velocidade média relativa a estes 20cm de profundidade durante o tempo total de cada um dos 25 lançamentos.

As 25 velocidades médias obtidas tanto pelo derivador quanto pelo ADCP foram correlacionadas através da aplicação de uma regressão linear com o cálculo do coeficiente de correlação (R^2), e os resultados são apresentados na seção 5.1.3.

4.3 Modelagem Numérica

Para verificar a hipótese de que os resultados obtidos pelo derivador podem ser úteis na validação de modelos numéricos que simulam a hidrodinâmica praiar considerando a interação entre ondas e correntes, foi utilizado o sistema de modelagem implementado por Moreira (2019) na região da praia central de Matinhos. Estes modelos utilizam dois

sistemas de grades aninhadas onde são efetuadas simulações intercaladas entre um modelo hidrodinâmico e um espectral de ondas, gerando, assim, resultados de correntes decorrentes da interação entre propagação e quebra de ondas e outros efeitos hidrodinâmicos na zona de arrebentação praial.

A alimentação dessas grades locais depende de condições de contorno que precisam considerar efeitos ocorridos na região costeira e oceânica. Dessa forma, os processos hidrodinâmicos utilizados como condição de contorno, foram obtidos os dados gerados pelo Brazilian Sea Observatory (BSO; <https://brazilianseaobservatory.org/>), que utiliza o modelo MOHID através da técnica de downscaling para simular marés e correntes. O modelo utiliza três níveis de grade, abrangendo a região do Oceano Atlântico Sul, refinando para a plataforma continental sul-sudeste e com um terceiro nível com resolução espacial de 600 m considerando a região entre o litoral de Santa Catarina e sul de São Paulo, validados por Franz et al. (2016). Os campos de velocidade desta última grade foram utilizados como condição de contorno no modelo local com intervalo horário, enquanto a variação da maré foi inserida com frequência de 15 minutos. A principal vantagem no uso desse sistema é a possibilidade em se obter o efeito da variação da maré devido a efeitos meteorológicos, importante para a simulação de processos na zona costeira.

Com relação aos processos de geração de ondas ocorridos na região oceânica são simulados o modelo WaveWatchIII (WW3; Tolman (1991)) implementado e operacionalizado pelo SIMEPAR contendo 3 grades aninhadas, sendo uma grade com resolução espacial de 0.5° ($55km$), responsável por simular o processo de geração de ondas em toda a extensão do Oceano Atlântico Sul. Os resultados gerados por esta grade são utilizados de condição de contorno para outra grade com 0.125° de resolução ($14km$) abrangendo a costa brasileira que, por sua vez, alimenta a terceira e mais refinada grade do WW3 com 0.025° de espaçamento de grade ($2.75km$) e simula os processos de onda ao longo de toda a plataforma continental Sul-Sudeste do Brasil e que é responsável por fornecer as condições de contorno para a grade do SWAN implementada neste trabalho.

Para poder considerar os efeitos de ondas ocorridos na região oceânica e simulados pelo terceiro nível do modelo WW3 ($2,75km$) em escala local, uma grade intermediária do SWAN foi implementada por Moreira (2019) e melhorada neste trabalho. Esta grade (Grade 1) possui espaçamento constante de $500m$, com extensão entre o norte da baía da Babitonga, litoral norte de Santa Catarina, até a divisa entre Paraná e São Paulo, possuindo 215 células na direção leste-oeste e 275 células no eixo norte-sul. A grade com os dados de batimetria é verificada na Figura 37.

A simulação de ondas por esta grade do SWAN foi realizada adotando uma resolução temporal de 10 minutos e utilizando como condições de contorno os resultados horários gerados pelo WW3 com resolução de $2.75km$ utilizando a opção de segmentos disponível no SWAN, tendo sido inseridos 23 pontos nas três bordas com contorno aberto da grade onde gerou-se séries temporais na coordenada média de cada um destes segmentos contendo os

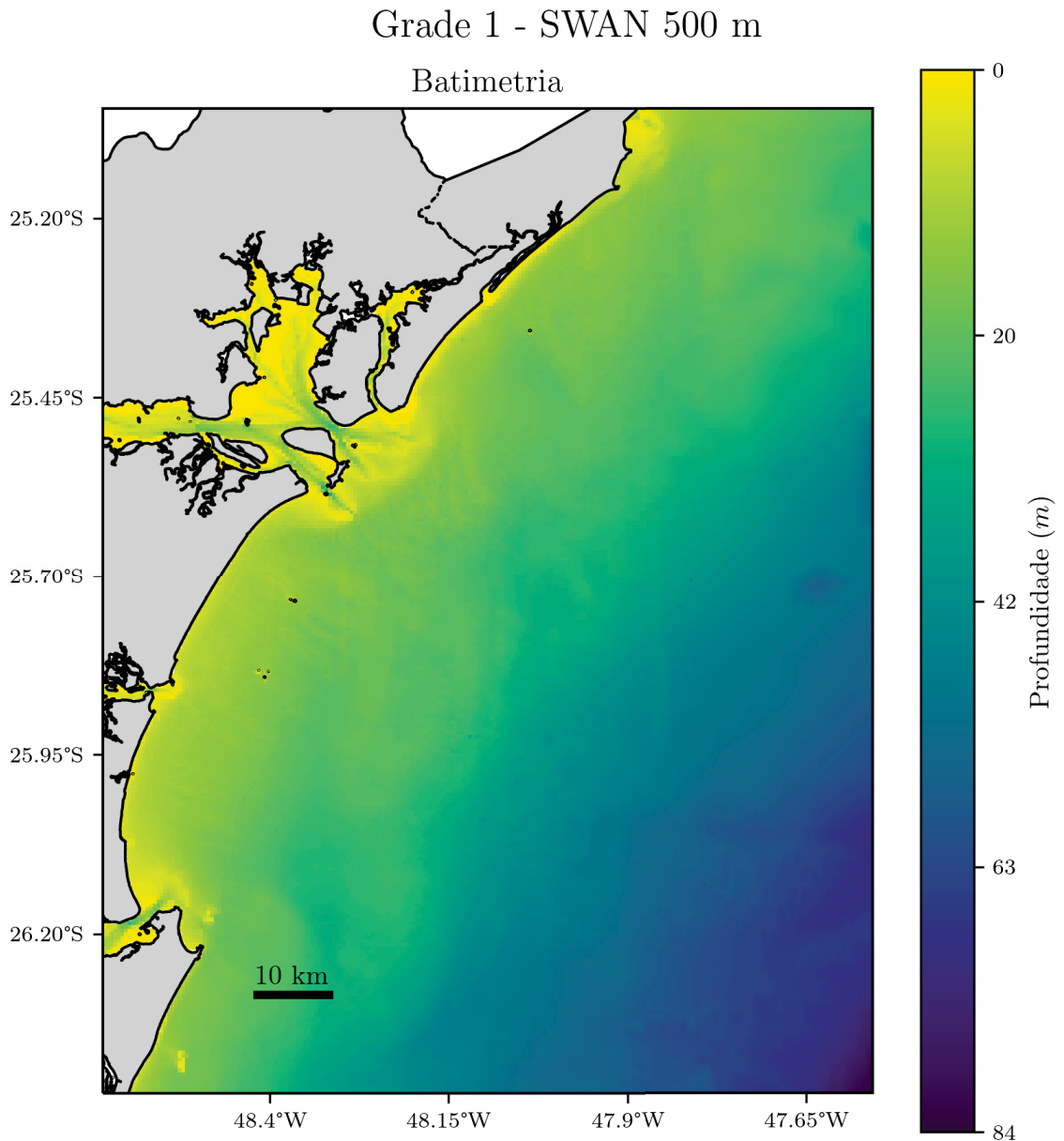


Figura 37 – Área de abrangência da grade 1 – SWAN 500 m

dados de altura significativa, direção e períodos médios e taxa de espalhamento da direção calculados pelo WW3 com intervalo de 60 minutos.

As configurações numéricas aplicadas nesta grade consideraram a abordagem de modelo de ondas de terceira geração, simulando os processos de geração e dissipação de ondas e interações onda-onda quádruplas segundo os métodos descritos por Komen et al. (1994). O processo de quebra de ondas foi definido como constante, ocorrendo quando a taxa entre a máxima altura de uma onda e a profundidade da seção apresentam valor inferior a 0.73, enquanto o atrito com o fundo é calculado utilizando a formulação proposta por Hasselmann et al. (1973).

4.3.1 Modelagem Acoplada – Interação Onda-corrente

Para simular os efeitos de correntes longitudinais na região da Praia Central de Matinhos, Moreira (2019) implementou duas grades aninhadas com inclinação acompanhando a inclinação da costa e resolução variável, com alta resolução na região da zona de arrebentação, reduzindo a resolução espacial gradativamente até o contorno em mar aberto.

A Grade 2 (Guaratuba), abrangendo a área próxima à desembocadura da baía de Guaratuba foi desenvolvida com o objetivo de simular com maior precisão os efeitos de variação batimétrica causados pela porção submersa do morro do Cristo, ao norte da desembocadura da baía, conforme verificado no mapa batimétrico da grade (Figura 38). Esta modificação da topografia possui importante efeito na propagação de ondas e correntes que atuam na praia de Matinhos e, portanto, demandam uma simulação dos efeitos com maior detalhamento espacial.

Esta grade, que gera as informações de contorno para a Grade 3, possui 250x240 células (no sentido longitudinal e transversal à costa, respectivamente), com resolução espacial de 50m no sentido longitudinal e, no sentido transversal, a resolução varia de 10m próximo à linha de costa, aumentando gradativamente a resolução até os 100m nas células do contorno Leste, no oceano aberto. O uso de grades com espaçamento variável foi adotado para que haja uma melhor qualidade nos cálculos de velocidade na zona de arrebentação e ganho de tempo computacional com células maiores nas zonas mais profundas e que não possuem importância significativa na formação de correntes litorâneas.

A Grade 3 (Figura 39), mais refinada e com cobertura apenas para o litoral de Matinhos, foi implementada contendo 236 células no sentido longitudinal à costa e 238 células sentido mar adentro. Assim como na Grade 2, esta grade utiliza resolução variável transversalmente à praia, gradando de 5m na linha de costa até 45m no contorno que faz fronteira com o oceano aberto. Paralelamente à praia, a grade possui 20m, cobrindo, assim, uma faixa de areia de aproximadamente 5km.

A validação dessas duas grades foi realizada por Moreira (2019), onde o autor comparou os resultados da maré observada por uma estação maregráfica instalada no interior da baía de Guaratuba com os resultados de nível calculados pelo MOHID entre os meses de junho e agosto de 2018. Após a comparação entre os dados observados e calculados, o autor determinou um coeficiente de correlação (R^2) de 0.90 e valor da raiz do erro quadrático médio (RMSE) na ordem de 0.11 m, indicando, portanto, uma boa capacidade do modelo em reproduzir os efeitos da oscilação da maré nas grades implementadas. O esquema de aninhamento das grades com a localização dos principais pontos geográficos e dados utilizados para implementação e validação é mostrado na Figura 40.

O acoplamento entre os modelos foi realizado através de rodadas intercaladas entre o SWAN e MOHID, com uma hora de intervalo entre cada troca de informações

Grade 2 - Domínio Guaratuba

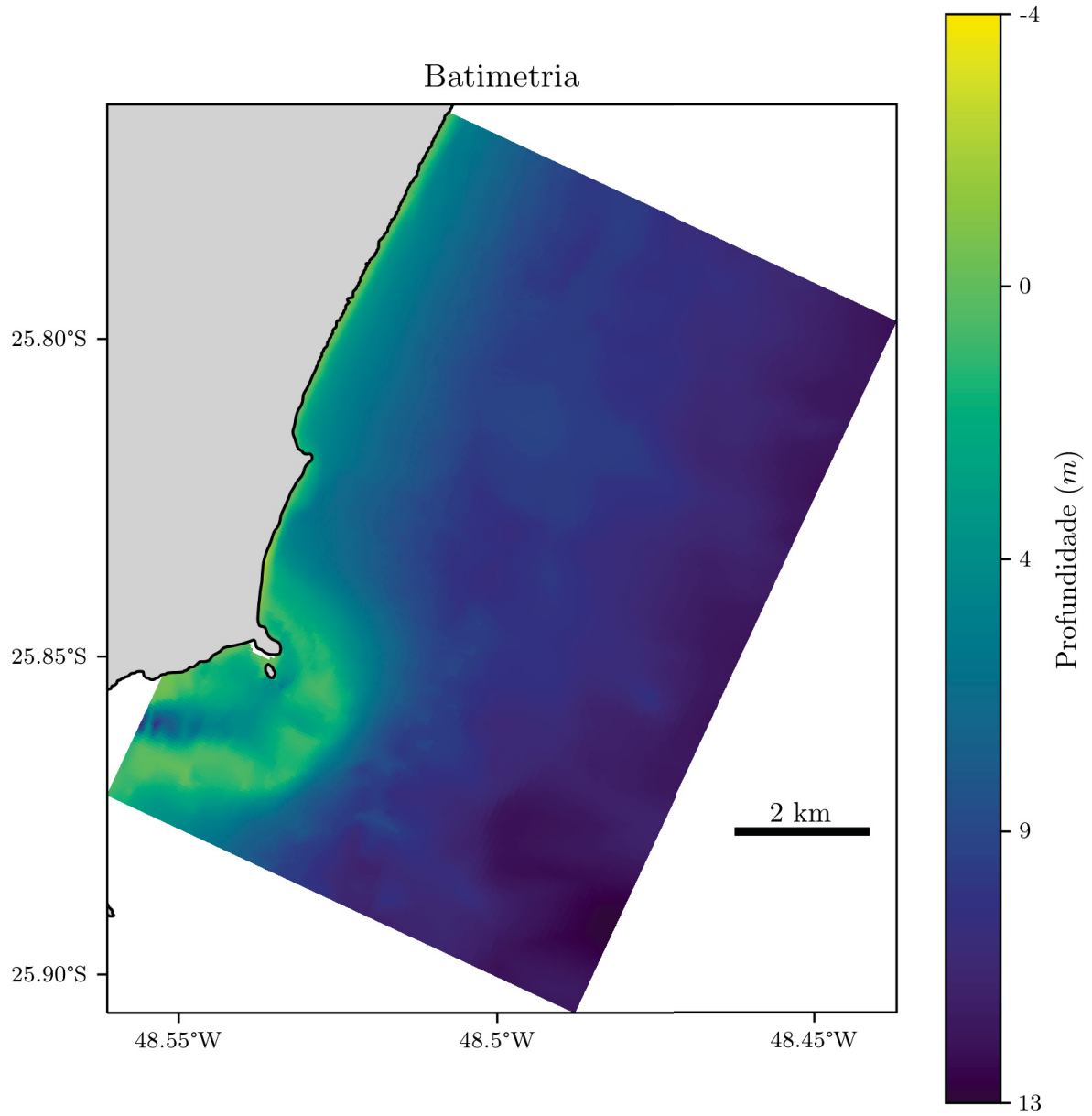


Figura 38 – Batimetria interpolada para a Grade 2 – Guaratuba

Grade 3 - Domínio Matinhos

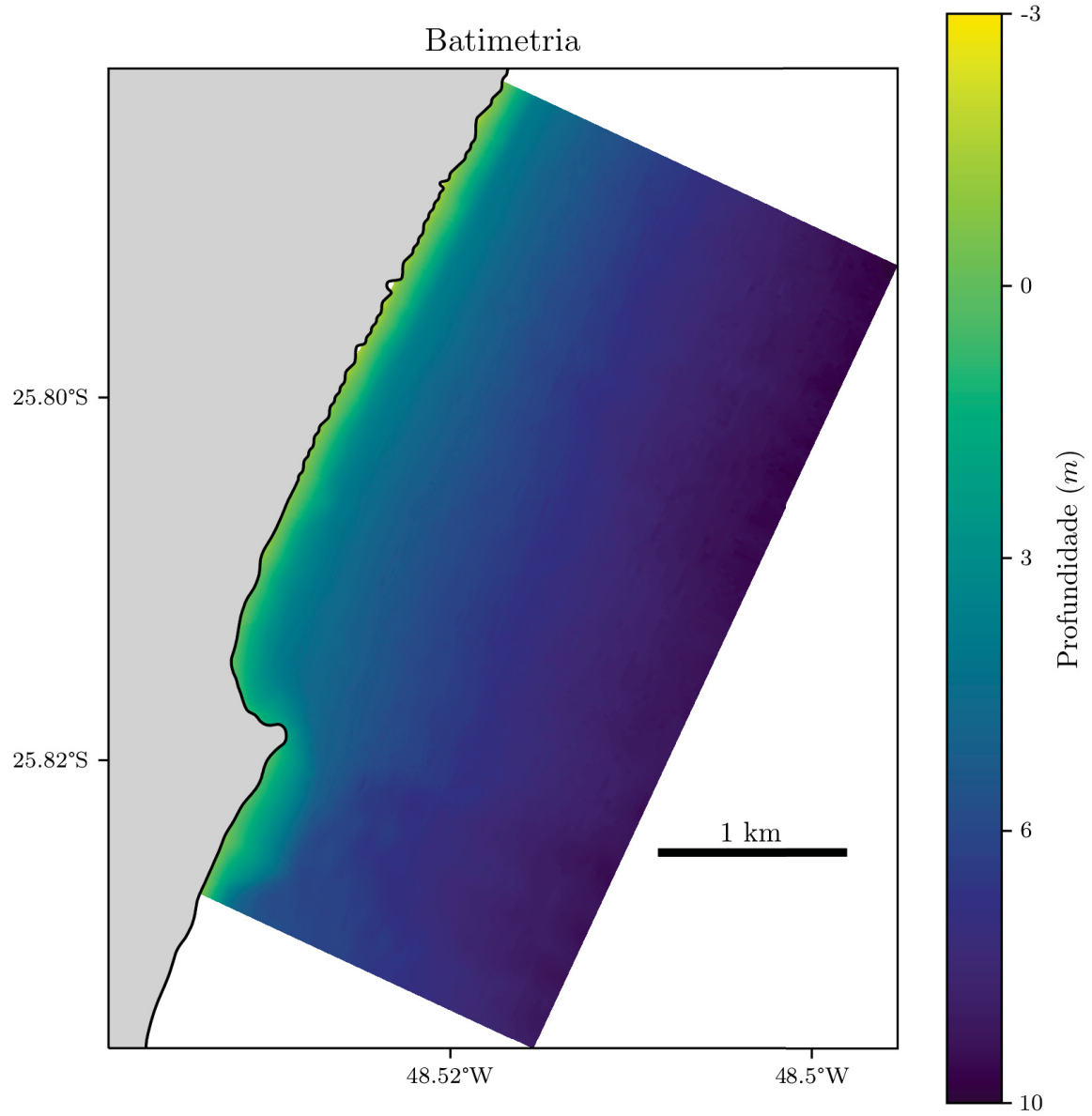


Figura 39 – Batimetria interpolada para a Grade 3 – Riviera

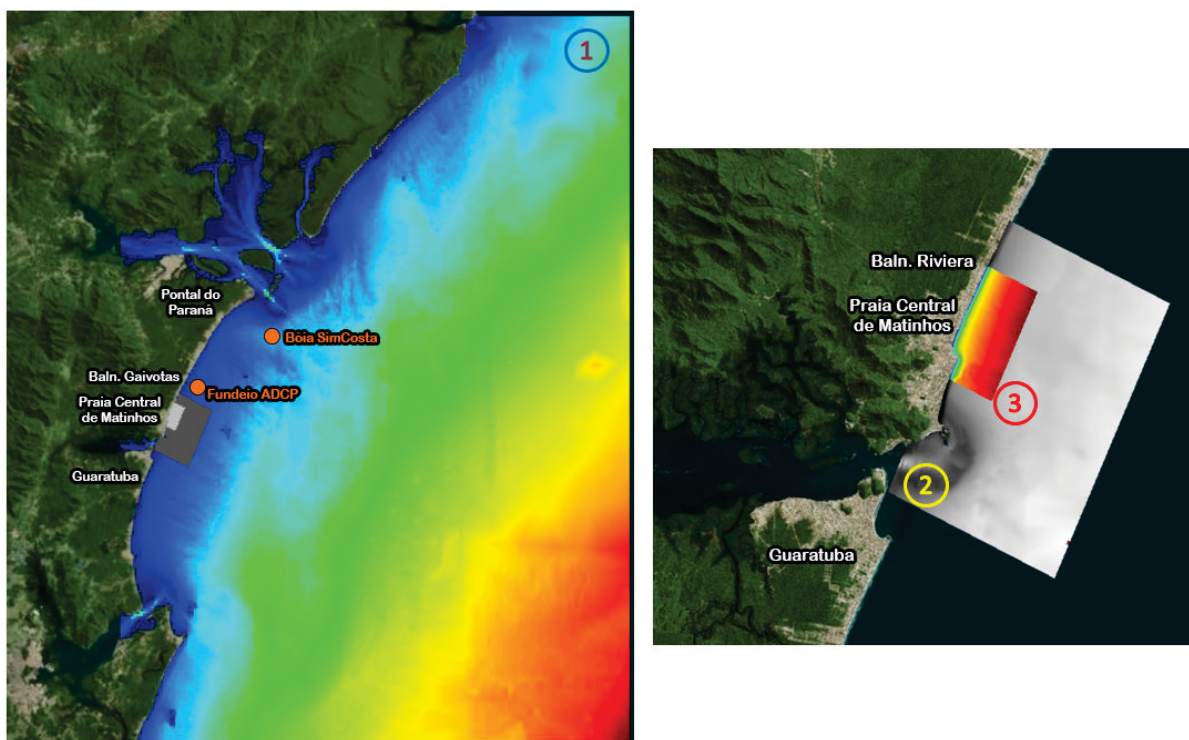


Figura 40 – Espacialização das três grades implementadas: 1) SWAN 500m; 2) Domínio Guaratuba; e 3) Domínio Matinhos

entre os modelos. Assim, partindo do passo de tempo inicial, a primeira etapa é rodar o SWAN: os parâmetros de onda (altura significativa, período, comprimento, direção, máxima velocidade orbital e estresse das ondas) calculados para este passo de tempo são convertidos para o formato do MOHID e repassados como condição inicial para o modelo hidrodinâmico, que efetua a simulação para o mesmo passo de tempo. Em seguida, os dados do nível d'água no contorno da grade calculados no último instante de simulação são convertidos para o formato do SWAN e fornecem a variação da maré para iniciar a rodada do próximo passo de tempo, atualizando a profundidade e consequentemente a área de quebra das ondas, conforme o esquema já apresentado na seção I, Figura 16.

Visando facilitar e operacionalizar as rodadas intercaladas, aprimorou-se uma ferramenta em *python* responsável pela atualização de datas dos arquivos, conversão entre diferentes formatos, armazenamento dos resultados e pós-processamento. Os parâmetros necessários para as simulações acopladas são inseridos em um arquivo através do uso de palavras-chave (*keywords*) no mesmo padrão utilizado pelo MOHID, de modo a facilitar o entendimento. Este arquivo é lido pela rotina do *python*, que faz o gerenciamento dos arquivos e roda ambos modelos de acordo com as configurações inseridas pelo usuário.

4.3.2 Validação – Grade 1 – SWAN 500 m

Tendo em vista a limitação encontrada por Moreira (2019) na representação da direção das ondas simuladas pela Grade 1 quando comparadas com dados registrados

pela bóia do SimCosta no litoral Paranaense, utilizou-se uma nova abordagem para a inserção dos dados de condição de contorno provenientes do modelo WW3, deixando de ser feita através de um arquivo de espectro de ondas para arquivos de segmentos com séries temporais calculadas nas células localizadas na região do contorno da Grade 1. Portanto, uma nova validação foi realizada comparando os dados de altura significativa de onda (H_s), período médio (T_m) e direção média (D_m) das ondas entre 15/01/2015 a 12/05/2015, período no qual coincidiram os dados de GFS para simulação das ondas e operação da bóia SiMCosta PR. Os dados observados e calculados para o período analisado estão plotados na Figura 41:

Analisando os resultados, é possível verificar a capacidade do modelo em reproduzir as oscilações na altura significativa e direção das ondas com boa precisão, com picos semelhantes aos medidos pela bóia em grande parte dos casos. Os valores médios e máximos também se mostraram comparáveis entre os dados em todos os parâmetros. A Tabela 9 apresenta os valores de média e máxima para a altura significativa e período médio das ondas, ocorrendo uma super estimativa do SWAN de aproximadamente 11% para o valor máximo de H_s e cerca de 20% para os valores de período médio e máximo.

Com relação às direções das ondas simuladas e observadas, a Figura 42 mostra a relação entre intensidade (H_s) e frequência para cada quadrante de propagação das ondas medidas pela bóia SiMCosta PR e simulados pelo SWAN. Ambos conjuntos de dados indicam a predominância de deslocamento das ondas oriundas de SE e ESE – cerca de



Figura 41 – Comparação entre dados medidos pela bóia SiMCosta PR e calculados pelo SWAN

Tabela 9 – Comparação entre valores médio e máximo de altura significativa ($\overline{H_s}$, $H_{smáx}$) e período ($\overline{T_m}$, $T_{mmáx}$) de ondas observados e calculados

	SiMCostaPR	SWAN
$\overline{H_s}$	1.02 m	1.00 m (-1.96%)
$H_{smáx}$	2.26 m	2.52 m (+11.50%)
$\overline{T_m}$	4.84 s	5.68 s (+17.35%)
$T_{mmáx}$	7.60 s	9.38 s (+23.42%)

64% das ondas observadas e calculadas se deslocaram dessas direções, sendo a direção SE a mais frequente (35.51% das ondas observadas e 44.19% das ondas calculadas). A direção SSE foi a terceira mais frequente no período analisado, sendo responsável por 19.57% dos dados registrados pela bóia e 18.15% das ondas simuladas pelo SWAN. A direção E também demonstrou importância nos dois conjuntos de dados: 14.61% e 15.65% das ondas observadas e calculadas, respectivamente. As demais direções não apresentaram registros significativos.

A boa correlação entre as direções registradas na bóia SiMCosta e calculadas pelo SWAN durante o mesmo período de tempo demonstram a capacidade do modelo em fornecer a direção correta de deslocamento das ondas simuladas em uma região já considerada rasa e próxima ao banco da Galheta, uma área que está sujeita ao efeito da refração das ondas conforme verificado por Noernberg (2001), o que indica uma boa eficiência do modelo na simulação de processos que transformam a onda gerada em alto-mar quando se aproximam da costa.

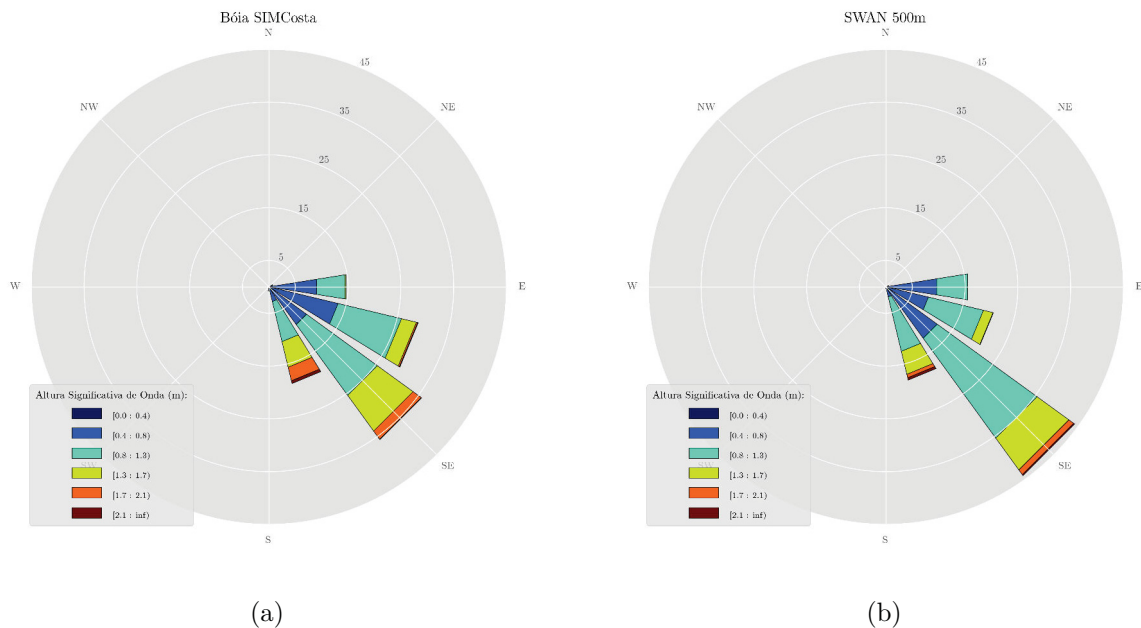


Figura 42 – Gráficos de Intensidade vs. Frequência de ondas observados pela bóia SiMCosta PR (a) e calculados pelo SWAN (b)

Para avaliação estatística dos dados, os instantes de tempo calculados pelo modelo foram interpolados linearmente para gerar dados nos mesmos instantes onde ocorreram as

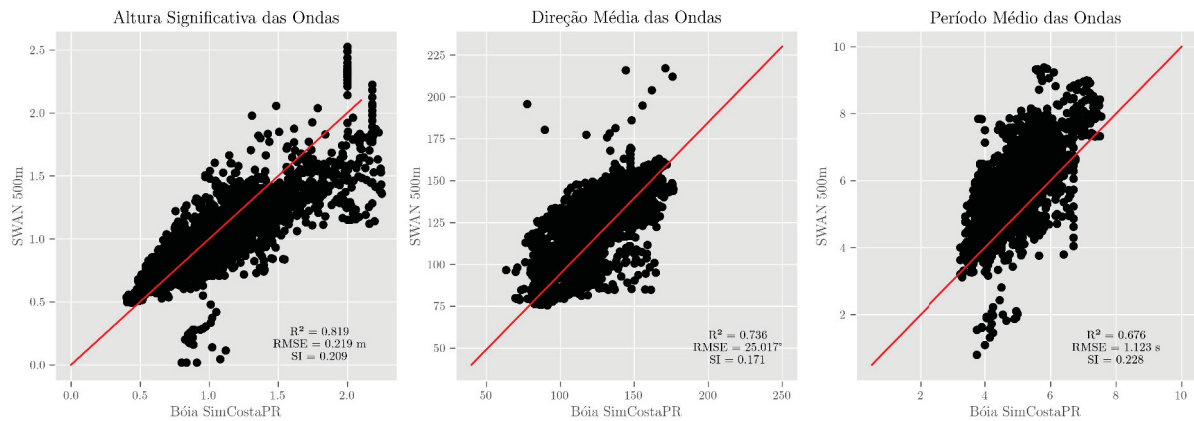


Figura 43 – Gráficos de dispersão com avaliação estatística entre dados observados e calculados

medições pela bóia SimCosta PR, de modo a tornar possível a comparação entre dados no mesmo instante de tempo.

A Figura 43 mostra o gráfico de dispersão relacionando os dados calculados pelo SWAN e observados pela bóia nos mesmos instantes de tempo juntamente com uma linha na 1:1 para identificar tendências de super ou subestimativa dos dados. Com relação ao coeficiente de determinação, o parâmetro com melhor desempenho foi a altura significativa (H_s), com $R^2 = 0.819$. A direção média das ondas (D_m) resultou em $R^2 = 0.736$ e o período médio (T_m) com $R^2 = 0.676$.

Com relação aos valores da raiz quadrada do erro médio, o $RMSE$ foi de 0.219 m para H_s , o que corresponde a 9.6% do valor máximo observado e de 1.123 s referente ao período médio das ondas (14.7% do $T_{m\text{máx}}$ observado). Em relação à direção média, o valor de $RMSE$ foi de 25.017° . Quando normalizado os valores de $RMSE$ em relação à média dos dados observados, o coeficiente adimensional SI foi de 0.209, 0.171 e 0.228 para os parâmetros H_s , D_m e T_m , respectivamente.

A diminuição da precisão pode ter sido afetada por uma série de medidas que se deslocaram da área de concentração dos pontos, podendo ser classificadas como outliers, onde os valores de H_s e de T_m foram subestimados pela metade pelo modelo em relação ao observado pela boia, enquanto os dados de direção (D_m) se deslocaram da direção próxima de N para O entre os dados observados e simulados. Esta discrepância entre os dados podem estar relacionadas tanto a imprecisão dos sensores da boia em um determinado instante de tempo quanto a erros na estimativa do vento pelo modelo GFS.

Apesar disso, Ris et al. (1999), desenvolvedores do SWAN, em seu trabalho para verificar a precisão do modelo na simulação de ondas, analisaram cinco casos reais com diferentes configurações de batimetria e grade, aplicando os coeficientes $RMSE$ e SI para comparar os dados simulados e calculados. Os autores encontraram valores médios do $RMSE$ de 0.30 m para H_s e de 0.7 s para T_m , enquanto os valores máximos foram de 0.47 m (H_s) e 1.0 s (T_m). Já os valores do coeficiente SI resultaram em uma média de 0.37 (H_s) e 0.2 (T_m), com máximos de 0.77 para altura significativa e 0.32 para o período médio das

ondas, o que indica um bom desempenho dos resultados obtidos quando comparados aos testes prévios realizado pelos autores em outras áreas de estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação de Desempenho do Derivador

5.1.1 Teste Estático GNSS

Após a análise dos dados, primeiramente avaliou-se a qualidade dos registros. Com relação à quantidade de satélites disponíveis durante a realização do teste, o sensor Neo-6M obteve uma média de 9 satélites simultâneos, com uma aquisição máxima de 10 satélites, enquanto o Neo-7M registrou uma média de 8.68 satélites também com um máximo de 10 conexões simultâneas, valores mais que suficientes visto que são necessários 4 satélites disponíveis simultaneamente para uma boa precisão do posicionamento.

O parâmetro da dispersão da precisão horizontal (HDOP) apresentou uma média de 0.95 para o Neo-6M (*máx.* 1.21) enquanto o sensor Neo-7M teve um HDOP médio de 1.03 (*máx.* 1.3). Esses valores indicam uma excelente qualidade de posicionamento de acordo com o fabricante dos sensores, que classifica como ótimo registros com $HDOP < 1.5$, enquanto valores superiores a 4.5 possuem baixa precisão de posicionamento, resultando em posições não confiáveis.

A Tabela 10 apresenta os valores do Erro Médio Absoluto (MAE), Desvio Padrão (STD) e máximo absoluto registrado para os dois sensores GNSS utilizados e considerando o resíduo em relação à latitude (y) e longitude (x) médias, com os gráficos de dispersão apresentados na Figura 44.

Ambos sensores registraram um erro médio absoluto inferior a $2m$ nos eixos de latitude e longitude, indicando uma imprecisão inferior ao sugerido pelo fabricante ($2.5m$). Os valores máximos superaram este erro do manual para o eixo y no sensor Neo-6M e eixo da x no Neo-7M. Entretanto, esses valores máximos foram resultantes de oscilações pontuais, estando 90% dos registros com um resíduo inferior a 2.5 em relação à posição média. O desvio padrão permaneceu abaixo de $1m$ em quase todos os parâmetros analisados, tendo registrado $1.22m$ para os valores de latitude no sensor Neo-6M.

Os valores de posicionamento horizontal encontrados durante o teste estático indicam uma boa precisão de ambos os sensores, principalmente para a representação de

Tabela 10 – Parâmetros estatísticos calculados para os resíduos no eixo das latitudes (x) e longitudes (y) durante o teste estático

	Sensor GNSS					
	Neo-6M			Neo-7M		
	MAE	STD	Máx. (<i>abs.</i>)	MAE	STD	Máx. (<i>abs.</i>)
dx (lon)	1.11m	0.64m	2.58m	1.06m	0.74m	4.00m
dy (lat)	1.78m	1.22m	6.20m	0.47m	0.41m	2.45m

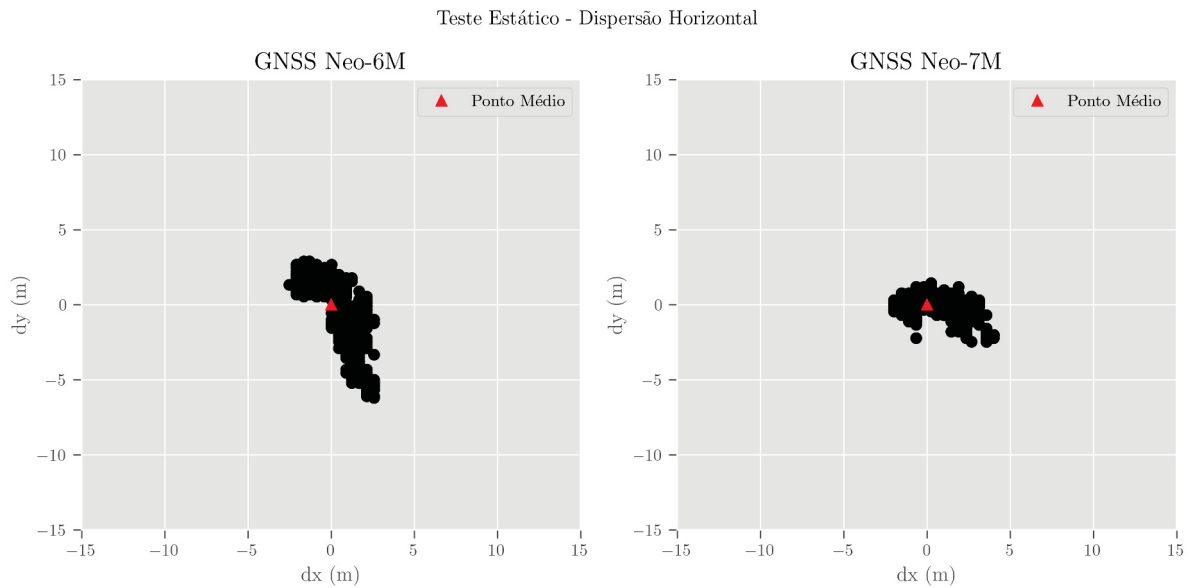


Figura 44 – Gráficos de dispersão da posição horizontal dos sensores Neo-6M e Neo-7M em relação ao ponto médio durante o teste estático

velocidades médias, uma vez que os valores máximos encontrados foram registros pontuais e são diluídos quando considerada a média entre um intervalo de tempo.

Ainda, os valores encontrados são comparáveis aos verificados por outros autores. Sabet e Barani (2011) também realizaram a validação estática para avaliar a qualidade do GNSS não-diferencial utilizado em seu derivador, tendo calculado um desvio de padrão para o eixo y de $1.0m$ (máx. $3.8m$) e no eixo x de $1.3m$ (máx. $4.0m$). O trabalho desenvolvido por Johnson et al. (2003) também corrobora com os resultados obtidos neste trabalho, com $STD_y = 1.6m$ (máx. $5.2m$) e $STD_x = 1.3m$ (máx. $4.2m$).

Com relação às velocidades, a Tabela 11 resume os principais parâmetros estatísticos calculados a partir do registro de velocidades dos sensores GNSS Neo-6M e Neo-7M durante o teste estático, com os gráficos de dispersão ilustrados na Figura 45. Os valores do erro médio absoluto (MAE) permaneceram abaixo de $2cm/s$ para ambos os sensores considerando as componentes u e v e também a magnitude da velocidade, indicando um erro médio consideravelmente menor que o indicado pelas especificações dos sensores ($10cm/s$) e compatível com os valores encontrados por Kumar et al. (2020) utilizando um GPS diferencial com alta frequência ($MAE = 2cm/s$ e $STD = 0.4cm/s$).

Tabela 11 – Parâmetros estatísticos calculados para a variação das componentes u e v e magnitude das velocidades registradas durante o teste estático

	Sensor GNSS					
	Neo-6M			Neo-7M		
	MAE	STD	Máx. (abs.)	MAE	STD	Máx. (abs.)
u (lon)	0.40cm/s	0.91cm/s	7.04cm/s	0.24cm/s	0.55cm/s	3.01cm/s
v (lat)	1.14cm/s	1.53cm/s	13.00cm/s	0.73cm/s	0.93cm/s	5.98cm/s
Vel. (mag.)	1.45cm/s	1.12cm/s	13.00cm/s	0.93cm/s	0.67cm/s	5.98cm/s

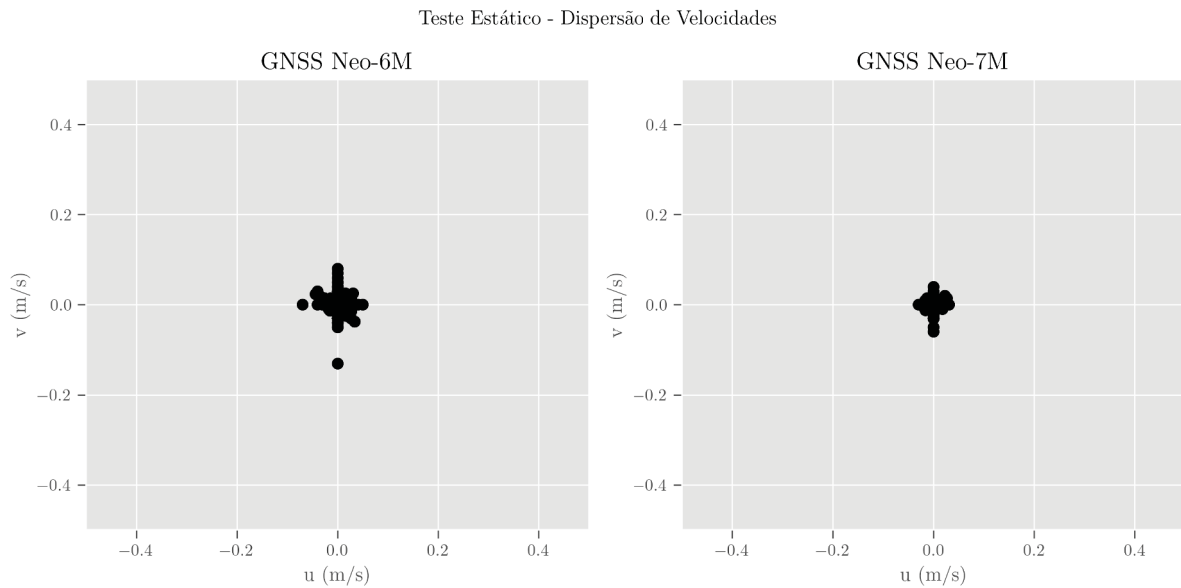


Figura 45 – Gráficos de dispersão das componentes de velocidade dos sensores Neo-6M e Neo-7M durante o teste estático

O desvio padrão das velocidades superou a faixa de 1cm/s apenas para a componente v e a magnitude registradas pelo sensor Neo-6M, mesmos parâmetros que registraram uma velocidade máxima acima de 10cm/s . Entretanto, em 95% dos registros, o sensor Neo-6M registrou velocidade inferior a 3cm/s , enquanto o Neo-7M permaneceu 95% do período de amostragem com registro de velocidade abaixo de 2cm/s . Portanto, sendo o objetivo do equipamento a aquisição de velocidades médias de correntes, ambos sensores apresentaram uma precisão satisfatória para registro de velocidades e consideravelmente melhores do que as especificações técnicas do fabricante.

5.1.2 Teste Cinemático GNSS

A Tabela 12 sintetiza a comparação entre as velocidades médias calculadas pela cronometragem da distância percorrida e pelo GNSS para todas as parciais registradas. O tempo de deslocamento das parciais variou entre 65 e 267 segundos, com a velocidade média variando entre 0.41 e 1.45 m/s , e não foram verificadas diferenças na precisão do GNSS de acordo com o tempo de deslocamento, indicando que o sensor pode fornecer velocidade média confiável mesmo em períodos curtos de tempo (1 minuto).

Através da aplicação de uma regressão linear, foi identificado um alto coeficiente de correlação entre as velocidades médias cronometradas ($R^2 = 0.997$), indicando uma excelente precisão do sensor GNSS na representação de velocidades médias. Analisando a Figura 46 contendo a dispersão dos pontos da regressão plotados com uma reta perfeita ($x = y$), é possível verificar uma pequena tendência de super estimativa das velocidades obtidas pelo derivador em relação ao cronômetro, porém esta tendência pode estar relacionada a pequenos erros na cronometragem das distâncias e não algum efeito do sensor em

Tabela 12 – Comparação entre velocidades médias calculadas pela cronometragem do tempo de deslocamento e registradas pelo sensor GNSS para os mesmos instantes de tempo

Vm Cron. (m/s)	Vm GNSS (m/s)	Vm Cron. (m/s)	Vm GNSS (m/s)	Vm Cron. (m/s)	Vm GNSS (m/s)	Vm Cron. (m/s)	Vm GNSS (m/s)	Vm Cron. (m/s)	Vm GNSS (m/s)
0.41	0.41	-	-	-	-	-	-	-	-
0.44	0.45	-	-	-	-	-	-	-	-
0.66	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-
0.58	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
1.18	1.18	-	-	-	-	-	-	-	-
0.77	0.81	-	-	-	-	-	-	-	-
0.68	0.74	-	-	-	-	-	-	-	-
1.01	1.02	-	-	-	-	-	-	-	-
1.43	1.46	-	-	-	-	-	-	-	-
0.81	0.84	0.83	0.85	-	-	-	-	-	-
1.43	1.44	1.41	1.42	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	0.75	0.75	-	-	-	-
-	-	-	-	1.42	1.42	-	-	-	-
1.05	1.06	1.09	1.08	1.13	1.13	1.14	1.15	1.15	1.17
1.45	1.47	1.17	1.17	1.33	1.33	1.05	1.09	1.12	1.15
P1 (100m)		P2 (200m)		P3 (400m)		P4 (600m)		P5 (800m)	

apresentar velocidade superior.

Para verificar a capacidade do sensor GNSS em detectar mudanças na velocidade, o último caminhamento abrangendo uma distância de 800m (última linha da Tabela 12) foi realizado com diferentes ritmos de caminhada, variando a velocidade média entre 1.05m/s (P4) e 1.45m/s (P1).

Nesse teste, foi possível avaliar o desempenho da aplicação de um filtro para suavizar ruídos registrados pelo GNSS que podem estar relacionados tanto aos erros do sensor como devido à variação brusca no corpo do derivador que gera velocidades irreais. Assim, baseado nos resultados obtidos que indicaram uma boa precisão na representação de velocidades médias com cerca de 1 minuto de intervalo, foram aplicadas médias móveis com uma janela de 60s. primeiramente no sentido positivo da série temporal e depois no sentido negativo, resultando no chamado filtro zero-fase. Essa técnica é importante para evitar a defasagem que ocorre quando utilizado médias móveis em séries temporais, atrasando (no sentido positivo) ou adiantando (sentido negativo) a resposta da curva.

Analisando a Figura 47, é possível perceber que o sensor GNSS apresentou uma resposta praticamente imediata à variação brusca da velocidade em todas as parciais. Ainda, a aplicação do filtro zero-fase (linha azul) reduziu consideravelmente os ruídos sem afetar os valores das velocidades médias de cada parcial e permaneceu muito próximo à linha da velocidade média cronometrada (linha vermelha) durante todo o período do caminhamento. Na parcial P4, a velocidade do GNSS mesmo filtrada foi ligeiramente superior ao valor médio cronometrado. Essa diferença, de cerca de 0.04m/s representa uma super estimativa de 3.8% e, como já mencionado anteriormente, pode estar relacionada à

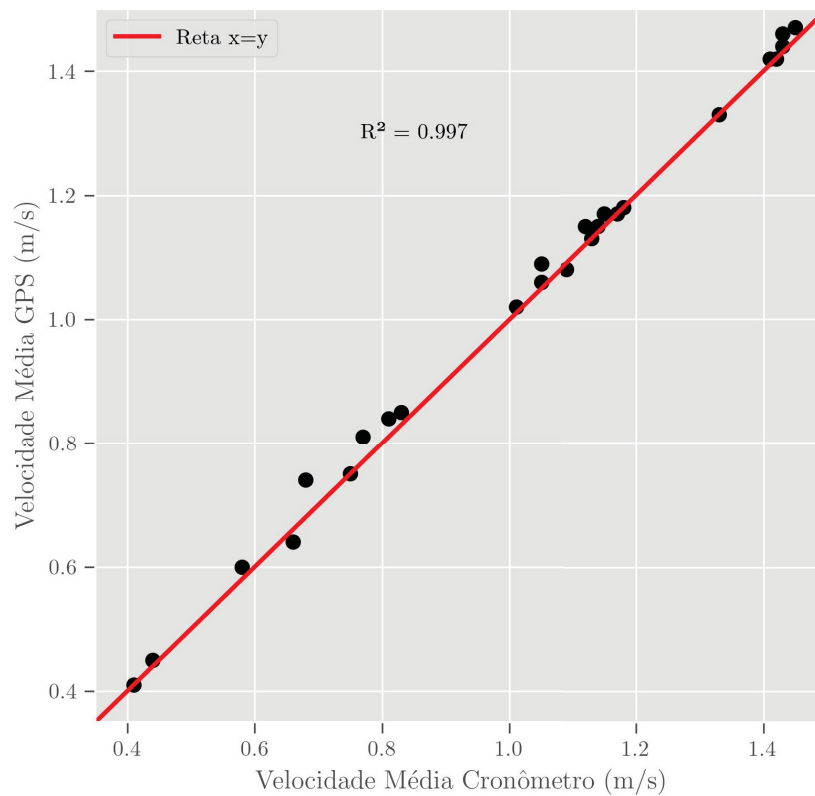


Figura 46 – Gráfico relacionando velocidades médias calculadas pelo método de cronometragem e obtidas pelo sensor GNSS durante o teste cinemático com ajuste de reta de regressão linear

pequenos erros na cronometragem do percurso.

O teste cinemático, portanto, foi capaz de identificar uma excelente correlação entre a velocidade média real e a calculada pelo sensor GNSS, e vai ao encontro dos resultados obtidos por Sabet e Barani (2011), onde os autores utilizaram um veículo autônomo que se deslocou a uma velocidade constante de 0.58m/s por uma distância de 150m com dois derivadores embarcados, tendo registrado com os equipamentos velocidades médias de 0.58m/s e 0.59m/s durante o trajeto, comprovando, assim, a hipótese de Witte e Wilson (2004) de que um aparelho GNSS não-diferencial pode ser altamente preciso na aquisição de velocidades médias mesmo em pequenas distâncias e intervalos de tempo.

5.1.3 Teste em Canal - Comparação entre GNSS e ADCP

O último teste para avaliação do sensor GNSS teve como objetivo verificar a capacidade do derivador em representar velocidades médias de correntes. O tempo de deslocamento dos 25 lançamentos realizados variou entre 22 e 58 segundos, com a velocidade média registrada pelo GNSS variando entre um mínimo de 0.20m/s e um máximo de 0.56m/s . Com relação aos valores calculados pelo ADCP nos mesmos instantes dos lançamentos, as velocidades médias variaram entre 0.10m/s e 0.59m/s .

Ao analisar os dados medidos pelo derivador e pelo ADCP em uma regressão linear,

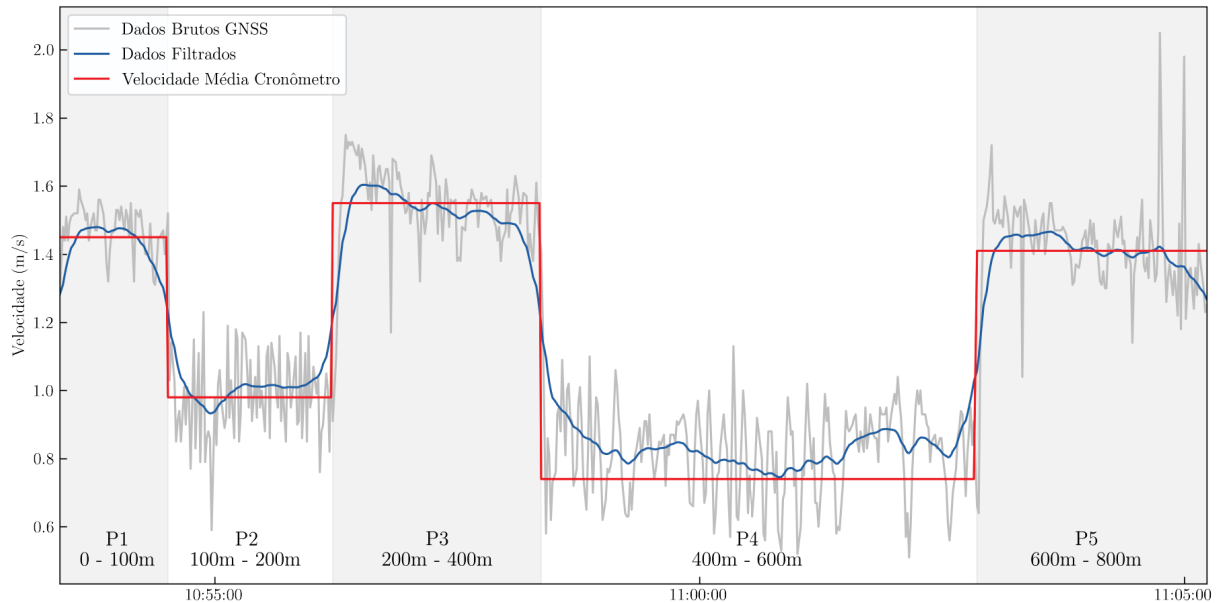


Figura 47 – Gráfico de variação das velocidades médias cronometradas e obtidas pelo GNSS durante caminhada de 800m

chegou-se a um coeficiente de correlação (R^2) de 0.806 com um desvio padrão do resíduo das velocidades ($|Vm_{ADCP} - Vm_{Deriv}|$) de $0.034m/s$ ($3.4cm/s$). Quando plotados os pontos utilizados para regressão juntamente com uma reta $x = y$ (Figura 48), foi possível verificar uma tendência de super estimativa da velocidade registrada pelo derivador quando a intensidade do escoamento foi mais baixa ($< 0.25m/s$), enquanto para velocidades maiores, uma parte considerável dos lançamentos registrou uma média inferior ao calculado pelo ADCP, indicando uma tendência de sub estimativa pelo GNSS.

Apesar de alguns lançamentos considerarem a velocidade média em curtos espaços de tempo, não foi identificada uma maior imprecisão, indicando uma boa representação da velocidade média considerando janelas de tempo inferiores aos 60 segundos adotados no teste anterior de caminhada. Os maiores erros, entretanto, foram relacionados à regimes de escoamento menos intensos, o que estão relacionados às imprecisões do GNSS verificadas no teste estático.

Além das possíveis imprecisões do GNSS, a comparação entre os dados medidos pelo derivador e pelo ADCP possuem limitações que também afetam a qualidade dos resultados, por se tratar da comparação de velocidades Lagrangianas com Eulerianas, onde torna-se impossível ambos equipamentos medirem uma mesma parcela de fluido no mesmo instante de tempo, além da variação espacial na velocidade que o método Lagrangiano permite verificar

Ao se comparar com estudos similares, Sabet e Barani (2011) utilizaram abordagem semelhante comparando 12 registros de velocidades médias adquiridas por um derivador portando GNSS não-diferencial e registradas por um correntômetro acústico simultaneamente com intensidades variando entre $0.3m/s$ e $0.7m/s$, tendo encontrado um valor de $R^2 = 0.72$ com desvio padrão dos resíduos de $0.04m/s$ ($4cm/s$). Schmidt et al. (2003)

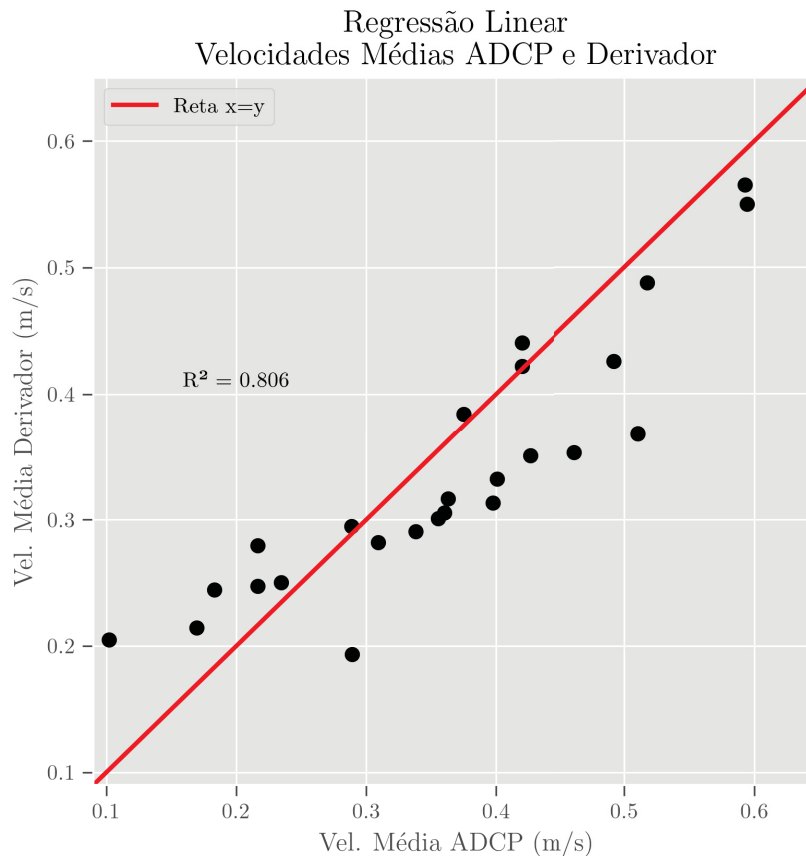


Figura 48 – Gráfico relacionando velocidades médias calculadas pelo correntômetro acústico ADCP M9 e pelo derivador com cálculo de coeficiente de correlação (R^2)

também realizou uma série de testes comparando velocidades registradas por um derivador portando GNSS diferencial (DGPS) com um correntômetro acústico tipo ADV, tendo encontrado coeficientes de correlação (R^2) entre 0.71 e 0.95.

Dessa forma, diante das dificuldades na comparação entre equipamentos que utilizam referenciais de velocidade diferentes e comparando com resultados obtidos em estudos prévios, foi possível verificar que o sensor GNSS de baixo custo utilizado apresentou uma boa correlação com as velocidades médias obtidas pelo ADCP, sendo capaz de representar o escoamento de correntes mesmo em um curto espaço de tempo e com baixas intensidades.

5.2 Amostragem de Dados na Praia Central de Matinhos

A aquisição de dados de correntes na zona de arrebentação ocorreu na região da Praia Central de Matinhos, área abrangida pelo sistema de modelagem numérica implementado por Moreira (2019) para tornar possível a comparação com os resultados do modelo nos mesmos períodos. Foram realizados três levantamentos com diferentes condições meteoceanográficas: um levantamento durante o verão; um em condição de pré-frontal, com passagem de uma frente fria no dia seguinte; e um último em condição de pós-frontal, ocorrido dois dias após a passagem de uma frente fria. Levantamentos

Tabela 13 – Velocidades média, máxima e desvio padrão de cada derivador antes e após filtragem dos dados

	D01		D02	
	Dados Brutos	Dados Filtrados	Dados Brutos	Dados Filtrados
Vel. Média (m/s)	0.66	0.66	0.70	0.71
Vel. Máxima (m/s)	4.20	1.23	3.17	1.53
Desvio Padrão (m/s)	0.42	0.20	0.44	0.26

durante a ocorrência de frentes e consequente ressaca não foram realizados por motivos de segurança no lançamento e recuperação dos equipamentos.

5.2.1 Amostragem de Verão - 19/02/2020

O primeiro lançamento dos derivadores na praia central de Matinhos foi efetuado no dia 19/02/2020, durante o verão, com o uso de dois equipamentos na zona de arrebenção, sob condições de vento e ondas moderados. Esta campanha também serviu como um teste para avaliar o desempenho dos aparelhos. Os dois derivadores foram lançados na zona de arrebenção ao mesmo tempo, percorrendo uma distância de cerca de 200m paralelamente à costa, e a seguir serão apresentados os principais resultados obtidos.

Com relação à quantidade de dados registrados, os derivadores apresentaram ausência de dados durante 1% e 7% do período de amostragem. O tempo máximo que um equipamento permaneceu sem registrar dados foi de 6 segundos, o que indica que as falhas estão relacionadas à rápidas perdas de sinal do GPS, provavelmente durante período submerso devido à passagem de ondas, não comprometendo a qualidade dos dados.

Devido à movimentos bruscos no corpo do derivador gerados pela turbulência presente na quebra de ondas, bem como imprecisões da posição do GPS quando submerso, o comportamento da variação da velocidade ao longo do tempo pode apresentar ruídos e alguns valores extremos (*outliers*). Dessa forma, os resultados gerados pelos derivadores foram filtrados utilizando o mesmo filtro com fase resultante zero utilizado no teste cinemático. O resultado da filtragem dos dados é apresentado na Figura 49

Analisando a Figura 49, é possível verificar que valores extremos de velocidade foram removidos, assim como variações bruscas da velocidade foram suavizadas pela aplicação do filtro. Esse procedimento, entretanto, não afetou a velocidade média da amostra, como apresentado na Tabela 13, indicando que o filtro atuou principalmente na suavização de valores extremos, provavelmente associados aos erros de medição citados anteriormente e que não representam valores reais, uma vez que correntes geradas por ondas variam, geralmente, entre 0.1 e 1.5 m/s (REINECK; SINGH, 2012).

Os dados de velocidade já filtrados foram relacionados com a direção do deslocamento medida pelo GPS, de modo a obter-se um diagrama com intensidade e frequência das correntes para cada sentido de propagação, conforme gráficos apresentados na Figura 50. De acordo com esta análise, ambos os derivadores apresentaram predominância

Praia Central de Matinhos - 19/02/2020

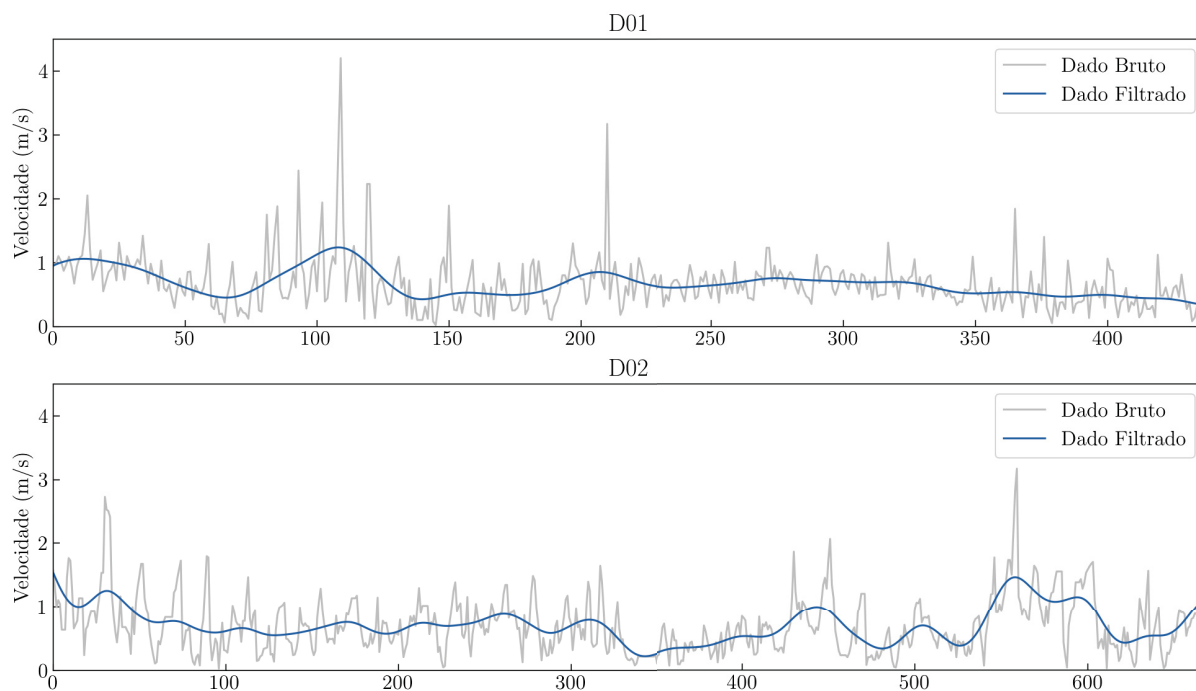


Figura 49 – Resultados da filtragem da velocidade comparando dados brutos com dados filtrados para a amostragem de 19/02/2020

de deslocamento no sentido paralelo à praia, entre os quadrantes de N-ENE (46% dos registros), demonstrando capacidade de aderirem à corrente longitudinal, que possui deslocamento preferencial nesta mesma direção como indicado por outros autores (ANGULO, 1992; MARONE et al., 1995; NOERNBERG, 2001).

Diferentemente da abordagem utilizada na caracterização das direções de ondas e ventos, na análise de correntes o diagrama indica a direção para qual o corpo está se deslocando, e não a direção proveniente. Assim, analisando a Figura 50, verifica-se que o deslocamento ocorreu preferencialmente para a área do quadrante N-E. Tanto o deslocamento no sentido da praia quanto deslocamento em demais sentidos fora do quadrante N-E identificados e que apresentam pequena frequência podem estar associados à erros devido a mudanças bruscas na posição do derivador causado pela quebra de ondas e imprecisão do GNSS durante períodos submersos, visto que os dados de direção não passaram pelo mesmo processo de filtragem que os dados de velocidade, pois este procedimento certamente suavizaria os valores mínimos e máximos da direção (próximo de 0° e de 360°), resultando em valores errôneos principalmente na direção Norte, que é a principal direção das correntes longitudinais.

Este erro afetaria justamente esta posição pois é possível que em um determinado instante o derivador tenha registrado um deslocamento na direção próximo de 1° e no instante seguinte registre deslocamento em 359° , pois ambos valores representam deslocamento para N, estando apenas em quadrantes diferentes. Ao aplicar um filtro baseado em médias móveis em ambos sentidos, o valor menor seria aumentado e o valor

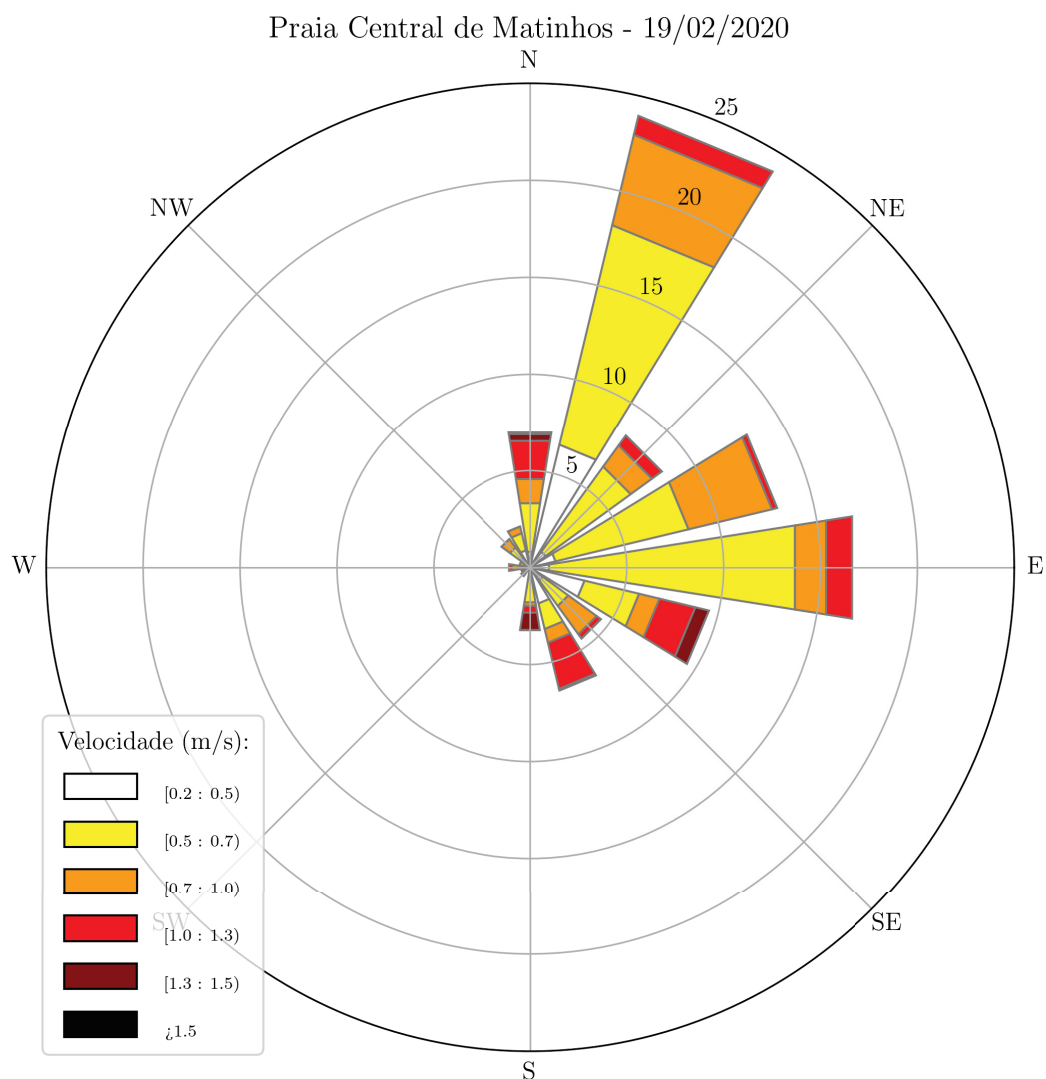


Figura 50 – Gráfico de distribuição de frequência e intensidade das velocidades dos dois derivadores lançados dia 20/02/2020

maior reduzido, gerando um valor de direção diferente do realmente ocorrido.

Com relação à presença de cerca de 13% dos dados do derivador D01 e 17% do equipamento D02 apresentarem deslocamento na direção oposta da praia, verificou-se através das imagens obtidas por *drone* que ambos os equipamentos foram transportados por uma corrente com comportamento semelhante à correntes de retorno, porém em menor escala, em locais semelhantes, conforme a zona destacada no mapa contendo a variação da velocidade de acordo com a posição dos derivadores (Figura 51), onde o círculo azul indica o deslocamento do D01 e círculo preto o D02.



Figura 51 – Mapa de distribuição espacial das velocidades instantâneas de ambos derivadores com destaque para localização de pontos com fluxos de retorno verificados em 19/02/2020

5.2.2 Amostragem em Pré-Frontal - 15/07/2021

Uma segunda campanha de amostragem foi realizada durante o período de inverno, no dia 15/07/2021, em um dia de ondulação moderada e em situação de pré-frontal, com a passagem de um sistema de frente-fria pelo litoral Paranaense no dia seguinte, sendo registrado uma velocidade média do vento no momento das amostragens na ordem de $3m/s$ ($10.8km/h$) e provenientes de SE, segundo dados da estação meteorológica do SIMEPAR instalada em Guaratuba. Para esta campanha, foram realizados lançamentos na praia central de Matinhos, próximo à desembocadura do rio Matinhos. A Tabela 14 sintetiza as velocidades obtidas durante o lançamento, com as séries temporais filtradas apresentadas na Figura 52.

Tabela 14 – Velocidades média, máxima e mínima em cada ponto de amostragem após filtragem dos dados

	Dados Brutos	Dados Filtrados
Vel. Média (m/s)	0.40	0.40
Vel. Máxima (m/s)	1.92	0.71
Desvio Padrão (m/s)	0.25	0.10

Ao analisar os gráficos de direção das correntes nesta campanha, verificou-se o deslocamento longitudinal à praia para Norte, com 33% dos registros entre as direções N e NE. Entretanto, durante esta amostragem predominaram os deslocamentos no sentido oposto à praia, formando correntes de retorno (Figura 53). Cerca de 50% dos registros

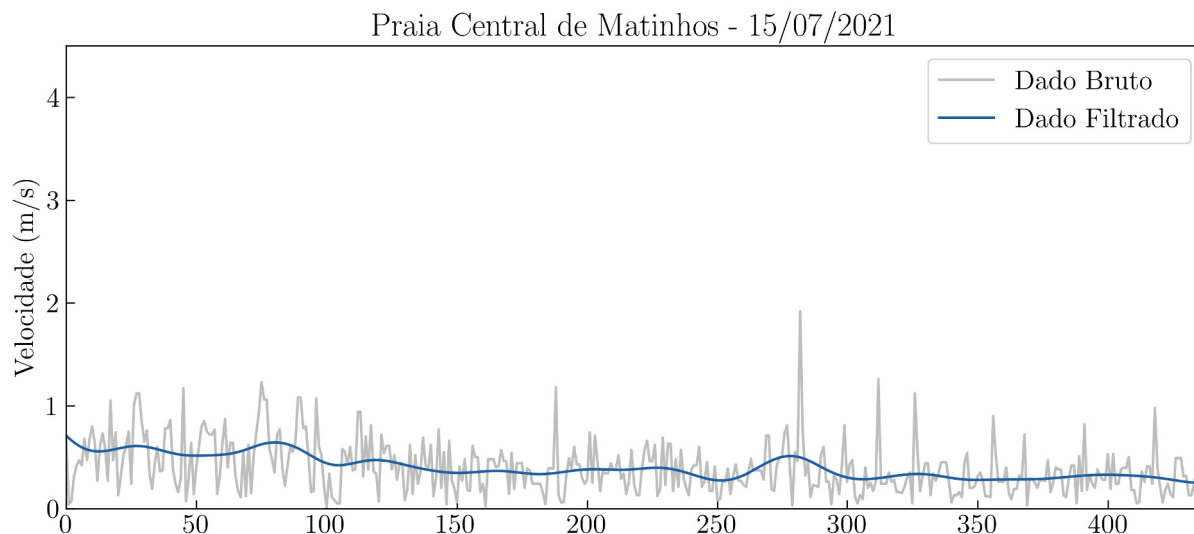


Figura 52 – Resultados da filtragem da velocidade comparando dados brutos com dados filtrados para a amostragem de 15/07/2021

ocorreram entre as direções ENE e ESE. Este padrão ocorreu, provavelmente, devido ao efeito do fluxo de maré vazante saindo pelo canal do rio Matinhos no momento da amostragem, que gerou as condições necessárias para as correntes longitudinais romperem a barreira da quebra das ondas e formassem escoamentos de retorno para o mar.

Este efeito da desembocadura na circulação litorânea pode ser verificado na Figura 54, onde são verificados dois pontos de correntes de retorno. Um primeiro logo após o lançamento do derivador, onde o mesmo se desloca mar adentro até começar a ser transportado por correntes longitudinais. Ao se aproximar do canal de desembocadura do rio Matinhos, as intensidades aumentam e o equipamento passa novamente a ser transportado perpendicularmente à praia, sendo resgatado para evitar o deslocamento para fora da zona de arrebentação.

5.2.3 Amostragem em Pós-Frontal - 21/05/2022

A campanha de campo do dia 21/05/2022 ocorreu dois dias após a passagem de um sistema frontal pela costa Paranaense que resultou em forte ondulação chegando até a costa. No momento da amostragem, a velocidade do vento registrada na estação meteorológica do SIMEPAR em Guaratuba foi de 3.2 m/s (11.5 km/h) com direção proveniente de SE. Os ventos registrados pela mesma estação no dia da passagem da frente fria (19/05) tiveram direção predominante de S com intensidade média de 5.4 m/s (19.4 km/h) com rajadas na ordem de 9.3 m/s (33 km/h).

Após o processamento dos resultados, os principais valores de velocidades encontrados são apresentados na Tabela 15. Quando combinados os dados dos dois derivadores lançados, a velocidade média após a filtragem para suavização de ruídos foi de 0.5 m/s, com valor máximo instantâneo de 0.95 m/s e desvio padrão de 0.1 m/s. A Figura 55

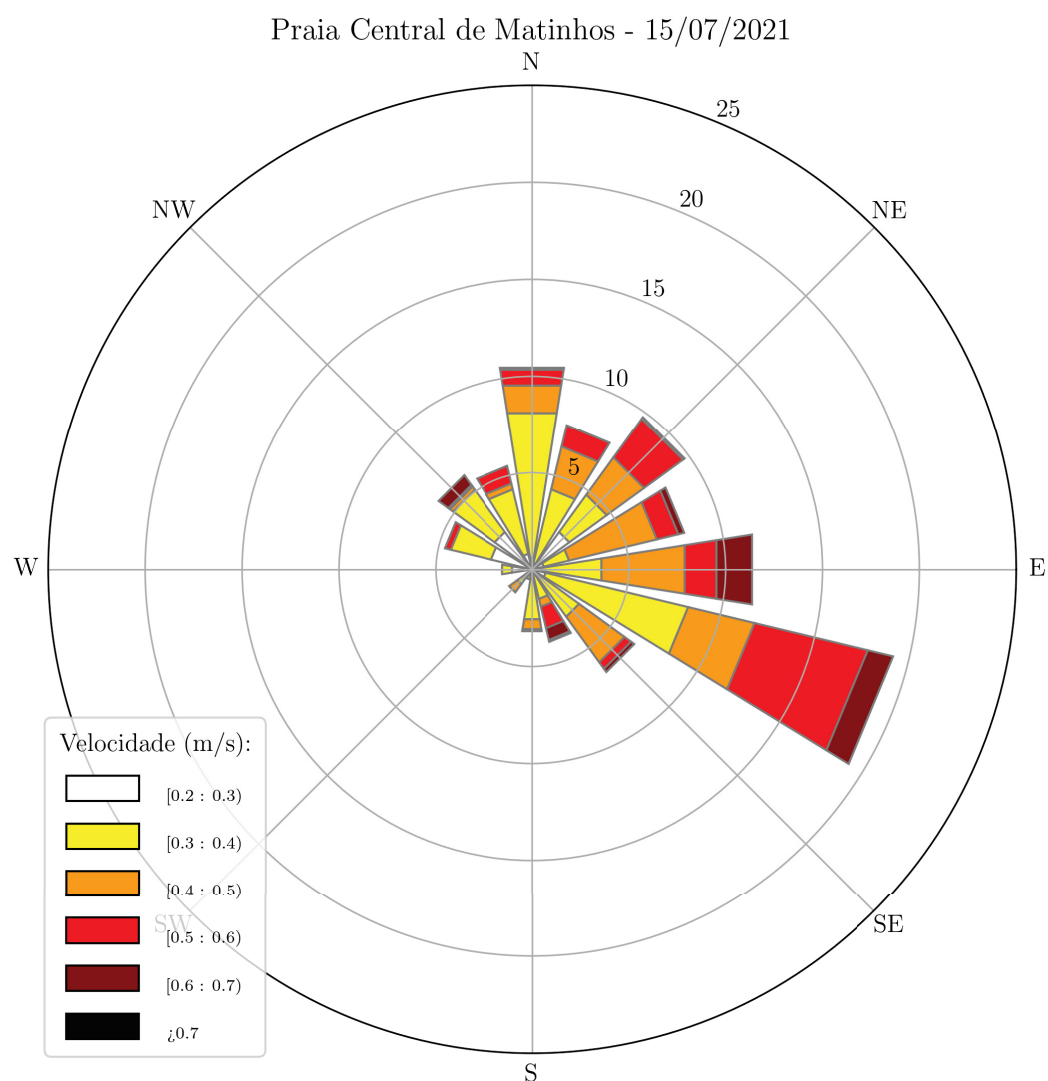


Figura 53 – Gráfico de distribuição de frequência e intensidade das velocidades dos dois derivadores lançados dia 15/07/2021

apresenta os resultados brutos e filtrados para ambos os equipamentos utilizados.

Ao analisar a direção do trajeto dos derivadores, esta campanha indicou uma predominância de deslocamento paralelamente à costa, com 62% dos registros indicando fluxo de correntes entre os quadrantes NW e NE, indicando uma componente longitudinal

Tabela 15 – Velocidades média, máxima e desvio padrão após filtragem dos dados medidos na campanha de 21/05/2022

	D01		D02	
	Dados Brutos	Dados Filtrados	Dados Brutos	Dados Filtrados
Vel. Média (m/s)	0.49	0.49	0.51	0.51
Vel. Máxima (m/s)	1.29	0.69	2.64	0.95
Desvio Padrão (m/s)	0.21	0.09	0.24	0.1



Figura 54 – Mapa de distribuição espacial das velocidades instantâneas medidas na campanha de 15/07/2021

Praia Central de Matinhos - 21/05/2022

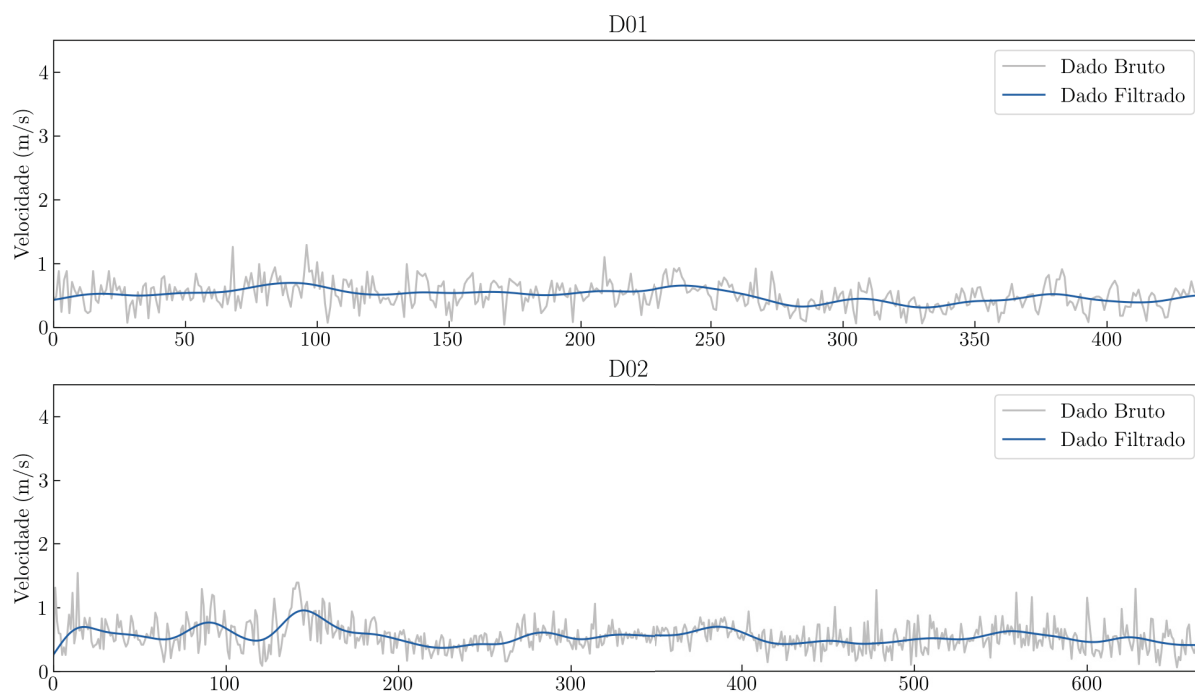


Figura 55 – Resultados da filtragem da velocidade comparando dados brutos com dados filtrados para a amostragem de 21/05/2022

de Sul para Norte como também verificado nas outras duas amostragens. O deslocamento perpendicular à costa se deu em 35% dos registros (entre ENE e SSE), sem ter sido identificados deslocamentos em direção à praia e para a direção Sul.

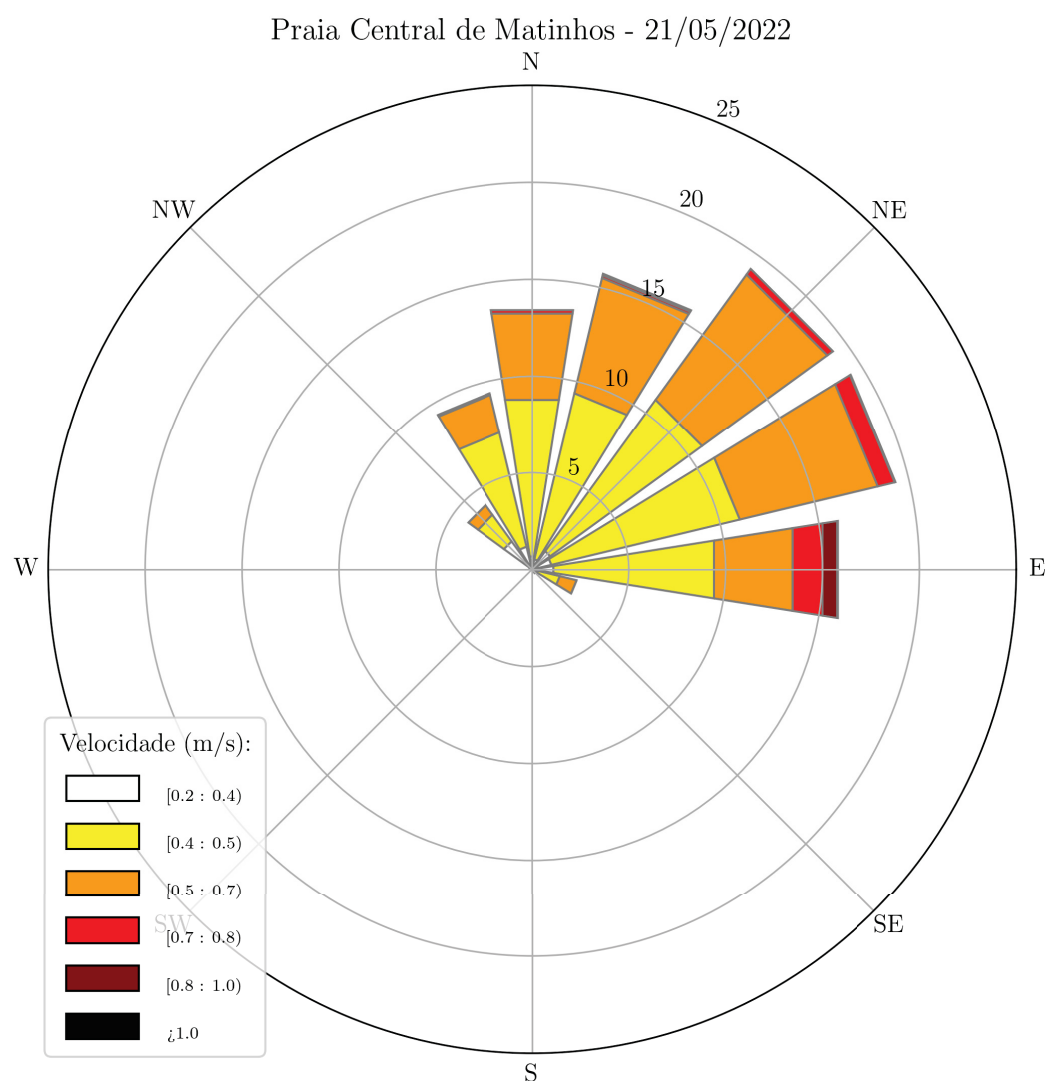


Figura 56 – Gráfico de distribuição de frequência e intensidade das velocidades dos dois derivadores lançados dia 21/05/2022

Ao se analisar a Figura 57, é possível verificar que, apesar de 35% dos registros indicarem o deslocamento perpendicular à costa, indicando correntes de retorno, o trajeto dos derivadores foi influenciado em todo o percurso por correntes longitudinais, com pequenos movimentos mar adentro porém que não caracterizam uma corrente de retorno, apenas oscilações devido à quebra de ondas.

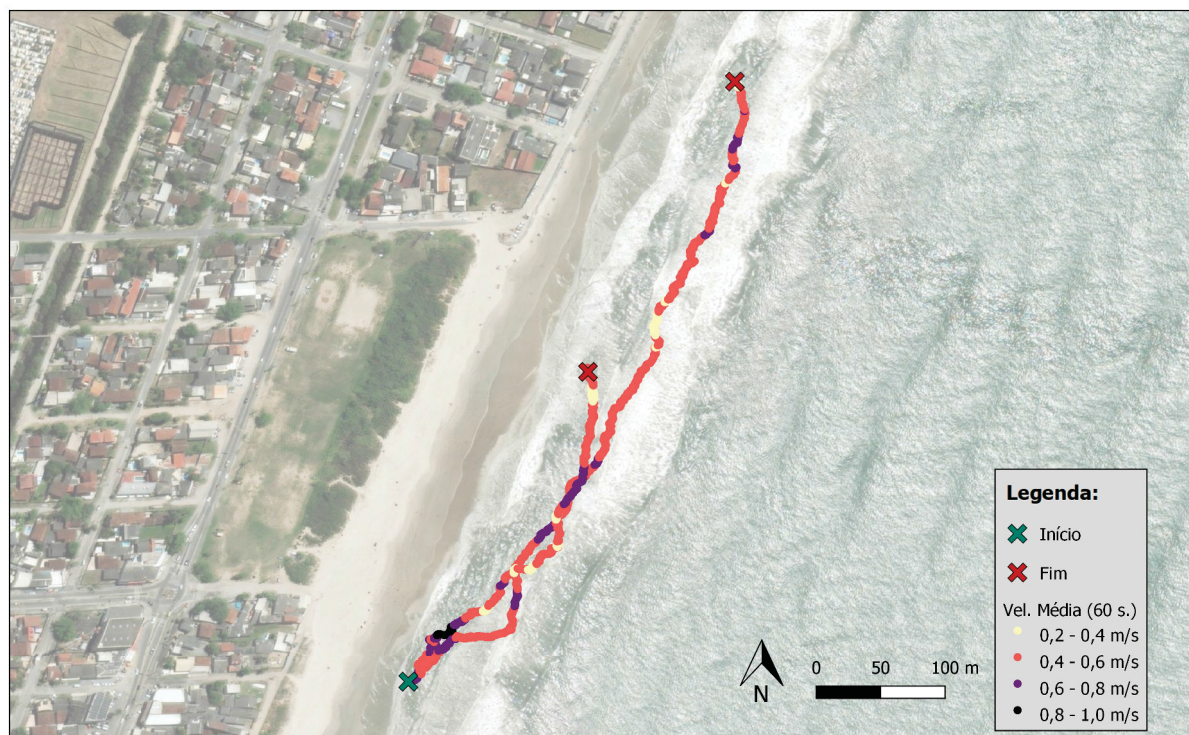


Figura 57 – Mapa de distribuição espacial das velocidades instantâneas medidas na campanha de 21/05/2022

5.3 Modelagem Numérica

5.3.1 Análise de Sensibilidade - Interação onda-corrente

Com o objetivo de verificar a capacidade do modelo em reproduzir correntes induzidas pela propagação e quebra de ondas na zona de arrebentação, foi realizada uma análise de sensibilidade simulando o evento de ressaca ocorrido no mês de abril de 2022. Para isso, o modelo hidrodinâmico foi rodado em um primeiro momento sem considerar os efeitos de ondas calculados pelo SWAN e posteriormente utilizando os mesmos parâmetros e períodos de aquecimento (15 dias) utilizando o sistema de modelagem acoplada, com troca de informações entre MOHID e SWAN com intervalo de 1 hora.

A Figura 58 apresenta os resultados obtidos pelas duas simulações realizadas no dia 18/04/2022, onde foram verificadas as maiores intensidades de correntes geradas devido à passagem de sistema frontal responsável pela formação de ressaca no litoral Paranaense. O quadro da esquerda (a) mostra os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico sem considerar o efeito das ondas, enquanto o quadro da direita (b) apresenta o resultado da simulação obtida através do acoplamento entre MOHID e SWAN para considerar interação onda-corrente.

Com esta análise, portanto, foi possível verificar a capacidade do modelo em representar correntes geradas pela propagação e quebra de ondas, visto que na Figura 58a o campo de velocidades permanece praticamente uniforme em toda a área e com direção de corrente orientada para S, enquanto a Figura 58b indica o efeito das ondas na formação

de correntes. Nessa simulação é possível verificar velocidades mais intensas na região da zona de arrebentação, indicando o efeito da quebra de ondas na formação de correntes longitudinais, bem como a direção de deslocamento se mostrou para N, compatível com o esperado na propagação de ondas de SE (135°) verificadas nestas simulações.

5.3.2 Simulações em períodos de amostragem com derivador

A partir das condições de contorno de ondas provenientes do WW3 e dos resultados do modelo hidrodinâmico operacional do *Brazilian Sea Observatory*, as grades 1, 2 e 3 foram simuladas nos mesmos períodos das três amostragens. Para garantir um pré-aquecimento dos modelos, as rodadas iniciaram sempre 15 dias antes do dia dos levantamentos de campo. As simulações das grades 2 e 3 (Guaratuba e Riviera) foram efetuadas considerando a interação entre ondas e correntes (modelos acoplados), com a troca de informações entre o SWAN e MOHID com intervalo de 1 hora.

Para uma comparação mais realista, foram extraídas as velocidades calculadas pelo modelo para os mesmos períodos de amostragens com os derivadores considerando coordenadas de início, meio e fim do percurso, sendo calculada a média para esses três pontos. Devido ao modelo não considerar a evolução batimétrica ao longo das estações do ano, a localização da zona de arrebentação pode ser diferente daquela verificada em campo, dessa forma, as velocidades foram extraídas sempre na região de máxima velocidade na zona praial, visto que as maiores intensidades das correntes longitudinais são encontradas na zona de arrebentação.

A Tabela 16 apresenta as velocidades médias calculadas pelo derivador e extraída

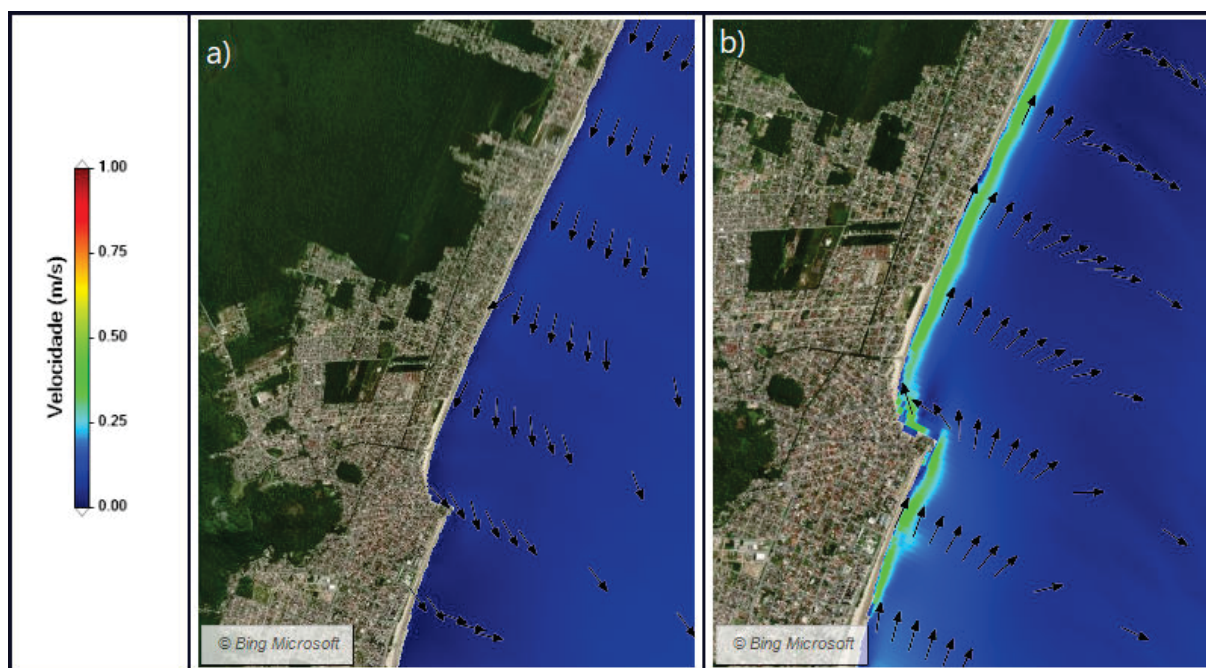


Figura 58 – Comparação entre apenas modelo hidrodinâmico (a) e modelo hidrodinâmico acoplado com modelo de ondas para simular interação onda-corrente (b)

Tabela 16 – Comparação entre velocidades médias medidas pelo derivador e calculadas pelo modelo nos períodos de amostragem de dados e parâmetros de ondas calculados pelo modelo na zona de arrebentação

Data	Vel. Média Derivador (m/s)	Vel. Média Modelo (m/s)	Alt. Sig. da Onda Modelo (m)	Dir. Média da Onda - Modelo
19/02/2020	0.68	0.51 (-25%)	0.80	92° (E)
15/07/2021	0.40	0.33 (-17%)	0.64	98° (E)
21/05/2022	0.49	0.37 (-24%)	0.93	127° (SE)

do modelo no mesmo horário da amostragem. É possível verificar uma leve subestimativa do modelo na representação das velocidades médias, com uma diferença máxima de 25% em relação ao medido em campo. Essa variação entre dado observado e calculado pode ser atribuída às limitações presentes na modelagem de correntes litorâneas devido ao uso da geometria 2D utilizada, o que gera um resultado integrado de toda a coluna d'água pelo modelo, enquanto o derivador se desloca apenas na superfície, onde as correntes são mais intensas devido à contribuição do vento e também ausência do efeito do atrito com o leito.

A variação das intensidades médias verificadas em cada uma das campanhas de campo também foi identificada pelo modelo, com a maior velocidade registrada na amostragem de 19/02/2020, durante o verão, e a menor na campanha em condição de pré-frontal, em 15/07/2021. Isso demonstra a capacidade do modelo em reproduzir a intensificação das correntes conforme as condições meteorológicas e oceanográficas de forma condizente ao verificado em campo.

Ao se analisar a distribuição espacial das velocidades registradas pelo modelo no mesmo horário das amostragens de campo (Figura 59), verificou-se que nos períodos referentes às campanhas de verão e pré-frontal, o modelo indicou correntes longitudinais fluindo para S e corrente para N na campanha de pós-frontal. Enquanto isso, todos os derivadores se deslocaram para N nas três amostragens de dados. Quando verifica-se a direção média das ondas na zona de arrebentação nas três simulações (Tabela 16), é possível notar que os eventos que geraram correntes para S estão associados à ondas provenientes de E, quase perpendicularmente à costa, enquanto o evento de pós-frontal teve ondas provenientes de SE.

Para verificar a tendência do modelo em indicar correntes para Sul quando a direção ocorre para Norte, foram realizadas rodadas do modelo no mesmo período em que encontrou-se fundeado um equipamento ADCP do Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento (LOCG/CEM/UFPR) na região anterior à zona de arrebentação, a uma profundidade média de 2.5 m. O equipamento permaneceu fundeado por 20 dias no mês de abril de 2022, registrando dados de velocidades e parâmetros de onda em uma resolução temporal de 15 minutos.

A Figura 60 compara as velocidades, maré e altura significativa de ondas observadas pelo ADCP e calculadas pelo modelo em um ponto logo anterior à zona de arrebentação e com profundidade semelhante ao local de fundeio do equipamento acústico. Durante o

período comparado, foi possível verificar, assim como nas amostragens com o derivador, uma tendência do modelo em apresentar velocidades menores que as observadas. Neste caso, a subestimativa do modelo foi na ordem de 20%, tendo apresentada uma velocidade média de 0.14 m/s pelo ADCP e de 0.11 m/s calculada pelo modelo.

Entretanto, foi possível verificar a capacidade do modelo em representar velocidades resultantes de eventos extremos, como indicado entre os dias 15/04 e 17/04/2022, onde uma forte ressaca atingiu o litoral de Matinhos e tanto o ADCP quanto o modelo indicaram um aumento significativo das velocidades nesse período.

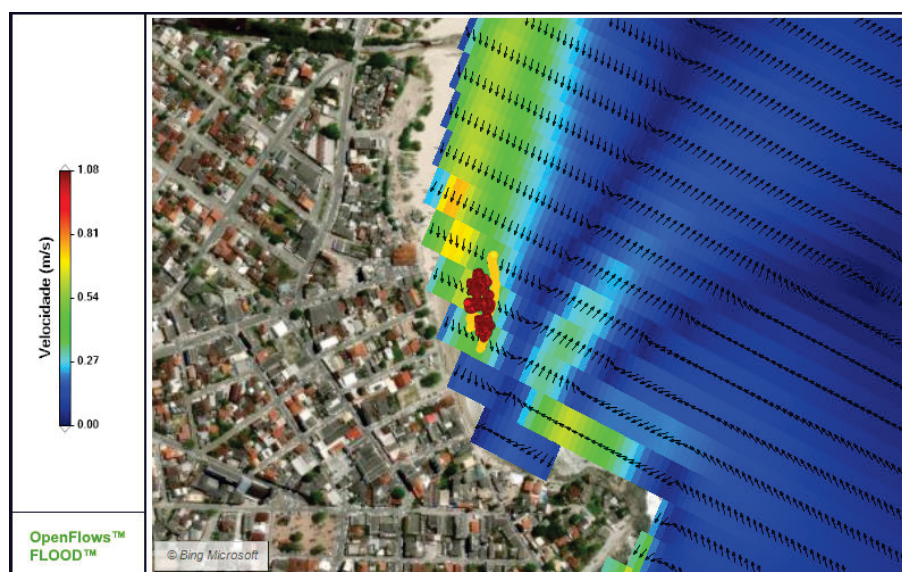
A eficiência do modelo em representar os parâmetros medidos pelo ADCP foi verificada através do cálculo do coeficiente de correlação (R^2) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE) para os dados de módulo da velocidade, nível d'água (maré) e altura significativa de onda. A Figura 61 apresenta os gráficos de dispersão para os parâmetros medidos com a linha de regressão linear ajustada entre os dados observados e calculados. Com base nos dados obtidos, é possível verificar uma ótima correlação para os dados de nível d'água (maré), com um coeficiente de correlação (R^2) de 0.87, enquanto o módulo da velocidade apresentou a menor eficiência ($R^2 = 0.63$) e os dados de altura significativa de ondas com $R^2 = 0.67$.

A menor eficiência do modelo em representar as velocidades está associada à impossibilidade do ADCP em medir partículas próximas ao fundo (~ 1 metro de coluna d'água), o que faz com que o efeito do atrito com o leito que reduz consideravelmente a velocidade de deslocamento das partículas seja desconsiderado no cálculo da velocidade média de toda a coluna d'água. Esta limitação do equipamento em observar a região próxima ao leito fez com que a velocidade média calculada pelo modelo (0.11m/s) fosse cerca de 20% inferior à velocidade média observada pelo ADCP (0.14m/s). Com relação à eficiência dos dados de altura significativa de ondas, o valor está relacionado ao pico verificado nos dados do modelo no dia 20/04/2022 que pode ter sido ocasionado por imprecisões nas condições de contorno ou nos dados do modelo de ventos, gerando uma altura elevada que não foi verificada pelo ADCP. Entretanto, a altura significativa média observada (0.99m) e calculada (0.91m) apresentaram uma diferença de apenas 8%.

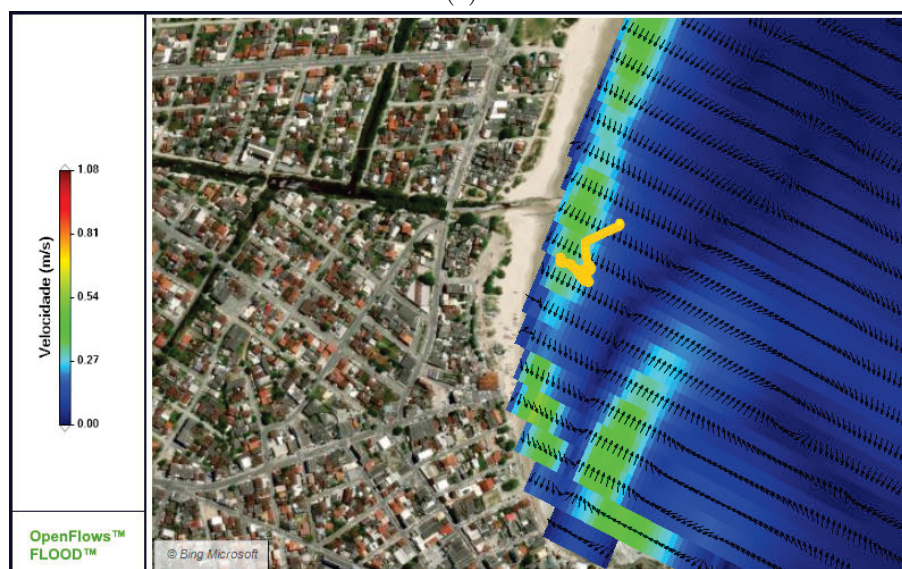
Com relação às direções das correntes, esta análise indicou novamente uma tendência do modelo em representar deslocamento para S. A Figura 62 mostra o diagrama de intensidade e frequência com as respectivas direções de escoamento para o ADCP e para o modelo. Nessa imagem, é possível identificar que, enquanto o ADCP registrou preferência de deslocamento para N (53% dos registros), o modelo resultou em 42% das medições indicando correntes para N, permanecendo 58% do tempo com a componente longitudinal se deslocando para S.

Assim como indicado nas campanhas de campo com os derivadores, esta comparação indica que o modelo tende a resultar correntes para S em condições de ondas quebrando em direção praticamente perpendicular à costa (90°), e correntes para N após a passagem de

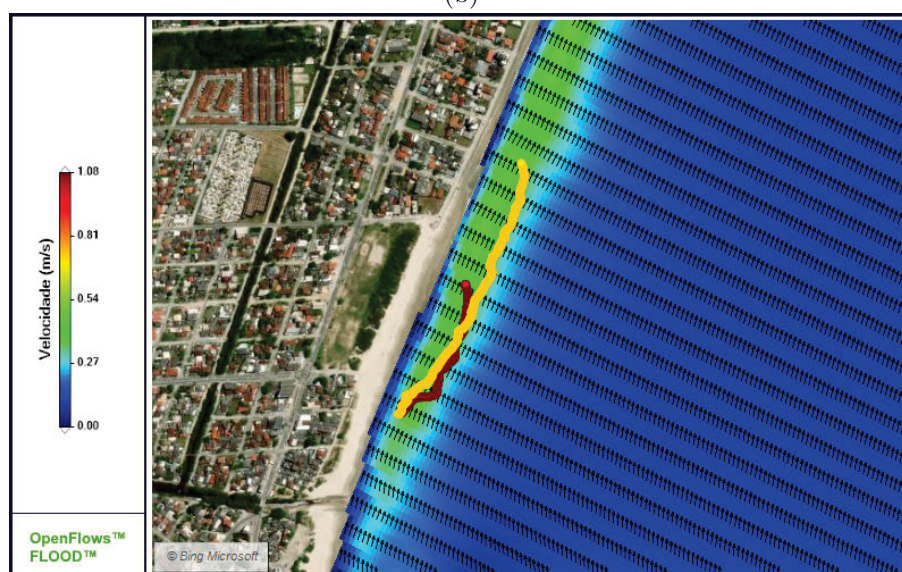
sistemas frontais e conseqüente ondulações mais intensas e provenientes de SE. Isto pode estar relacionado à efeitos como imprecisões na batimetria, que estejam gerando refração nas ondas influenciando na direção de propagação e também a ausência de condições meteorológicas nas grades locais, visto que o efeito do vento local, como a brisa marinha, pode influenciar significativamente na circulação litorânea. Dessa forma, são necessários novos testes para verificar essas influências nos resultados do modelo.



(a)



(b)



(c)

Figura 59 – Resultados do modelo numérico com interação entre ondas e correntes para os períodos de amostragem com derivador: (a) Campanha de verão - 19/02/2020; (b) campanha em pré-frontal - 15/07/2021; e (c) campanha em situação de pós-frontal - 21/05/2022



Figura 60 – Comparação entre componentes de velocidade, oscilação da maré e altura significativa de ondas medidas pelo ADCP e calculadas pelo modelo

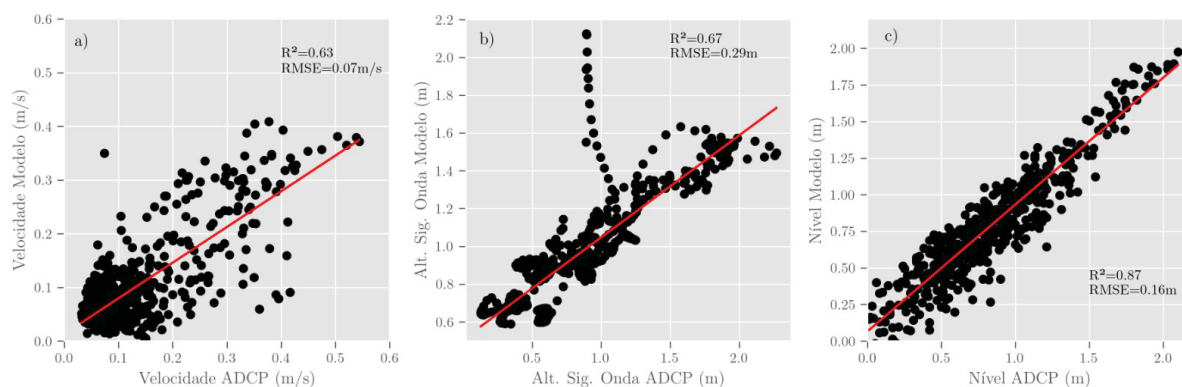


Figura 61 – Gráficos de dispersão e linha de regressão linear para os dados de módulo da velocidade (a), altura significativa de onda (b) e nível d'água (c) medidos pelo ADCP e calculados pelo modelo

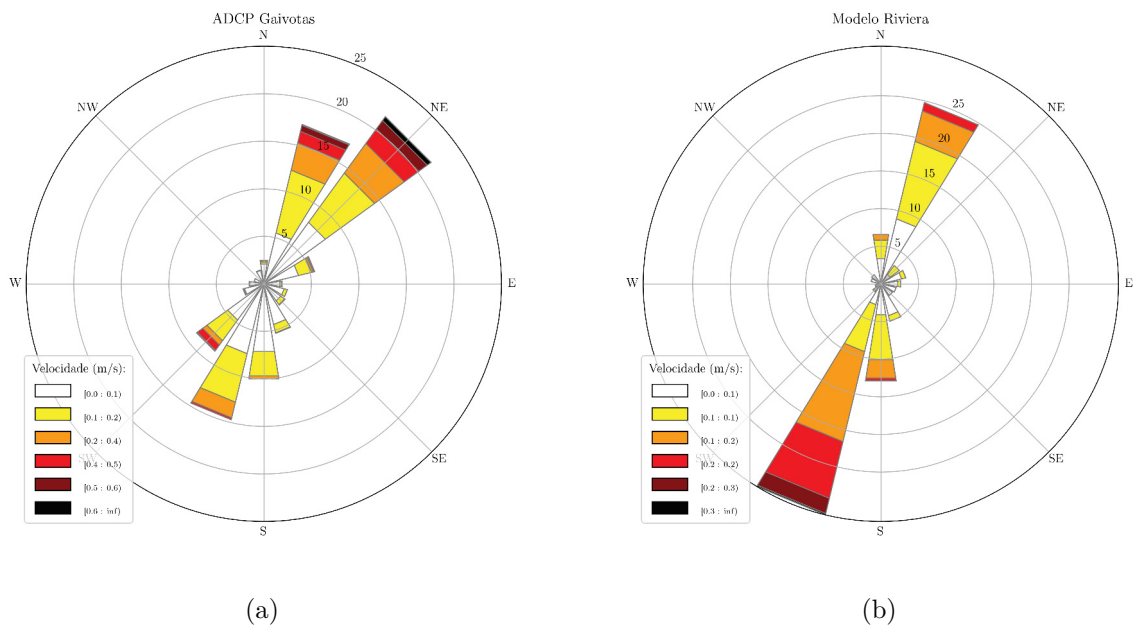


Figura 62 – Diagrama de intensidade e frequência observados pelo ADCP (a) e calculados pelo modelo (b) para o mesmo período de tempo

6 CONCLUSÕES

Um derivador lagrangiano construído com estrutura e eletrônicos de baixo custo apresentou resultados satisfatórios para o levantamento de correntes da zona de arrebenção praial. A estrutura física do derivador apresentou uma ótima estabilidade, sem sofrer efeito da quebra de ondas e influência do vento, sendo transportado apenas devido às correntes litorâneas. A amostragem de dados na zona de arrebenção comprovou a capacidade do derivador em representar correntes longitudinais e de retorno ao longo do tempo e do espaço.

Os testes para avaliar a qualidade do sensor GNSS não-diferencial na representação de velocidades médias indicaram bons resultados, com um erro médio das velocidades na ordem de 1-2 cm/s e excelente correlação entre velocidades médias calculadas e registradas pelo sensor ($R^2 = 0.99$). Quando comparado com as intensidades obtidas por um correntômetro acústico (ADCP), o coeficiente de correlação também foi satisfatório ($R^2 = 0.80$). Esses resultados, portanto, vão ao encontro da hipótese levantada por este trabalho de que um equipamento de baixo custo poderia ser um grande aliado na representação de correntes geradas pela quebra de ondas na zona de arrebenção praial.

O sistema de telemetria de dados utilizado mostrou ser capaz de enviar a posição dos equipamentos em tempo real com uma distância considerável para estudos em ambiente costeiro, e a interface desenvolvida possibilitou um fácil monitoramento da posição geográfica de cada equipamento em tempo real. O protocolo de rádio LoRa, por aliar alto alcance com baixo consumo de bateria, também pode possibilitar o uso desses componentes eletrônicos em uma plataforma fixa, como bóias oceanográficas, gerenciando a leitura de sensores e transmitindo os dados para uma base em terra com um ótimo custo-benefício.

Ainda nesse sentido, apesar de o equipamento ter sido desenvolvido com o objetivo de monitorar correntes na zona de arrebenção, ele pode ser facilmente utilizado em outros ambientes, como rios, reservatórios e estuários, já tendo sido testado com sucesso na análise da variação das marés em ambiente estuarino. O desenvolvimento de um corpo maior também permitirá que os mesmos componentes sejam alimentados por uma bateria de maior capacidade, possibilitando a aquisição de dados também em ambiente oceânico com grande autonomia de operação.

O microcontrolador compatível com a tecnologia de internet das coisas (IoT) também permite que, ao se transmitir os dados para uma base com acesso à internet, os mesmos sejam disponibilizados em tempo real em um ambiente *web*, podendo ser disponibilizado em forma de gráficos e informações geográficas para operadores e usuários em geral.

Ainda, a hipótese levantada de que o derivador seria capaz de fornecer dados para a validação de modelos numéricos que considerem a interação entre ondas e correntes para

simular a hidrodinâmica praial também se mostrou válida. O modelo testado apresentou velocidades comparáveis com as obtidas pelos derivadores nas três campanhas de campo, com leve subestimativa por parte do modelo, o que demonstra que a energia dissipada pelas ondas na zona de arrebenção é realista. A amostragem com os derivadores também permitiu verificar a tendência do modelo em resultar em correntes fluindo para o Sul em condições com ondas perpendiculares à costa, enquanto o derivador indicou transporte para o Norte.

Uma segunda comparação, utilizando dados de um ADCP fundeado próximo à praia mas fora da zona de arrebenção também demonstrou essa tendência, com o modelo indicando preferência de correntes para Sul enquanto o ADCP observou deslocamento preferencial para Norte. Com isso, algumas hipóteses foram levantadas para novos testes na configuração do modelo que possam ser realizados em trabalhos futuros para verificar o que pode estar resultando na inversão do sentido das correntes, como a adoção de vento em alta resolução nas grades locais e verificação da batimetria interpolada para a grade, além de simulações considerando diferentes ângulos de propagação das ondas para analisar a sensibilidade do modelo na formação de correntes longitudinais.

Por fim, a combinação entre levantamento de dados com os derivadores associados com técnicas de modelagem numérica podem gerar importantes informações para se analisar a dinâmica praial e conseqüente padrão de transporte de sedimentos do local, podendo auxiliar em uma melhor compreensão do comportamento hidrodinâmico e geomorfológico da região estudada fornecendo, portanto, uma ótima ferramenta no auxílio para a tomada de decisões no gerenciamento costeiro.

REFERÊNCIAS

- AAGAARD, T.; MASSELINK, G. The surf zone. In: _____. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. p. 72–118. Citado na página 34.
- ALMAR, R.; LARNIER, S.; CASTELLE, B.; SCOTT, T.; FLOC'H, F. On the use of the radon transform to estimate longshore currents from video imagery. *Coastal Engineering*, v. 114, p. 301–308, 2016. Citado na página 17.
- ALVES, L. C. *Identificação de células de deriva longitudinal litorânea através do mapeamento sedimentológico das praias do município de Pontal do Paraná (PR)*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Oceanografia) — Universidade Federal do Paraná, 2011. Citado na página 60.
- ANGULO, R. Ambientes de sedimentação da planície costeira com cordões litorâneos no estado do paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 40, p. 69–114, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 55, 59 e 101.
- ANGULO, R. Varia es na configura o da linha de costa no paraná nas últimas quatro décadas. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 41, p. 52–72, 1993. Citado na página 55.
- ANGULO, R. J.; ANDRADE, J. J. *Viabilidade de controle de erosão nas praias de Caiobá e Guaratuba*. [S.l.], 1981. Citado na página 55.
- BANDEIRA, J. V. *Estudo estatístico das ondas ao largo da ba ia de Paranaguá*. Disserta o (Disserta o de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1974. Citado na página 55.
- BASSO, J. B. *Análise morfodinâmica das praias Brava de Caiobá e Guaratuba no litoral paranaense*. [S.l.], 1997. Citado na página 55.
- BATTJES, J. A.; JANSSEN, J. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: ASCE. *Proceedings of International Conference of Coastal Engineering*. [S.l.], 1978. p. 569–587. Citado 4 vezes nas páginas 27, 46, 47 e 48.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; MATOS, D. J.; WERNER, A. A serra do mar e a porão oriental do estado do paraná: um problema de seguran  ambiental e nacional. *Secretaria de Estado do Planejamento - ADEA (Associa o de Defesa e Educa o Ambiental)*, 1978. Citado na página 59.
- BIGARELLA, J. J.; S, F. S.; SALAMUNI, R.; VIANA, R. Contribui o ao estudo dos sedimentos praias recentes. ii. praias de matinhos e caiob . *Boletim de Geografia Física UFPR*, v. 18, p. 109, 1966. Citado na página 54.
- BOOIJ, N.; , R. C. ; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, v. 104, n. C4, p. 7649–7666, 1999. Citado 4 vezes nas páginas 45, 46, 47 e 48.
- BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L.; RIS, R. The "swan" wave model for shallow water. v. 25, p. 668–676, 1996. Citado na página 45.

BRANDER, R.; SHORT, A. Morphodynamics of a large-scale rip current system at muriwai beach, new zealand. *Marine Geology*, v. 165, n. 1-4, p. 27–39, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 39.

BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; CHAMBEL, P.; NEVES, R. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the tagus estuary case. *Ocean Dynamics*, v. 53, n. 3, p. 137–145, 2003. Citado na página 50.

BRETSCHNEIDER, C. L. The generation and decay of wind waves in deep water. *Transactions American Geophysical Union*, v. 33, n. 3, p. 381–389, 1952. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

BREVIS, W.; NIÑO, Y.; JIRKA, G. Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids*, v. 50, n. 1, p. 135–147, 2011. Citado na página 38.

CARMO, M. C. *Modelação do Transporte de Sedimentos em Ambientes Costeiros*. Dissertação (Trabalho Final de Curso) — Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2005. Citado na página 52.

CASTELLE, B.; BONNETON, P.; SÉNÉCHAL, N.; DUPUIS, H.; BUTEL, R.; MICHEL, D. Dynamics of wave-induced currents over an alongshore non-uniform multiple-barred sandy beach on the aquitanian coast, france. *Continental Shelf Research*, v. 26, p. 113–131, 2006. Citado na página 17.

CAVALERI, L.; RIZZOLI, P. M. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, v. 86, n. C11, p. 10961–10973, 1981. Citado na página 46.

ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. [S.l.]: McGraw Hill Education Private, 2010. Citado na página 37.

CHICKADEL, C. C.; HOLMAN, R. A.; FREILICH, M. H. An optical technique for the measurement of longshore currents. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, p. 1–17, 2003. Citado na página 17.

CLARKE, L. B.; ACKERMAN, D.; LARGIER, J. Dye dispersion in the surf zone: Measurements and simple models. *Continental Shelf Research*, Elsevier, v. 27, n. 5, p. 650–669, 2007. Citado na página 39.

COLLINS, J. I. Prediction of shallow-water spectra. *Journal of Geophysical Research*, v. 77, n. 15, p. 2693–2707, 1972. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

DAVIDSON-ARNOTT, R.; BAUER, B.; HOUSER, C. *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Nova York: Cambridge University Press, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34, 35, 36 e 37.

DAVIS, R. A. Beach and nearshore zone. In: _____. *Coastal sedimentary environments*. New York: Springer, 1985. p. 379–444. Citado 7 vezes nas páginas 8, 32, 39, 40, 42, 43 e 61.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Upper Saddle River: World Scientific Publishing Company, 1984. Citado 5 vezes nas páginas 24, 27, 28, 29 e 31.

- DELFT3D-FLOW User Manual. [S.l.], 2014. Citado na página 48.
- DELPEY, M.; ARDHUIN, F.; OTHEGUY, P.; JOUON, A. Effects of waves on coastal water dispersion in a small estuarine bay. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 119, n. 1, p. 70–86, 2014. Citado na página 52.
- ELDEBERKY, Y. Parameterization of triad interaction in wave energy model. In: *Proc. Coastal Dynamics Conf. Gdansk, Poland*. [S.l.: s.n.], 1995. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- ELDEBERKY, Y. Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone. *Oceanographic Literature Review*, v. 4, n. 44, p. 297, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 48.
- FIORIO, P. *Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS)*. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2020. Citado na página 41.
- FISCHER, H. B.; LIST, J. E.; KOH, C. R.; IMBERGER, J.; BROOKS, N. H. *Mixing in inland and coastal waters*. Londres: Academic Press Inc., 1979. Citado na página 22.
- FOLLEY, M. *Numerical modelling of wave energy converters: state-of-the-art techniques for single devices and arrays*. [S.l.]: Academic Press/Elsevier, 2016. Citado na página 44.
- FRANZ, G.; DELPEY, M. T.; BRITO, D.; PINTO, L.; LEITÃO, P.; NEVES, R. Modelling of sediment transport and morphological evolution under the combined action of waves and currents. *Ocean Science*, v. 13, n. 5, p. 673, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 17, 52 e 53.
- FRANZ, G.; LEITÃO, P.; PINTO, L.; JAUCH, E.; FERNANDES, L.; NEVES, R. Development and validation of a morphological model for multiple sediment classes. *International Journal of Sediment Research*, v. 32, n. 4, p. 585–596, 2017. Citado na página 52.
- FRANZ, G. A. S.; LEITÃO, P.; SANTOS, A. d.; JULIANO, M.; NEVES, R. From regional to local scale modelling on the south-eastern brazilian shelf: case study of paranaguá estuarine system. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 64, n. 3, p. 277–294, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 83.
- GOBBI, E. F. *Gerenciamento costeiro: análise de caso do litoral do Paraná sob a perspectiva da engenharia costeira*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997. Citado na página 59.
- HASSELMANN, K.; BARNETT, T.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGHT, D.; ENKE, K.; EWING, J.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MÜLLER, P.; OLBERS, D. J.; RICHTER, K.; SELL, W.; WALDEN, H. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. [S.l.], 1973. Citado 4 vezes nas páginas 23, 46, 47 e 84.
- HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K.; ALLENDER, J. H.; BARNETT, T. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. part ii: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, v. 15, n. 11, p. 1378–1391, 1985. Citado 3 vezes nas páginas 44, 46 e 48.

- HASSELMANN, s.; HASSELMANN, K.; BAUSER, E.; JANSSEN, P. A. E. M.; KOMEN, G. J.; BERTOTTI, L.; LIONELLO, P.; GUILLAUME, A.; CARDONE, V. C.; GREENWOOD, J. A.; REISTAD, M.; ZAMBRESKY, L.; EWING, J. A. The wam model—a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, v. 18, n. 12, p. 1775–1810, 1988. Citado na página 45.
- HICKS, S. D. Understanding tides. NOAA, National Ocean Service, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. Overview of gps. In: *Global Positioning System*. [S.l.]: Springer, 1997. p. 11–26. Citado na página 41.
- HOLTHUIJSEN, L. H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Citado 10 vezes nas páginas 23, 24, 27, 28, 30, 31, 44, 45, 46 e 48.
- HUBERTZ, J. M. Observations of local wind effects on longshore currents. *Coastal Engineering*, v. 10, p. 275–288, 1986. Citado na página 17.
- INMAN, D.; BAGNOLD, R. Littoral processes. In: _____. *The Sea*. New York: Interscience, 1963. Citado na página 34.
- JANSSEN, P. A. E. M. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of physical oceanography*, v. 21, n. 11, p. 1631–1642, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.
- JOHNSON, D.; STOCKER, R.; HEAD, R.; IMBERGER, J.; PATTIARATCHI, C. A compact, low-cost gps drifter for use in the oceanic nearshore zone, lakes, and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 20, n. 12, p. 1880–1884, 2003. Citado 5 vezes nas páginas 18, 41, 42, 77 e 94.
- JONES, O. P.; PETERSEN, O.; KOFOED-HANSEN, H. Modelling of complex coastal environments: Some considerations for best practise. *Coastal Engineering*, v. 54, n. 10, p. 717–733, 2007. Citado na página 51.
- JUNG, G. B.; TOLDO-JR, E. E. Longshore current vertical profile on a dissipative beach. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, p. 691–702, 2011. Citado na página 17.
- KINSMAN, B. *Wind waves: their generation and propagation on the ocean surface*. Mineola: Dover Publications, 1984. Citado na página 23.
- KOBAYASHI, N. *Coastal sediment transport modeling for engineering applications*. Tese (Doutorado) — American Society of Civil Engineers, 2016. Citado na página 51.
- KOBAYASHI, N.; BUCK, M.; PAYO, A.; JOHNSON, B. D. Berm and dune erosion during a storm. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 135, n. 1, p. 1–10, 2009. Citado na página 51.
- KOMAR, P. D. *Beach processes and sedimentation*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc., 1998. Citado 6 vezes nas páginas 24, 31, 32, 33, 34 e 35.
- KOMEN, G.; HASSELMANN, K.; HASSELMANN, K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, v. 14, n. 8, p. 1271–1285, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

KOMEN, G. J.; CAVALERI, L.; DONELAN, M.; HASSELMANN, K.; HASSELMANN, S.; JANSSEN, P. *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. Citado 7 vezes nas páginas 43, 44, 45, 46, 47, 48 e 84.

KUMAR, S. V. A.; LUHAR, R. K.; SHARMA, R.; KUMAR, R. Design and development of a low-cost gnss drifter for rip currents. *Current Science*, v. 118, n. 2, p. 273–279, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 17, 18, 43, 77 e 94.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M.; DOWLING, D. R. *Fluid mechanics*. Cambridge: Academic Press, 2012. Citado na página 24.

LAMOUR, M.; SOARES, C. Histórico das atividades de dragagem e taxas de assoreamento nos canais de navegação aos portos costeiros paranaenses. *Dragagens Portuárias no Brasil: Licenciamento e Monitoramento Ambiental*. Antonina: Governo do Estado do Paraná, p. 232–234, 2007. Citado na página 54.

LAMOUR, M. R.; SOARES, C. R.; CARRILHO, J. Mapas de parâmetros texturais de sedimentos de fundo do complexo estuarino de paranaguá - pr. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 55, 2004. Citado na página 54.

LEITAO, P. C. *Integração de escalas e processos na modelação do ambiente marinho*. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2002. Citado na página 49.

LIU, X.; XIA, J. C.; WRIGHT, G.; ARNOLD, L. A state of the art review on high water mark (hwm) determination. *Ocean & Coastal Management*, v. 102, p. 178–190, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1. *Journal of Geophysical Research*, v. 75, n. 33, p. 6778–6789, 1970. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 52.

LUMPKIN, R.; ÖZGÖKMEN, T.; CENTURIONI, L. Advances in the application of surface drifters. *Annual review of marine science*, Annual Reviews, v. 9, p. 59–81, 2017. Citado na página 39.

MADSEN, O. S.; POON, Y.-K.; GRABER, H. C. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. In: ASCE. *Proceedings of 21st International Conference of Coastal Engineering*. [S.l.], 1989. p. 492–504. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

MARONE, E.; CAMARGO, R. Marés meteorológicas no litoral do estado do paraná: o evento de 18 de agosto de 1993. *Nerítica*, v. 8, n. 1-2, p. 73–85, 1994. Citado na página 55.

MARONE, E.; GUIMARÃES, M.; JR, V. P.; KLINGENFUSS, M.; CAMARGO, R. Caracterização física das condições oceanográficas, meteorológicas e costeiras das zonas estuarinas da baía de paranaguá, pr. In: *Anales del VI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar. Mar del Plata, Argentina*. [S.l.: s.n.], 1995. Citado 3 vezes nas páginas 55, 59 e 101.

MARTINS, F. *Modelação matemática tridimensional de escoamentos costeiros e estuarinos usando uma abordagem de coordenada vertical genérica*. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2000. Citado na página 49.

MARTINS, G. J. *Dinâmica da zona de arrebentação e suas potenciais consequências no transporte de sedimentos na costa adjacente à desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá - PR*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2002. Citado na página 56.

MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic Module User Guide. [S.l.], 2012. Citado na página 48.

MILDEMBERGER, D.; GONÇALVES, J. E.; KRAEMER, A. B.; WOSIACKI, L. F. K.; BLENINGER, T. B. Estimativa de intensidade e direção de correntes superficiais através de imageamento com drone e processamento digital de imagem. In: *XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 10. Citado na página 38.

MILES, J. W. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 3, n. 2, p. 185–204, 1957. Citado 3 vezes nas páginas 23, 44 e 45.

MONTEIRO, A. J. *Dispersão de efluentes através de exutores submarinos: uma contribuição para a modelação matemática*. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1995. Citado na página 49.

MOREIRA, D. L. *Observações e modelagem numérica da hidrodinâmica e transporte de sedimentos em Matinhos (PR)*. 2019. Citado 9 vezes nas páginas 17, 52, 53, 60, 82, 83, 85, 88 e 99.

NASELLO, C.; ARMENIO, V. A new small drifter for shallow water basins: Application to the study of surface currents in the muggia bay (italy). *Journal of Sensors*, Hindawi, v. 2016, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 61.

NEMES, D.; MARONE, E. Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do estado do paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 68-69, p. 12–25, 2013. Citado na página 56.

NEVES, R. J. J. A bidimensional model for residual circulation in coastal zones: Application to the sado estuary. *Annalles Geophysicae*, v. 3/4, p. 465–472, 1985. Citado na página 49.

NOERNBERG, M. A. *Processos morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá - Paraná - Brasil: Um estudo a partir de dados in situ e Landsat-TM*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001. Citado 5 vezes nas páginas 17, 56, 60, 90 e 101.

NOVAK, L. P. *Risco à erosão costeira na orla dos municípios de Matinhos e Pontal do Paraná-PR, Brasil*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2017. Citado na página 55.

NOVELLI, G.; GUIGAND, C. M.; COUSIN, C.; RYAN, E. H.; LAXAGUE, N. J. M.; DAI, H.; HAUS, B. K.; ÖZGÖKMEN, T. M. A biodegradable surface drifter for ocean sampling on a massive scale. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 34, p. 2509–2532, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 61.

PETHICK, J. S. *An introduction to coastal geomorphology*. New York: Halsted Press, 1984. Citado na página 34.

- PHILLIPS, O. M. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 2, n. 5, p. 417–445, 1957. Citado 3 vezes nas páginas 23, 44 e 45.
- PIERSON, W. J.; NEUMANN, G.; JAMES, R. W. *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*. [S.l.], 1955. Citado na página 44.
- PORTELA, L. I. *Mathematical modelling of hydrodynamic processes and water quality in Tagus Estuary*. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1996. Citado na página 49.
- PORTOBRAS. *Relatório de apresentação das medições meteorológicas observadas em Pontal do Sul, Paranaquá - PR*. [S.l.], 1983. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.
- POULAIN, P.-M.; GERIN, R.; MAURI, E.; PENNEL, R. Wind effects on drogued and undrogued drifters in the eastern mediterranean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 26, n. 6, p. 1144–1156, 2009. Citado na página 40.
- RAMALHO, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. T. *Os Fundamentos da Física, v.2*. São Paulo: Moderna, 1996. Citado na página 22.
- REINECK, H.-E.; SINGH, I. B. *Depositional sedimentary environments: with reference to terrigenous clastics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado na página 100.
- RIS, R.; HOLTHUIJSEN, L.; BOOIJ, N. A third-generation wave model for coastal regions: 2. verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 104, n. C4, p. 7667–7681, 1999. Citado na página 91.
- ROSS, D. *Introduction to oceanography*. [S.l.]: Harpercollins College Division, 1995. Citado na página 21.
- ROSSBY, H. Evolution of lagrangian methods in oceanography. In: _____. *Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 1–38. Citado na página 38.
- SABET, B. S.; BARANI, G. A. Design of small gps drifters for current measurements in the coastal zone. *Ocean & Coastal Management*, Elsevier, v. 54, n. 2, p. 158–163, 2011. Citado 8 vezes nas páginas 8, 42, 43, 61, 77, 94, 97 e 98.
- SANTOS, A. J. P. *Modelo hidrodinâmico tridimensional de circulação oceânica e estuarina*. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1995. Citado na página 49.
- SCHMIDT, W. E.; WOODWARD, B. T.; MILLIKAN, K. S.; GUZA, R. T.; RAUBENHEIMER, B.; ELGAR, S. A gps-tracked surf zone drifter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 20, n. 7, p. 1069 – 1075, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 18, 42, 61 e 98.
- SHORT, A. D. The role of wave height, period, slope, tide range and embaymentisation in beach classifications: a review. *Revista Chilena de Historia Natural*, v. 69, p. 589–604, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

- SHORT, A. D. Beaches. In: _____. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. p. 3–20. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- SILVA, A. J. R. *Modelação matemática não linear de ondas de superfície e de correntes litorais*. Tese (Doutorado) — Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1991. Citado na página 49.
- STEWART, R. H. *Introduction to physical oceanography*. [S.l.]: Texas A & M University College Station, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 20, 24 e 37.
- SVENDSEN, I. A.; HAAS, K.; ZHAO, Q. *Quasi-3D nearshore circulation model SHORECIRC version 2.0*. Newark: Center for Applied Coastal Research - University of Delaware, 2002. Citado na página 51.
- TISSOT, P. E.; DELL, L.; RIZZO, J.; WILLIAMS, D. D. Nearshore wave and current measurements/predictions on the texas coast. In: *Symposium on the Coastal Environment*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 9. Citado na página 17.
- TOLMAN, H. L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, v. 21, n. 6, p. 782–797, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 83.
- VILLARET, C.; HERVOUET, J.-M.; KOPMANN, R.; MERKEL, U.; DAVIES, A. G. Morphodynamic modeling using the telemac finite-element system. *Computers & Geosciences*, v. 53, p. 105–113, 2013. Citado na página 48.
- WARNER, J. C.; ARMSTRONG, B.; HE, R.; ZAMBON, J. B. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (coawst) modeling system. *Ocean Modelling*, v. 35, p. 230–244, 2010. Citado na página 51.
- WITTE, T.; WILSON, A. Accuracy of non-differential gps for the determination of speed over ground. *Journal of Biomechanics*, Elsevier, v. 37, n. 12, p. 1891–1898, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 97.
- YOUNG, I. Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *International Journal of Climatology*, v. 19, n. 9, p. 931–950, 1999. Citado na página 44.

Apêndices

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE: ARDUINO NANO - GPS DATALOGGER (C++)

```
1 #include <TinyGPS++.h>
2 #include <SoftwareSerial.h>
3 #include <SD.h>
4 #include <SPI.h>
5
6 #define SERIAL_MONITOR_BAUDRATE    115200
7
8 // Definindo parametros para conexao com GPS
9 static const int GPS_RX = 2, GPS_TX = 3;
10 static const uint32_t GPS_BAUDRATE = 9600;
11
12 TinyGPSPlus gps;
13 SoftwareSerial ss(GPS_RX, GPS_TX);
14
15
16
17 //Definindo parametros para conexao com modulo SD
18 int SD_CS = 4;
19 File log_data;
20 String log_data;
21 //Define filename inicial
22 char filename[] = "LOG01.csv";
23
24
25
26 void setup()
27 {
28     //Inicializando GPS
29     Serial.begin(SERIAL_MONITOR_BAUDRATE);
30     ss.begin(GPS_BAUDRATE);
31
32     //Inicializando SD
33     pinMode(SD_CS, OUTPUT);
34
35     if (SD.begin(SD_CS)) {
36         Serial.println(F("SD Ok"));
37     }
```

```

38 else {
39     Serial.println(F("Falha no SD"));
40     return;
41 }
42
43 SetLogFilename();
44
45
46 }
47
48 void loop()
49 {
50     smartDelay(1000); //Captura dados do GPS a cada 1 segundo
51
52     //Escrevendo dados no SD
53     if (log_data = SD.open(filename, FILE_WRITE)) {
54         LogData();
55         log_data.print(log_data);
56         log_data.close();
57         Serial.print("Gravado no SD: ");
58         Serial.println(log_data);
59
60     } else {
61         Serial.println(F("Erro ao gravar no SD"));
62     }
63
64     if (millis() > 5000 && gps.charsProcessed() < 10)
65         Serial.println(F("No GPS data received: check wiring"));
66 }
67
68 //Fim do Programa Principal
69
70 ////////////////
71 //Funcoes Auxiliares
72
73 void SetLogFilename()
74 {
75     //definindo o nome do arquivo a ser salvo
76     for (byte i = 1; i <= 99; i++)
77     {
78         // checa se o nome do arquivo existe no SD
79         if (SD.exists(filename))

```

```
80     {
81         // se o nome já existir incrementa um numero em filename
82         filename[3] = i / 10 + '0';
83         filename[4] = i % 10 + '0';
84     } else {
85         break; // se não existir, define como nome a ser salvo
86     }
87 }
88 }
89
90 void LogData() //Cria a string log_data com dados de hor
91 {
92     String str = "";
93     char buff[12];
94     str = str + (gps.date.day()) + "/";
95     str = str + (gps.date.month()) + "/";
96     str = str + (gps.date.year()) + " ";
97     str = str + (gps.time.hour()) + ":";
98     str = str + gps.time.minute() + ":";
99     str = str + gps.time.second() + ";";
100    str = str + gps.satellites.value() + ";";
101    float lat = gps.location.lat();
102    dtostrf(lat, 5, 6, buff);
103    str = str + buff + ";";
104    float lng = gps.location.lng();
105    dtostrf(lng, 5, 6, buff);
106    str = str + buff + ";";
107    str = str + gps.altitude.meters() + ";";
108    float vel = gps.speed.mps();
109    dtostrf(vel, 5, 2, buff);
110    str = str + buff + ";";
111    str = str + gps.course.deg() + ";";
112    float hdp = gps.hdop.hdop();
113    dtostrf(hdp, 5, 2, buff);
114    str = str + buff + ";";
115    log_data = str;
116 }
117
118 static void smartDelay(unsigned long ms)
119 {
120     unsigned long start = millis();
121     do
```

```
122 {  
123     while (ss.available())  
124         gps.encode(ss.read());  
125 } while (millis() - start < ms);  
126 }
```

APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE: ESP32 LORA - TRANSMISSOR (C++)

```

1 #include <LoRa.h>
2 #include <SPI.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include <mySD.h>
5 #include <TinyGPS++.h>
6
7 //Declarando variaveis
8 TinyGPSPPlus gps;
9 String lora_packet, log_data;
10 File log_file;
11 int id = 1; //Codigo para identificar o
    equipamento
12 char filename[] = "LOG01.csv"; //Define nome inicial do arquivo
    no cartao SD
13
14
15 //Definicoes para comunicacao SPI (LoRa e SD)
16 #define SPI_CLK          5
17 #define SPI_MISO        19
18 #define SPI_MOSI        27
19 #define SD_CS           21 //Chip Select modulo SD
20 #define LORA_CS         18 //Chip Select radio LoRa
21 #define LORA_RESET      14
22 #define DIO             26 //LoRa_IRQ
23
24 //Definicoes para comunicacao com sensor GPS (RX/TX)
25 #define GPS_RX          2
26 #define GPS_TX         17
27
28
29 //Definicoes gerais
30 #define HIGH_GAIN_LORA    14 //define o ganho da
    antena (range: 12 - 20 dbm) - quanto maior a potencia, maior
    alcance, porem com maior consumo de bateria
31 #define BAND             915E6 //frequencia do radio
    LoRa (915MHz)
32 #define SERIAL_MONITOR_BAUDRATE 115200

```

```
33 #define GPS_BAUDRATE 9600
34
35 #define Select LOW //Ativa pino CS
36 #define DeSelect HIGH //Desativa pino CS
37
38 //LEDs de aviso
39 #define led_sd 16
40 #define led_lora 25
41
42
43 bool init_comunicacao_lora(void);
44
45
46 //Funcao setup para configuracoes gerais
47 void setup()
48 {
49     pinMode(SD_CS, OUTPUT);
50     pinMode(LORA_CS, OUTPUT);
51     pinMode(led_sd, OUTPUT);
52     pinMode(led_lora, OUTPUT);
53
54     digitalWrite(LORA_CS, DeSelect); //Desativa comunicacao com SD
55
56     Serial.begin(SERIAL_MONITOR_BAUDRATE); //Inicia comunicacao
57     //pela porta serial (COM)
58
59     Serial2.begin(GPS_BAUDRATE, SERIAL_8N1, GPS_RX, GPS_TX); //
60     //Inicia comunicacao com o GPS
61
62     while (!Serial); //Aguarda ate que comunicacao serial seja
63     //estabelecida
64
65     Serial.println("Iniciando cartao SD...");
66     digitalWrite(SD_CS, Select); // SELECT (Low) SD Card SPI
67     if (!SD.begin(SD_CS, SPI_MOSI, SPI_MISO, SPI_CLK)) {
68         Serial.println("Falha na inicializacao do SD!");
69     } else {
70         Serial.println("SD ok.");
71         delay(1000);
72     }
73 }
```

```

72 SetLogFilename(); //Chama funcao para definir o nome de arquivo
    a ser utilizado para o Log no SD
73
74
75 //
76 log_file = SD.open(filename, FILE_WRITE);
77 if (log_file) {
78     log_file.println("datetime;satelites;lat;lon;alt;vel_mps;
        dir_deg;hdop"); //escreve o cabeçalho no arquivo log
79     log_file.flush();
80     log_file.close();
81
82     //Ativa LED por 1 segundo para confirmar inicializacao bem
        sucedida
83     digitalWrite(led_sd, HIGH);
84     delay(1000);
85     digitalWrite(led_sd, LOW);
86
87 } else { // file open error
88     Serial.println("error opening file");
89 }
90 delay(100);
91
92 digitalWrite(SD_CS, DeSelect); // DESELECT (high) SD Card
    SPI
93 SD.end();
94
95
96 delay(1000);
97
98 //
    ////////////////////////////////////////////////////////////////////
99
100 //Tenta, ate obter sucesso, comunicacao com o chip LoRa
101 while (init_comunicacao_lora() == false);
102
103 }
104
105 void(* resetFunc) (void) = 0; //funcao para reiniciar o sistema
    automaticamente em caso de erro no sistema
106

```

```
107
108 /* Programa principal */
109 void loop()
110 {
111     while (Serial2.available() > 0)
112         gps.encode(Serial2.read()); //captura dados obtidos pelo GPS
113         se comunicacao com sensor estiver ativa
114
115     //Inicia protocolo de transmissao via LoRa
116     SPI.begin(SPI_CLK, SPI_MISO, SPI_MOSI, LORA_CS );
117     LoRa.setPins( LORA_CS, LORA_RESET, DIO );
118     digitalWrite(SD_CS, DeSelect); //Desativa comunicacao com
119         chip SD
120     delay(10);
121     digitalWrite(LORA_CS, Select); //Ativa comunicacao com chip
122         LoRa
123
124     if (!LoRa.begin(BAND)) {
125         Serial.println("Falha ao se comunicar com chip LoRa");
126     } else {
127         LoRaPacket(); //Chama funcao para criar string com dados a
128             serem enviados via LoRa
129         Serial.print("Enviando pacote: ");
130         Serial.println(lora_packet);
131         LoRa.beginPacket();
132         LoRa.print(lora_packet);
133         LoRa.endPacket();
134     }
135
136     digitalWrite(LORA_CS, DeSelect); //Desativa comunicacao com
137         chip LoRa
138     delay(10);
139     digitalWrite(SD_CS, Select); //Ativa comunicacao com
140         chip SD
141
142     SPI.end();
143     delay(500);
144
145     //Fim do protocolo de transmissao LoRa
```



```

181 //Funcao para iniciar comunicacao com LoRa
182 bool init_comunicacao_lora(void)
183 {
184     bool status_init = false;
185     Serial.println("Iniciando comunicacao com radio LoRa");
186     SPI.begin(SPI_CLK, SPI_MISO, SPI_MOSI, LORA_CS);
187     LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RESET, LORA_DEFAULT_DIO0_PIN);
188     digitalWrite(LORA_CS, Select); //Ativa comunicacao com LoRa
189
190     if (!LoRa.begin(BAND))
191     {
192         Serial.println("Comunicacao falhou, tentando novamente em 1
193             segundo...");
194         delay(1000);
195         status_init = false;
196     }
197     else
198     {
199         //configura potencia da antena e inicia comunicacao
200         LoRa.setTxPower(HIGH_GAIN_LORA);
201         Serial.println("Comunicacao com radio LoRa ok");
202         digitalWrite(led_lora, HIGH); //Se comunicacao for bem
203             estabelecida, led onboard ativa por 1 segundo
204         delay(1000);
205         digitalWrite(led_lora, LOW);
206         status_init = true;
207     }
208
209     return status_init;
210 }
211
212 void SetLogFilename()
213 {
214     //definindo o nome do arquivo a ser salvo
215     for (byte i = 1; i <= 99; i++)
216     {
217         // checa se o nome do arquivo existe no SD
218         if (SD.exists(filename))
219         {
220             // se o nome ja existir incrementa um numero em filename
221             filename[3] = i / 10 + '0';
222             filename[4] = i % 10 + '0';

```

```
221     } else {
222         break; // se nao existir, define como nome a ser salvo
223     }
224 }
225 }
226
227 void LoRaPacket() //Cria a string lora_packet com os dados de Id,
                // hora, latitude, longitude e num de satelites para enviar via
                // LoRa
228 {
229     String str = "";
230     char buff[12];
231     str = str + "CEM_" + id + " ";
232     str = str + (gps.time.hour()) + ":";
233     str = str + gps.time.minute() + ":";
234     str = str + gps.time.second() + " ";
235     float lat = gps.location.lat();
236     dtostrf(lat, 5, 6, buff);
237     str = str + buff + " ";
238     float lng = gps.location.lng();
239     dtostrf(lng, 5, 6, buff);
240     str = str + buff + " ";
241     str = str + "Sat: " + gps.satellites.value();
242     lora_packet = str;
243 }
244
245
246 void LogData() //Cria a string log_data com dados de hor
247 {
248     String str = "";
249     char buff[12];
250     str = str + (gps.date.day()) + "/";
251     str = str + (gps.date.month()) + "/";
252     str = str + (gps.date.year()) + " ";
253     str = str + (gps.time.hour()) + ":";
254     str = str + gps.time.minute() + ":";
255     str = str + gps.time.second() + ";";
256     str = str + gps.satellites.value() + ";";
257     float lat = gps.location.lat();
258     dtostrf(lat, 5, 6, buff);
259     str = str + buff + ";";
260     float lng = gps.location.lng();
```

```
261 dtostrf(lng, 5, 6, buff);
262 str = str + buff + ";";
263 str = str + gps.altitude.meters() + ";";
264 float vel = gps.speed.mps();
265 dtostrf(vel, 5, 2, buff);
266 str = str + buff + ";";
267 float hdp = gps.hdop.hdop();
268 dtostrf(hdp, 5, 2, buff);
269 str = str + buff + ";";
270 log_data = str;
271 }
272
273 void(* resetFunc) (void) = 0; //funcao para reinicilizar o
    sistema automaticamente
```

APÊNDICE C – CÓDIGO FONTE: ESP32 LORA - RECEPTOR (C++)

```

1 #include <LoRa.h>
2 #include <SPI.h>
3 #include <Wire.h>
4
5
6 //Define pinos de comunicacao LoRa
7 #define SCK_LORA          5
8 #define MISO_LORA        19
9 #define MOSI_LORA        27
10 #define RESET_PIN_LORA  14
11 #define SS_PIN_LORA      18
12
13 #define HIGH_GAIN_LORA    20 //ganho da antena em dbi
14 #define BAND              915E6 //frequência do radio
15                             lora (915MHz)
16
17 #define DEBUG_SERIAL_BAUDRATE  115200
18
19 bool init_comunicacao_lora(void);
20
21
22 bool init_comunicacao_lora(void)
23 {
24     bool status_init = false;
25     Serial.println("[LoRa Receiver] Tentando iniciar comunicacao
26                     com o radio LoRa...");
27     SPI.begin(SCK_LORA, MISO_LORA, MOSI_LORA, SS_PIN_LORA);
28     LoRa.setPins(SS_PIN_LORA, RESET_PIN_LORA, LORA_DEFAULT_DIO0_PIN
29                 );
30
31     if (!LoRa.begin(BAND))
32     {
33         Serial.println("[LoRa Receiver] Comunicacao com o radio LoRa
34                         falhou. Nova tentativa em 1 segundo...");
35         delay(1000);
36         status_init = false;

```

```
34 }
35 else
36 {
37     LoRa.setTxPower(HIGH_GAIN_LORA);
38     Serial.println("[LoRa Receiver] Comunicacao com o radio LoRa
39         ok");
40     status_init = true;
41 }
42 return status_init;
43 }
44
45
46 void setup()
47 {
48
49     Serial.begin(DEBUG_SERIAL_BAUDRATE);
50     while (!Serial);
51
52     while (init_comunicacao_lora() == false);
53 }
54
55
56 void loop()
57 {
58     int packetSize = LoRa.parsePacket();
59     if (packetSize) {
60         // pacote recebido
61         Serial.print("Derivadores CEM: ");
62         while (LoRa.available()) {
63             Serial.print((char)LoRa.read());
64         }
65
66         Serial.print("' with RSSI ");
67         Serial.println(LoRa.packetRssi());
68     }
69 }
```

APÊNDICE D – CÓDIGO FONTE: MONITOR SERIAL EM TEMPO REAL (PYTHON)

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import folium, branca, pyproj
4 import serial
5 import os
6 from datetime import datetime, timedelta
7
8 global new_data
9
10 #####
11 #DEFINIÇÕES GERAIS
12
13 COM_port = "COM5"
14 serial_baudrate = 115200
15
16 map_center = [-25.47, -48.63] #CEP
17
18 GMT_timezone = -3 #para manter hora UTC, GMT_timezone = 0 -
    negativo para W e positivo para E de Greenwich
19
20 #####
21
22
23 #cria um dataframe vazio
24 cols = ["Cod", "Data/Hora", "Lat", "Lon", "Sats", "RSSI", "
    Lat_base", "Lon_base"]
25 df = pd.DataFrame(columns=cols)
26
27 #Cria arquivo log
28 log_file = f"./logs/SerialLog_{datetime.now().strftime('%d%m%Y')}
    }.csv"
29 if not os.path.isfile(log_file):
30     df.to_csv(log_file, sep=" ", index=False)
31
32 #Funcao para converter o horario de UTC para hora local
33 def set_localtime(date, timezone):
34     local_time = datetime.strptime(date, '%H:%M:%S') + timedelta(

```

```

        hours=timezone)
35
36     return local_time.strftime('%H:%M:%S') #Retorna string com o
        horario local
37
38 #Funcao para calcular a distância e rumo entre a base e os
        transmissores
39 def calculate_distance(row):
40     geodesic = pyproj.Geod(ellps='WGS84')
41
42     base_position      = (new_data['Lon_base'][0], new_data['
        Lat_base'][0]) #usa sempre a última posição da base
        recebida
43     transmitter_position = (row['Lon'], row['Lat']) #ultima
        posicao recebida de cada transmissor
44
45     fwd_azimuth, back_azimuth, distance = geodesic.inv(
        base_position[0], base_position[1],
46
        transmitter_position
        [0],
        transmitter_position
        [1])
47
48     cardinal_points = ['N', 'NNE', 'NE', 'ENE', 'E', 'ESE', 'SE',
        'SSE', 'S', 'SSW', 'SW', 'WSW', 'W', 'WNW', 'NW', 'NNW']
49
50     ix = int(np.round(fwd_azimuth / (360. / len(cardinal_points))
        ))
51
52     return distance/1000, cardinal_points[ix % len(
        cardinal_points)] #Retorna distancia entre base e
        transmissor em km e direcao a partir da base em ponto
        cardeal
53
54 #Funcao para gerar uma tabela HTML a ser utilizada como pop-up ao
        clicar sobre o marcador no mapa
55 def popup_html(row):
56     equip_id  = row['Cod']
57     datetime  = row['Data/Hora']
58     satelites = row['Sats']
59     rssi      = row['RSSI']
60     latitude  = row['Lat']

```

```

61     longitude = row['Lon']
62
63     distance_km, cardinal = calculate_distance(row)
64
65     left_col_color = "#19a7bd"
66     right_col_color = "#f2f0d3"
67
68     html = f"""
69         <!DOCTYPE html>
70         <html>
71
72         <head>
73         <h4 style="margin-bottom:10"; width="200px">{equip_id
74             }</h4>
75         </head>
76
77         <table style="height: 126px; width: 350px;">
78         <tbody>
79         <tr>
80         <td style="background-color: {left_col_color};"><span
81             style="color: #ffffff;">Hora: </span></td>
82         <td style="width: 150px;background-color: {
83             right_col_color};"> {datetime}</td>
84         </tr>
85         <tr>
86         <td style="background-color: {left_col_color};"><span
87             style="color: #ffffff;">Latitude: </span></td>
88         <td style="width: 150px;background-color: {
89             right_col_color};"> {latitude}</td>
90         </tr>
91         <tr>
92         <td style="background-color: {left_col_color};"><span
93             style="color: #ffffff;">Longitude: </span></td>
94         <td style="width: 150px;background-color: {
95             right_col_color};"> {longitude}</td>
96         </tr>
97         <tr>
98         <td style="background-color: {left_col_color};"><span
99             style="color: #ffffff;">Distância da base: </span
100            ></td>
101         <td style="width: 150px;background-color: {
102             right_col_color};"> {distance_km:.2f} km</td>

```

```

93         </tr>
94     <tr>
95         <td style="background-color: {left_col_color};"><span
          style="color: #ffffff;">Rumo a partir da base: </
          span></td>
96         <td style="width: 150px;background-color: {
          right_col_color};"> {cardinal}</td>
97     </tr>
98     <tr>
99         <td style="background-color: {left_col_color};"><span
          style="color: #ffffff;">RSSI: </span></td>
100        <td style="width: 150px;background-color: {
          right_col_color};"> {rssi}</td>
101    </tr>
102    </tbody>
103    </table>
104    </html>
105    ""
106
107    return html #Retorna string com codigo HTML para gerar tabela
          pop-up com informações recebidas por cada transmissor
108
109
110 def create_map(df):
111     mapa = folium.Map(
112         location=map_center,
113         zoom_start=12)
114
115     for __, p in df.iterrows():
116         html = popup_html(p)
117         iframe = branca.element.IFrame(html=html, width=510,
          height=280)
118         popup = folium.Popup(folium.Html(html, script=True),
          max_width=500)
119         folium.Marker(
120             location=[p['Lat'], p['Lon']],
121             icon=folium.Icon(color="orange", icon="send"),
122             popup=popup).add_to(mapa)
123
124     folium.Marker(
125         location=[new_data['Lat_base'], new_data['Lon_base']
          ],

```

```

126         icon=folium.Icon(color="blue", icon="home"),
127         ).add_to(mapa)
128
129     return mapa.save("D:\\PySerialMonitor\\mapas\\mapa.html")
130
131
132 ser = serial.Serial(COM_port, serial_baudrate) #estabelece
133         comunicação com a porta serial
134
135 #Loop enquanto porta serial estiver ativa
136 while True:
137     new_message = str(ser.readline())[2:][: -5]
138
139     if new_message[:16] == "Derivadores CEM:": #desconsidera
140         informações que possam ser recebidas de outros
141         equipamentos no alcance do receptor
142         print(new_message) #imprime na tela a mensagem recebida
143
144         splitted_message = new_message.split()
145
146         try:
147             new_data = pd.DataFrame([{"Cod": splitted_message[2],
148                 "Data/Hora": set_localtime(splitted_message[3],
149                     GMT_timezone),
150                 "Lat": float(splitted_message[4]),
151                 "Lon": float(splitted_message[5]),
152                 "Sats": int(splitted_message[6][0]),
153                 "RSSI": splitted_message[8],
154                 "Lat_base": float(splitted_message[9]),
155                 "Lon_base": float(splitted_message[10])}]]) #
156                 cria um dataframe temporario com os dados
157                 recebidos via serial
158
159                 #if (new_data["Lat"][0] != 0) and (new_data["Lon
160                 "][0] != 0): #Adiciona dados novos apenas se
161                 localização for válida
162
163                 if (new_data["Lat"][0] != 0) and (new_data["Lon"][0]
164                 != 0): #Adiciona dados novos apenas se localizaç
165                 ão for válida
166
167                 new_data.to_csv(log_file, mode="a", index=False,
168                     header=False, sep=" ") #grava informação nova

```

```
no arquivo log
157
158     if (df['Cod'] == new_data['Cod'][0]).any():
159         df.drop(df.loc[df['Cod']==new_data["Cod"]
160                 ][0].index, inplace=True)
161     df = pd.concat([df,new_data], ignore_index=True)
162
163     create_map(df) #chama função para criar o mapa e
164                   salvar em formato html
165
166 except:
167     pass
```