

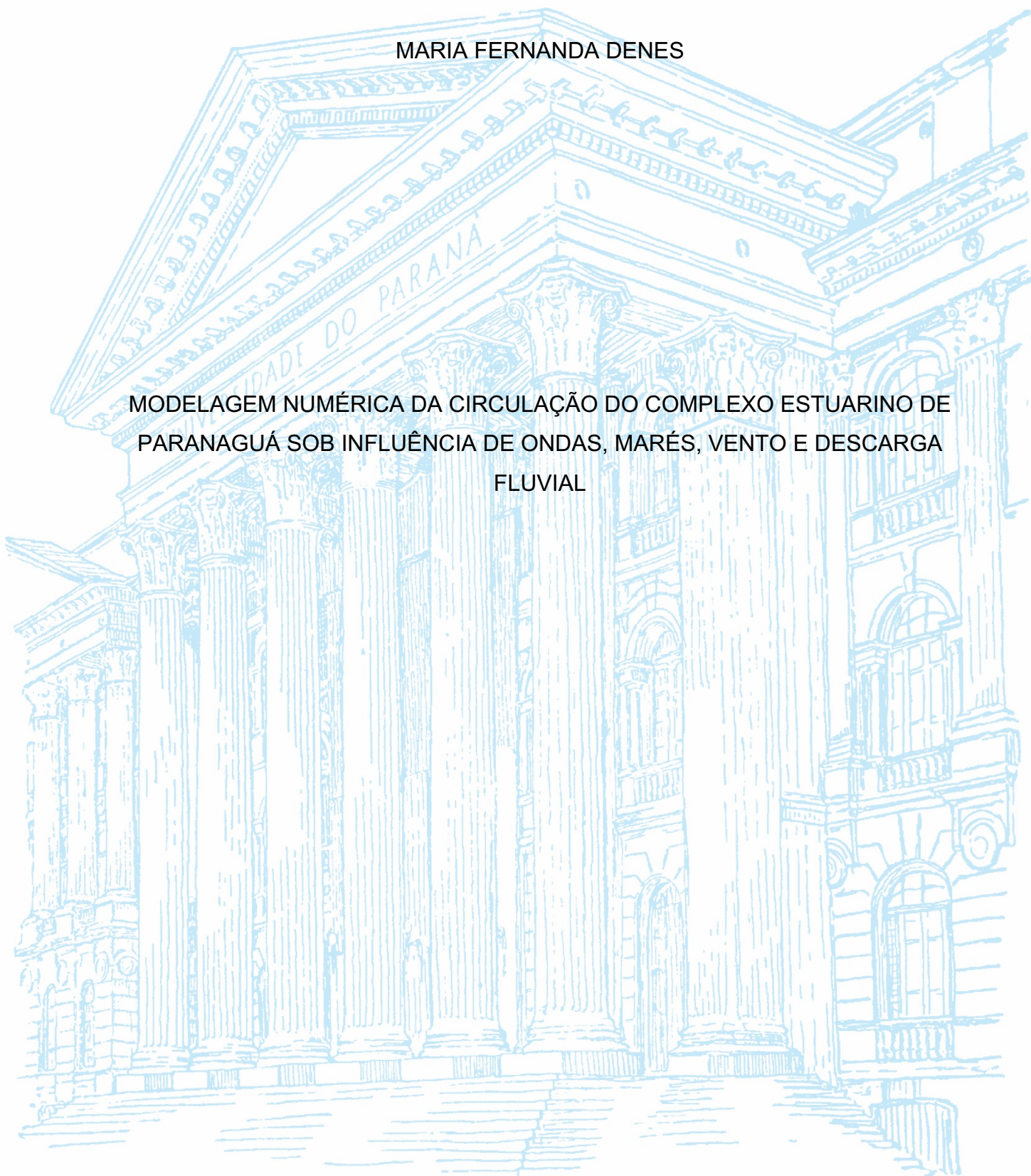
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIA FERNANDA DENES

MODELAGEM NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO DO COMPLEXO ESTUARINO DE
PARANAGUÁ SOB INFLUÊNCIA DE ONDAS, MARÉS, VENTO E DESCARGA
FLUVIAL

CURITIBA

2021



MARIA FERNANDA DENES

MODELAGEM NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO DO COMPLEXO ESTUARINO DE
PARANAGUÁ SOB INFLUÊNCIA DE ONDAS, MARÉS, VENTO E DESCARGA
FLUVIAL

Trabalho de conclusão de curso TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Cynara Cunha

CURITIBA

2021



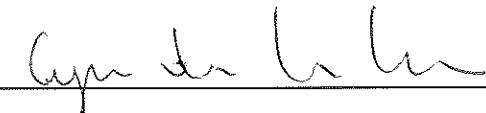
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

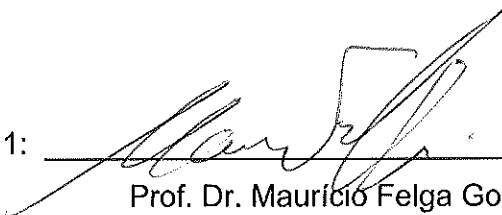
MARIA FERNANDA DENES

MODELAGEM NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ SOB INFLUÊNCIA DE ONDAS, MARÉS, VENTO E DESCARGA FLUVIAL

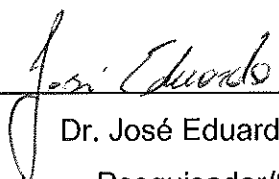
Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 100, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora: 
Dra. Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha

Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Membro 1: 
Prof. Dr. Maurício Felga Gobbi

Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Membro 2: 
Dr. José Eduardo Gonçalves
Pesquisador/SIMEPAR

Curitiba, 16 de dezembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus.

Agradeço à minha orientadora, Dra. Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha por sempre estar presente para indicar a direção correta que o trabalho deveria tomar.

Sou grato aos meus pais por sempre me incentivarem e acreditarem que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida me apresentou.

A minha irmã, pela amizade e atenção dedicadas quando sempre precisei.

A todos os meus amigos do curso que estiveram ao meu lado durante o meu percurso acadêmico.

Agradeço ao SIMEPAR por disponibilizar os dados de vento.

À Universidade Federal do Paraná e todos os seus professores que sempre proporcionaram um ensino de alta qualidade.

RESUMO

O estudo da circulação hidrodinâmica sob influência das ondas, marés, vento e descarga fluvial é um importante instrumento para o melhor entendimento da circulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), além de auxiliar na identificação das possíveis influências das ondas, principalmente pelas ondas de tempestades, que podem causar danos sobre as atividades do CEP, incluindo as atividades portuárias da região. Desta forma, o presente estudo tem por objetivo analisar a influência das ondas na circulação do Complexo Estuarino de Paranaguá dando destaque para a região interna do estuário, usando a modelagem computacional. Para isso, foram utilizados dois sistemas de modelagem: o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), para definição dos dados de ondas incidentes no CEP, e o modelo de circulação hidrodinâmico juntamente com o modelo de propagação de ondas do SisBaHiA[®] (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). No SisBaHiA[®], os dois modelos são executados simultaneamente e acoplados. Desta forma, a circulação calculada pelo modelo hidrodinâmico considera a influência das ondas e dos demais forçantes, maré, vento e aporte fluvial. Neste contexto, foi feita uma análise comparativa das componentes das velocidades e da tensão do fundo em estações localizadas dentro do CEP, para verificar a ação de ondas como um forçante na circulação do CEP e as interações onda-corrente e seus efeitos na circulação hidrodinâmica. Foi possível observar que a circulação do CEP mostrou pouca sensibilidade à ação das ondas. As ondas, mesmo considerando os eventos extremos, fica limitada a região externa, com pouca influência na região interna do Complexo.

Palavras-Chave: Ondas; modelagem hidrodinâmica, modelo de propagação de ondas, SisBaHiA[®], Complexo Estuarino de Paranaguá.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do Complexo Estuarino de Paranaguá, com a localização dos sub-estuários.	16
Figura 2. Localização do Complexo Portuário de Paranaguá, Antonina, TUP Cattalini e TUP Porto Pontal do Paraná.	18
Figura 3. Definição dos parâmetros de uma onda senoidal.	20
Figura 4. Ilustração esquemática, mostrando os diferentes tipos de ondas que ocorrem no oceano.	21
Figura 5. Órbita das partículas na coluna d'água durante a passagem de uma onda no caso de um oceano (a) profundo e (b) raso.	24
Figura 6. Definição do domínio de modelagem, da malha e localização das estações usadas para apresentar os resultados.	32
Figura 7. Topografia de fundo no domínio de modelagem do CEP.	32
Figura 8. Valores da amplitude da rugosidade de fundo (m).	33
Figura 9. Malha para o modelo de propagação da onda.	34
Figura 10. Localização do ponto P, onde os dados de ondas foram extraídos do SMC-Brasil.	35
Figura 11. Rosas direcionais de Hs para as estações do ano no ponto P.	37
Figura 12. Localização das estações de vento.	39
Figura 13. Comparação das velocidades do vento da estação de Paranaguá com os pontos 2 e 4 do ERA-Interim para o mês de janeiro de 2019. Fonte: Simepar & Copernicus Climate Change Service.	40
Figura 14. Rosa dos ventos da estação Paranaguá (Simepar) - verão do ano de 2019.	40
Figura 15. Rosa dos ventos no ponto 1- verão do ano de 2019.	40
Figura 16. Rosa dos ventos no ponto 2 - verão do ano de 2019.	41
Figura 17. Rosa dos ventos no ponto 3 - verão do ano de 2019.	41
Figura 18. Rosa dos ventos no ponto 2 - verão do ano de 2019.	41
Figura 19. Rosa dos ventos da no ponto 5 - verão do ano de 2019.	41
Figura 20. Rosa dos ventos no ponto 6 - verão do ano de 2019.	41
Figura 21. Rosa dos ventos da estação do SIMEPAR - inverno do ano de 2019. ...	42
Figura 22. Rosa dos ventos no ponto 1- inverno do ano de 2019.	42
Figura 23. Rosa dos ventos no ponto 2- inverno do ano de 2019.	42

Figura 24. Rosa dos ventos no ponto 3- inverno do ano de 2019.....	42
Figura 25. Rosa dos ventos no ponto 4- inverno do ano de 2019.....	43
Figura 26 Rosa dos ventos no ponto 5 - inverno do ano de 2019.....	43
Figura 27. Rosa dos ventos no ponto 6 - inverno do ano de 2019.....	43
Figura 28. Vazão média mensais dos rios que deságuam no CEP.....	44
Figura 29. Curvas de maré.	46
Figura 30. Localização das estações usadas para apresentar os resultados.	48
Figura 31. Elevação obtida pelo SisBaHia nas estações do CEP entre 19/01/2019 e 22/01/2019.....	49
Figura 32. Elevações e componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da Velocidade para o Cenário 1 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).....	50
Figura 33. Elevações e componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da Velocidade para o Cenário 1 na Estação Baía de Antonina.....	50
Figura 34. Altura e direção da onda obtidos pelo modelo de propagação da onda monocromática do SisBaHia para o estado de mar médio.	52
Figura 35. Correntes no fundo obtidas pelo modelo de propagação da onda monocromática do SisBaHia para o estado de mar médio.	52
Figura 36. Altura e direção da onda obtidos pelo modelo de propagação da onda monocromática do SisBaHia para o regime extremo.	53
Figura 37. Correntes no fundo obtidas pelo modelo de propagação da onda monocromática do SisBaHia para o regime extremo.	54
Figura 38. Componente Leste-Oeste da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).....	55
Figura 39. Componente Norte-Sul da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).....	55
Figura 40. Componente Leste-Oeste da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5. na Mar Aberto	56
Figura 41. Componente Norte-Sul da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5. na Estação Mar Aberto	56
Figura 42. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Mar Aberto	57
Figura 43. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta (Limoeiro).....	58

Figura 44. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta (Pontal do Poço)	59
Figura 45. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta.	59
Figura 46. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Paranaguá 1.	60
Figura 47. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Antonina.....	60
Figura 48. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Cotinga	61
Figura 49. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Paranaguá 2.	61
Figura 50. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Laranjeiras.	62
Figura 51. Altura média da onda variável para o cenário 5. Estação Mar Aberto usa o eixo principal e as demais estações, o eixo secundário.....	63
Figura 52. Componente Leste-Oeste da velocidade para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).....	64
Figura 53. Componente Norte-Sul da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).....	65
Figura 54. Componente Leste-Oeste da velocidade para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Mar Aberto.	65
Figura 55. Componente Norte-Sul da velocidade para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na Estação Mar Aberto.	66
Figura 56. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Mar Aberto.	67
Figura 57. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta (Limoeiro).	67
Figura 58. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta (Pontal do Poço).	68
Figura 59. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta.	68
Figura 60. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Paranaguá 1.	69

Figura 61. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Antonina. Fonte: A autora (2021).....	69
Figura 62. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Cotinga.	70
Figura 63. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Paranaguá 2.	70
Figura 64. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Laranjeiras.	71
Figura 65. Alturas médias das ondas variáveis para o cenário 8. A estação Mar Aberto usa o eixo principal e as demais estações, o eixo secundário.	72

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CEP - Complexo Estuarino de Paranaguá

SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

SMC - Sistema de Modelagem Costeira do Brasil

Cfa - Clima subtropical, com verão quente

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

DEF - Dezembro, Janeiro e Fevereiro

MAM - Março, Abril e Maio

JJA - Junho, Julho e Agosto

SON - Setembro, Outubro e Novembro.

Simepar - Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	O COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP).....	16
3.1.1	COMPLEXO PORTUÁRIO DE PARANAGUÁ E ANTONINA.....	19
3.2	ONDAS	20
3.3	ONDAS E MARÉS NA REGIÃO DO CEP	25
3.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL	27
3.4.1	SisBaHiA®	27
3.4.2	SMC – Brasil	29
4	METODOLOGIA	31
4.1	DADOS DO MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	31
4.2	DADOS DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA	34
4.3	DADOS DE ONDAS.....	35
4.4	DADOS DE VENTO	38
4.5	DADOS DE VAZÃO	43
4.6	DADOS DE MARÉ.....	45
4.7	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	49
5.2	RESULTADOS DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA (MPO)	51
5.3	COMPARAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DO CEP PARA DIFERENTES CENÁRIOS PARA O PERÍODO DE VERÃO	54
5.3.1	RELAÇÃO DAS VELOCIDADES DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 1, 3, 4 E 5.....	54
5.3.2	RELAÇÃO DOS MÓDULOS DE TENSÃO NO FUNDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 1, 3, 4 E 5.	57
5.3.3	AVALIAÇÃO DO AMORTECIMENTO DA ONDA	62

5.4	COMPARAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DO CEP PARA DIFERENTES CENÁRIOS PARA O PERÍODO DE INVERNO	63
5.4.1	RELAÇÃO DAS VELOCIDADES DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 2, 6, 7 E 8.....	63
5.4.2	RELAÇÃO DOS MÓDULOS DE TENSÃO NO FUNDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 2, 6, 7 E 8.	66
5.4.3	AVALIAÇÃO DO AMORTECIMENTO DA ONDA A PARTIR DO CENÁRIO 8	71
6	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXO 1 – Parâmetros do Modelo de Propagação de Ondas	78
	ANEXO 2 – Saídas do SMC-Brasil	79
	ANEXO 3 – Gráficos das Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1.....	84
	ANEXO 4 – GRÁFICOS DAS VELOCIDADES DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 1, 3, 4 E 5.....	87
	ANEXO 5 – GRÁFICOS DAS VELOCIDADES DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 2, 6, 7 E 8.....	90

1 INTRODUÇÃO

Localizado no litoral paranaense, o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) é formado pelas baías de Antonina, Paranaguá, Laranjeiras e Pinheiros. Por se tratar de um estuário, ou seja, um ecossistema de transição entre os corpos hídricos de água doce e o mar, o CEP possui uma grande importância ecológica e ambiental. Além disso, também possui uma importante função econômica, já que a geomorfologia da região favorece as atividades portuárias, sendo considerado ideal para a navegação (NOERNBERG *et al.*, 2008). Na região está instalado o chamado Complexo Portuário de Paranaguá e Antonina, composto pelos portos de Paranaguá e Antonina e pelos terminais de uso privado (TUP) Cattalini e pelo terminal Porto Pontal do Paraná (TPPP) (MTPA, 2016).

O CEP possui profundidade média de 5,4 metros; a sua circulação é influenciada principalmente pelas marés e pelo aporte fluvial, que variam conforme as estações do ano; chuvosa, durante a primavera e o verão, e seca, durante o outono e inverno. Esta condição climática classifica o clima da região como subtropical com verões quentes (LANA *et al.*, 2001).

As ondas, vindas principalmente da direção Sudeste, possuem alturas de cerca de 0,5 m, podendo chegar a 3,0 metros em eventos meteorológicos extremos, tais como ressacas (LANA *et al.*, 2001). Estas ondas podem ser fortes hidrodinâmicas importantes. Se entrarem na região do CEP podem alterar a circulação hidrodinâmica do estuário e com isso trazer consequências ambientais e econômicas à região.

Desta forma, estudar a circulação hidrodinâmica considerando a influência das ondas, é importante para o melhor entendimento da circulação da região, além de auxiliar na identificação das possíveis influências geradas por essas ondas, principalmente pelas ondas de tempestades, que podem causar danos sobre as atividades CEP, incluindo as atividades portuárias da região.

Um dos principais acessos para navios ao complexo portuário é o canal da Galheta. Entretanto, este possui um problema de assoreamento e necessita de dragagens frequentes para se manter as condições que permitam as operações dos portos e terminais. Esse assoreamento do canal é uma das consequências do efeito

de ondas na região do CEP que podem causar um aumento de transporte de sedimentos dentro dos canais de navegação (SOUZA, 2015).

Neste contexto, o presente estudo tem por objetivo analisar a influência das ondas na circulação do Complexo Estuarino de Paranaguá dando destaque para a região interna do estuário, usando a modelagem computacional. Para isso foram utilizados dois modelos, o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) e modelo de circulação hidrodinâmico juntamente com o modelo de propagação de ondas do SisBaHiA[®] (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental).

O SisBaHiA[®] é um sistema profissional de modelagem computacional que possui uma série de modelos, entre eles o modelo hidrodinâmico bidimensional, tridimensional e o modelo de propagação de ondas. Para realizar a discretização espacial, o SisBaHiA[®] utiliza elementos finitos e, para a discretização temporal, é utilizado diferenças finitas. (ROSMAN, 2021)

Trabalhando de forma interativa com o modelo de propagação de ondas e com o modelo hidrodinâmico, o SisBaHiA[®] é capaz de propagar as ondas considerando os efeitos de refração, difração, dissipação e arrebentação. (ROSMAN, 2021)

O SMC-Brasil é um sistema computacional que é utilizado em estudos de problemas ambientais em zonas costeiras. O sistema combina uma série de bases de dados de batimetria, ondas e nível do mar (dados de maré astronômica e meteorológica), obtidos durante os anos de 1948 até 2008, para período de 60 anos. Os resultados do SMC-Brasil são obtidos através da reanálise de dados, que calcula/estima parâmetros como a altura média, direção, período (T_s) e a frequência das ondas em um determinado ponto. (IH CANTABRIA, 2017).

Neste trabalho o SMC-Brasil foi utilizado para obter o clima de ondas médio: os valores de altura (H_s), direção e período das ondas significativas e o clima de ondas para períodos extremos (altura, H_{12} , direção e período), ou seja, o valor máximo da média móvel com período de 12h ao longo de todo o registro da série temporal de dados. Já o SisBaHiA[®] foi utilizado para propagar estas ondas definidas ao largo para o interior do CEP através do acoplamento dos seus modelos hidrodinâmico e de propagação de ondas. O SisBaHiA[®] também permite que uma série temporal de altura, período e direção de ondas ao largo, possa ser usada em conjunto com o modelo hidrodinâmico, obtida através de modelos de reanálises do ERA-Interim pelo

sistema *Copernicus Climate Change Service* (C3S), sendo também simulado neste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo estudar, usando os sistemas SMC-Brasil (Sistema de Modelagem Costeira do Brasil) e SisBaHiA[®] (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), a circulação hidrodinâmica sob influência das ondas, marés, vento e descarga fluvial no Complexo Estuarino de Paranaguá.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Análise e tratamento de dados existentes para implantação e desenvolvimento dos modelos;
- Definição dos cenários de circulação hidrodinâmica;
- Definição do estado de mar usando o SMC-Brasil;
- Implementação do modelo de circulação hidrodinâmica e modelo de propagação de ondas no CEP para diferentes cenários;
- Simulações dos diferentes cenários para o modelo de circulação hidrodinâmica no CEP;
- Simulações dos diferentes cenários para o modelo de circulação hidrodinâmica e do modelo de propagação de ondas do SisBaHiA[®] no CEP;
- Comparação dos resultados das simulações para estimar os locais de influência da ação das ondas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Na presente seção é apresentada uma revisão sobre o Complexo Estuarino de Paranaguá assim como os tipos de ondas e suas principais características. Também são descritos os modelos utilizados neste estudo.

3.1 O COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP)

Um estuário é caracterizado por ser um ambiente aquático de transição entre um ou mais corpos hídricos de água doce e o mar. Possui grande influência sob as áreas costeiras tanto pelo seu papel ecológico, quanto pelo seu papel em atividades antrópicas tais como, áreas recreativas, locais para implantação de portos e terminais portuários, marinas e atividades de mineração (LAMOUR, 2004)

Com uma área de aproximadamente 612 Km², o Complexo Estuarino de Paranaguá está localizado no litoral paranaense, e engloba as baías de Antonina, Paranaguá, Laranjeiras e Pinheiros, indicadas na Figura 1, além dos Sub-estuários Benito, Cachoeira, Cotinga, Guaraqueçaba, Itaqui, Medeiros e Nhundiaquara (SANTOS, 2013).

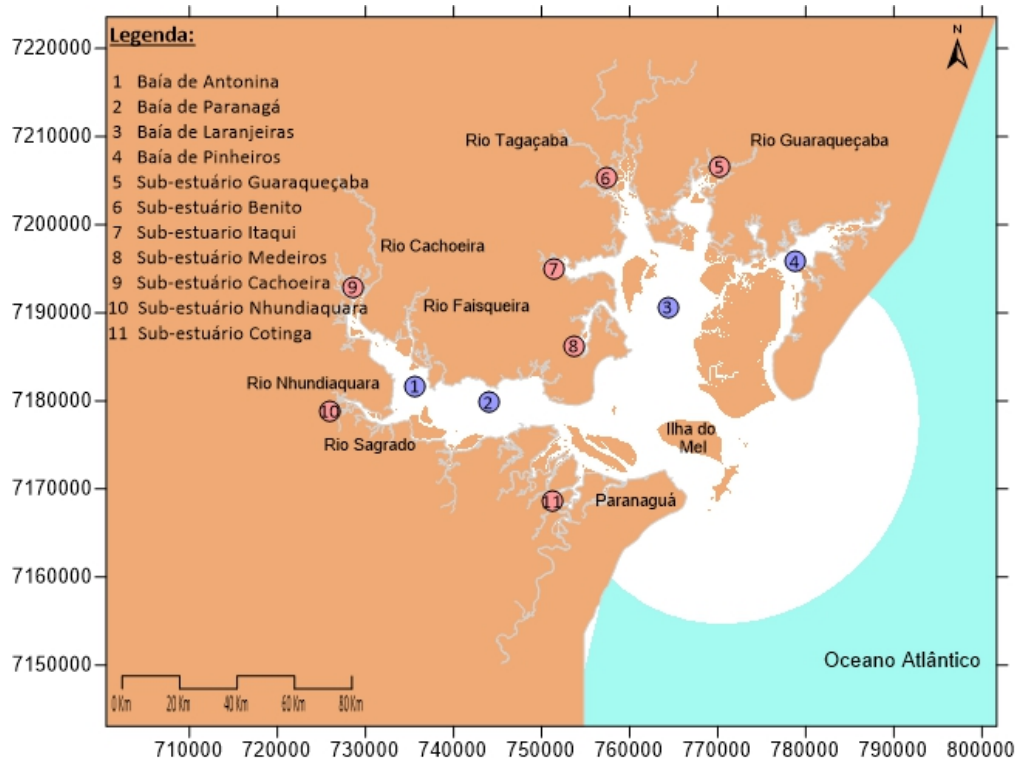


Figura 1. Localização do Complexo Estuarino de Paranaguá, com a localização dos sub-estuários.
Fonte: SANTOS (2013)

O complexo Estuarino de Paranaguá conta com uma alta biodiversidade e sua bacia de contribuição com áreas remanescentes bem preservados de mata atlântica (LANA *et al.*, 2001). Parte da responsabilidade por isso está no baixo desenvolvimento urbano, industrial e agrícola na região, que normalmente é mais desenvolvido em zonas costeiras.

Com relação aos aspectos socioeconômicos da região, no ano de 2008, segundo Noernberg *et al.* (2008), entre os municípios de Guaraqueçaba, Antonina e Paranaguá, viviam aproximadamente 160.000 habitantes. Já, segundo a projeção feita no último censo do IBGE, a população estimada para o ano de 2020 era de 182.717 habitantes para os três municípios. A principal atividade econômica da região é a pesca artesanal, atividade presente em mais de 50 comunidades ao redor da baía de Paranaguá.

O CEP possui uma profundidade média de 5,4 metros e é caracterizado por mudar a sua condição de estratificação: nas quadraturas de verão, apresenta-se altamente estratificado, passando a parcialmente misturado nas sizígias de verão e bem misturado durante as sizígias de inverno (MANTOVANELLI *et al.*, 2004).

Segundo Dalazen *et al.*, 2017, o CEP possui duas possíveis áreas de estagnação: a região da baía dos Pinheiros e a região próxima à cidade de Paranaguá. Durante o verão, as taxas de renovação na região da baía dos Pinheiros e a próxima à cidade de Paranaguá são menores que 95% e as idades da água maiores que 25 dias; nas demais regiões do CEP, os valores das taxas de renovação são superiores a 95% e as idades da água menores que 10 dias.

O clima da região, caracterizado como subtropical com verão quente (Cfa), segundo Lana *et al.* (2001), apresenta períodos mais chuvosos no final da primavera até o verão. A precipitação média no verão é até 3 vezes maior quando comparada com os períodos de seca, que abrangem o final do outono até o inverno. Outro fator que detém bastante influência no clima da região é a Serra do Mar, que cria uma barreira para frente fria, criando uma concentração de frentes estacionárias na região da onde se localizam as baías. Segundo Santos (2013), a região possui uma média de precipitação de 2500 mm tendo máximas de 5.300 mm e uma umidade do ar elevada, com uma média de 85%.

Influenciado pelo Anticiclone do Atlântico Sul e pelo Anticiclone Migratório Polar, o regime de vento da região é predominado pelos ventos dos setores ENE (Lés-Nosdeste), E (Leste), ESE (Lés-Sudeste) e SE (Sudeste) e possuem uma velocidade

média de 4,0 m/s (SILVA, 2004). Entretanto, segundo Lana *et al.* (2001), os ventos oriundos de fortes tempestades vindas do Sudeste podem chegar a 25,0 m/s.

A geomorfologia é influenciada principalmente pelo sistema de drenagem de água doce e pelas condições marinhas. O principal canal de entrada do CEP, com profundidade média de 10 metros, possui sedimentos de fundo caracterizados como areia fina (diâmetro menor que 0,062 mm). Na região próxima ao porto de Paranaguá, na região central do CEP, o fundo é formado principalmente por sedimentos argilosos, tendo menos da metade de areia em sua composição (LANA *et al.* 2001).

Essas características geomorfológicas e hidrográficas são favoráveis ao desenvolvimento da navegação (NOERNBERG *et al.*, 2008), fato que explica a existências do Complexo Portuário de Paranaguá e Antonina, formado pelos portos de Paranaguá e Antonina e pelos terminais de uso privado (TUP) Cattalini e Porto Pontal do Paraná. A Figura 2 indica a localização do Complexo Portuário de Paranaguá e Antonina.

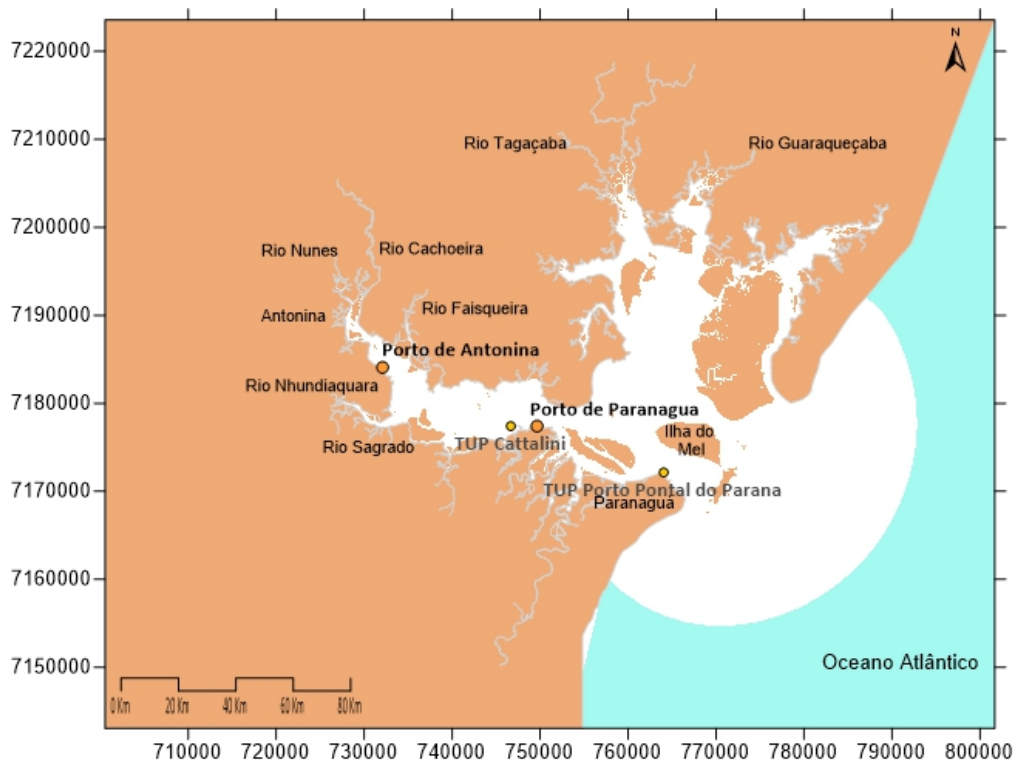


Figura 2. Localização do Complexo Portuário de Paranaguá, Antonina, TUP Cattalini e TUP Porto Pontal do Paraná.

Fonte: MTPA (2016)

Com relação a circulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá, segundo Lana *et al.* (2001), a mesma é regida principalmente pela maré e pelo aporte fluvial.

Sobre as vazões fluviais, o aporte de água doce para o CEP é feito principalmente pelos rios Cachoeira e Nhundiaquara, que possuem respectivamente vazão média de 21,13 m³/s e 15,88 m³/s. As águas subterrâneas também contribuem, cerca de 10%, para a entrada de água doce no Complexo Estuarino de Paranaguá. Em média, esse aporte chega a ser de 106 m³/s. (LANA *et al.*, 2001)

Devido a geomorfologia da região e, conseqüentemente, a circulação hidrodinâmica, os canais que dão acesso ao CEP são propícios à formação de bancos de areia. Estes bancos de areia são formados em decorrência da turbulência gerada por alguns tipos de onda que amplificam o transporte de sedimentos assoreando os canais de navegação na região. (SOUZA, 2015).

3.1.1 COMPLEXO PORTUÁRIO DE PARANAGUÁ E ANTONINA

O Porto de Paranaguá é o maior porto graneleiro da América Latina. Batizado de Dom Pedro II, o Porto de Paranaguá iniciou sua atividade no ano de 1872, com administrações particulares. Foi apenas 1917 que o governo do Paraná assumiu a administração do porto, que teve sua reinauguração em 17 de março de 1935. Nos dias atuais, o Porto de Paranaguá é um importante centro de comércio marítimo mundial. As cargas mais movimentadas são soja em grãos, farelo de soja, milho, sal, açúcar, fertilizantes, contêineres, congelados, derivados de petróleo, etanol e veículos (MTPA, 2016).

O Porto de Antonina surgiu em 1856 com a instalação do 1º trapiche. Em 1971 se uniu ao Porto de Paranaguá e passou a ser administrado pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA). Atualmente exporta basicamente carnes de aves congeladas (MTPA, 2016).

O terminal portuário denominado TUP Cattalini, localizado bem próximo ao Porto de Paranaguá, é especializado na movimentação de granel líquido e teve sua atividade iniciada em 1997. Já o TUP Porto Pontal do Paraná ainda não foi finalizado e se encontra na fase de projeto. Entretanto, desde 2014, o mesmo já possui a autorização definitiva para a construção do terminal deferida pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) (MTPA, 2016).

3.2 ONDAS

De uma forma geral, uma onda pode ser entendida como um meio em que uma informação irá se propagar entre dois pontos no tempo e no espaço. Por definição *Onda é um sinal que se propaga, tipicamente se movendo numa taxa distinta ao do movimento do meio* (SATO, 2010 APUD PEDLOSKY, 2003).

Os parâmetros básicos que definem uma onda são: amplitude, altura, comprimento e período, e são mostrados na Figura 3 de forma ilustrativas para uma função senoidal simples.

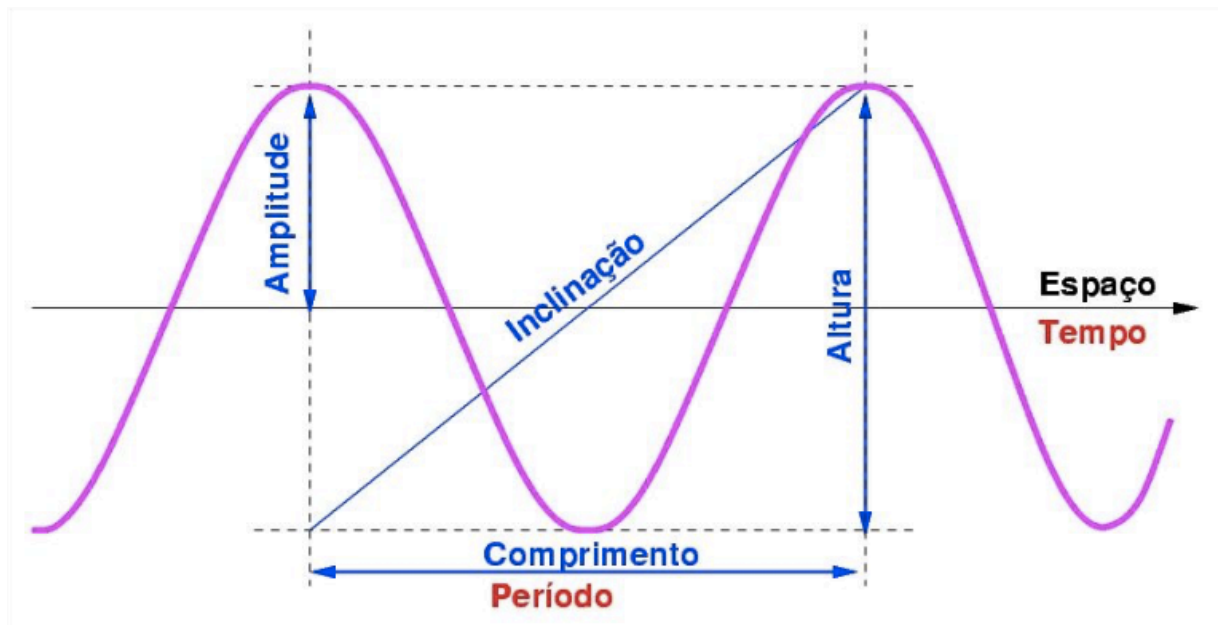


Figura 3. Definição dos parâmetros de uma onda senoidal.
Fonte: (SATO, 2010).

A maioria das ondas observadas no mar são consequência do atrito do vento sobre a superfície da água. Entretanto, essas ondas dependem da intensidade do vento, do tempo em que o vento sopra sobre a superfície do mar, sobre qual área o vento afeta a superfície (fetch) e em que direção o vento sopra. (Projeto SMC-Brasil, 2018).

As ondas oceânicas, segundo Sato (2010), sofrem influência das forças externas, de processos internos de instabilidade e do atrito. As mesmas podem ser classificadas como: sonoras, capilares, de gravidade, inercial, planetária e de maré. Estas ondas, quando ocorrem de forma simultânea com forças restauradoras, geram ondas mais complexas que possuem um importante papel na circulação

hidrodinâmica dos oceanos. A Figura 4 mostra, de forma ilustrativa, a classificação destas ondas categorizadas conforme seus períodos e comprimentos de ondas.

A Figura 4 apresenta, em ordem crescente, as ondas de períodos mais longos (ondas planetárias) até as ondas de períodos mais curtos (ondas capilares). Entretanto as ondas mais estudadas são as ondas de gravidade curta, geradas pelo vento.

A primeira onda definida na Figura 4, denominada como onda planetária, é formada pela variação na vorticidade potencial de equilíbrio devido à mudanças na profundidade ou latitude, que geram oscilações lentas e têm como característica serem mais longas (HOLTHUIJSEN, 2007 & SATO, 2010).

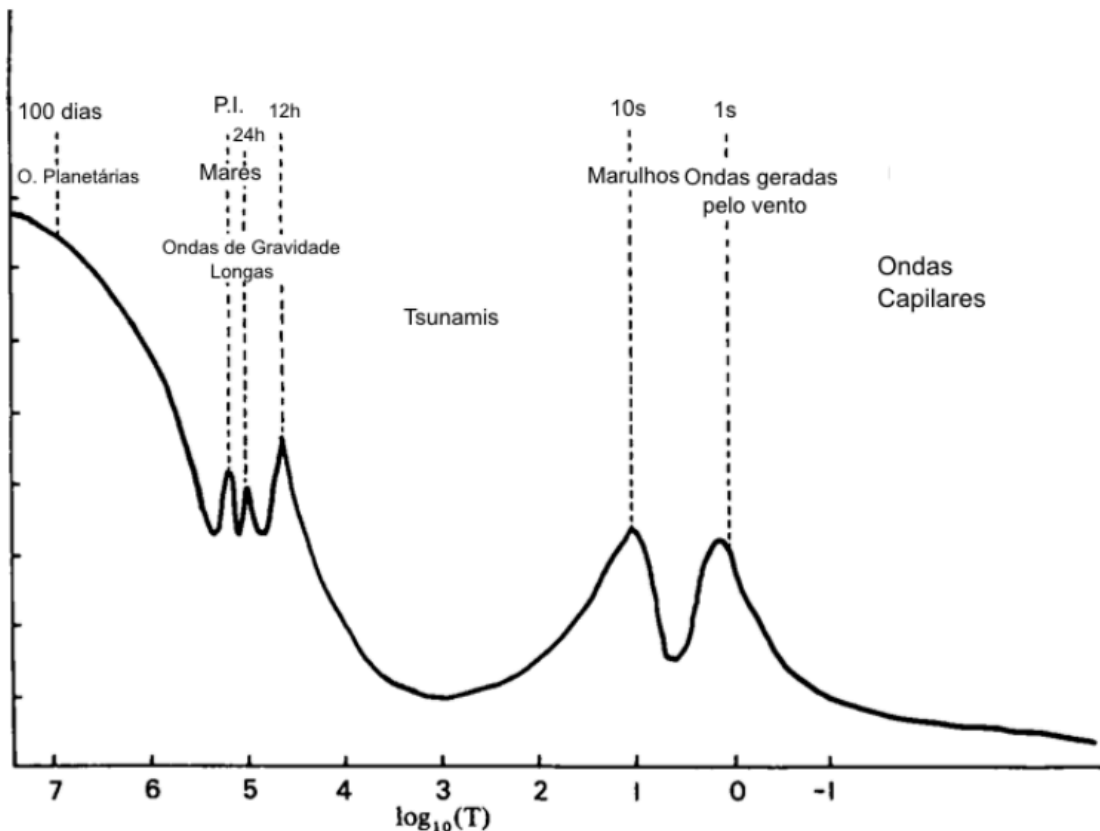


Figura 4. Ilustração esquemática, mostrando os diferentes tipos de ondas que ocorrem no oceano.
Fonte: SATO (2010 APUD LEBLOND E MYSK, 1978)

As marés, por outro lado, são geradas pela atração da Terra pela Lua e em menor grau, pelo Sol, e são ligeiramente mais curtas que as planetárias (HOLTHUIJSEN, 2007 e SATO, 2010). As forças de atração entre a Lua e o Sol se somam duas vezes em um intervalo médio de 29,53 dias. As marés de sizígia ocorrem durante as fases lunares de Lua Nova e Lua Cheia e têm como características

preamares muito altas e baixa-mares muito baixas (MIGUENS, 1996). Já durante a fases lunares do Quarto Crescente e Quarto Minguante, ocorrem as marés de quadratura, que produzem marés com preamares mais baixas e baixa-mares mais altas. O padrão de duas preamares e duas baixa-mares em um dia lunar, classifica a maré como semidiura.

As ondas de gravidade longas (marés meteorológicas) estão sempre ligadas a eventos meteorológicos, geradas por ventos em altas velocidades e pela baixa pressão atmosférica durante tempestades severas; possuem período e comprimento de ondas um pouco mais curtos que os das marés. Além disso, a escala espacial costuma ser algumas centenas de quilômetros e de tempo, um ou dois dias de período, sempre de forma equivalente com a tempestade geradora. (HOLTHUIJSEN, 2007).

Os tsunamis são ondas que possuem uma escala um pouco menor e, segundo Holthuijsen (2007), são difíceis de serem previstas, uma vez que são formadas como consequência de eventos como deslizamentos de terras ou terremotos. Esse tipo de onda possui uma baixa amplitude em oceano aberto, o que a torna quase imperceptível nesse local. Entretanto, ao se aproximar da costa, o tsunami ganha amplitude, causando estragos consideráveis quando atinge as regiões costeiras.

As ondas de gravidade curtas geradas pelo vento são de dois tipos: ondas com períodos inferiores a 10s, conhecidas como vagas (sea), e os marulhos (swell) que são ondulações com períodos superiores a 10s e geralmente são provenientes de regiões distantes. Vagas se referem às ondas que se encontram nos locais onde são geradas, ou seja, onde o vento está soprando e, portanto, possuem aparência caótica. Por outro lado, quando as ondas viajam e encontram-se distantes da zona de geração, elas produzem um ordenamento devido à dispersão da frequência das ondas, e são observadas ondas de cristas bem definidas, que viajam de forma organizada. Esta condição é denominada de marulhos (swell) (SATO, 2010 e Projeto SMC-Brasil, 2018).

As ondas que possuem períodos de aproximadamente 1s são chamadas de ondas de gravidade superficial. Já quando possuem períodos menores que $\frac{1}{4}$ de segundo, são movidas pela tensão superficial e são conhecidas como ondas capilares.

Dentre as ondas citadas, as ondas de gravidade curtas e as marés, estudadas neste trabalho, são as ondas mais influentes na região do complexo estuarino de Paranaguá (LANA *et al.*, 2001),

Os marulhos viajam grandes distâncias até que atingem a costa e quebram. Nesta viagem estão sujeitas a diferentes processos que as modificam e condicionam. Nos oceanos existem 3 diferentes zonas, onde as ondas se comportam de forma distinta: águas profundas, água intermediárias e águas rasas. A definição destas zonas depende do comprimento da onda, L (distância entre duas cristas da onda) e a profundidade média da água, d . A caracterização destas zonas pode ser observada na Tabela 1. (Projeto SMC-Brasil, 2018)

Tabela 1. Definição das zonas de propagação de ondas.

ZONAS	d/L
Águas profundas	0,5 a ∞
Intermediárias	0,05 a 0,5
Águas rasas	0 a 0,05

Fonte: Projeto SMC-Brasil (2018)

A Figura 5 representa a dinâmica da onda em ambientes rasos e profundos, o que pode explicar o processo de assoreamento que ocorre na entrada do CEP. De um modo geral a onda possui uma órbita que se desenvolve com uma coluna d'água. Em ambientes mais profundos esse volume não atinge o fundo, o que não causa a dispersão de materiais particulados que compõe o fundo dos oceanos. Isso faz com que as ondas viajem dependendo apenas de sua frequência (ondas dispersivas). Já em regiões mais rasas, essas partículas do fundo são dispersas causando uma movimentação de partículas, o que modifica as condições das ondas. (Projeto SMC-Brasil, 2018).

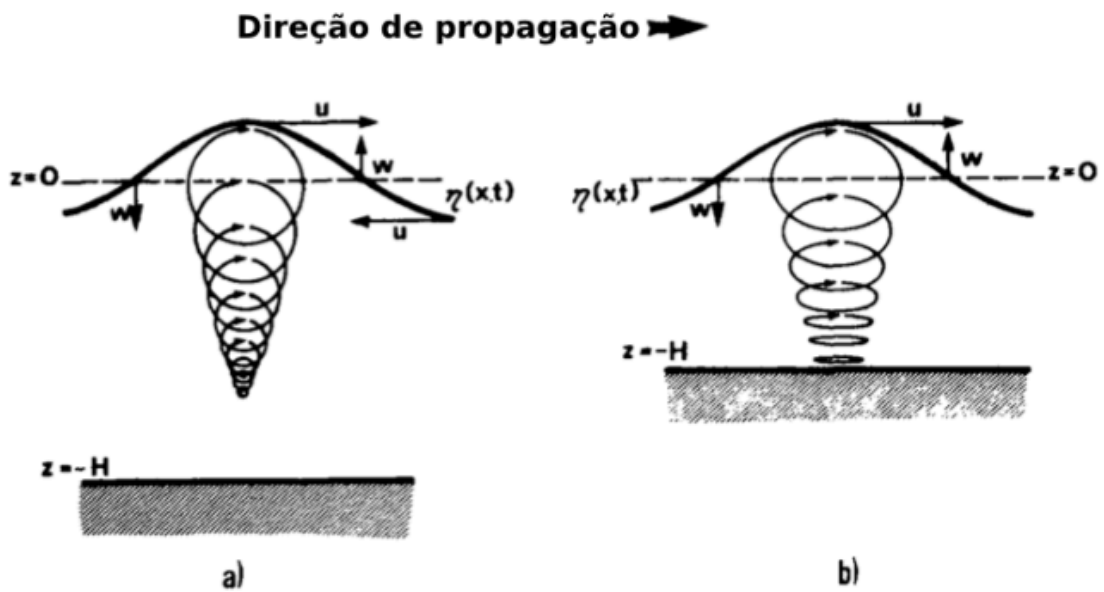


Figura 5. Órbita das partículas na coluna d'água durante a passagem de uma onda no caso de um oceano (a) profundo e (b) raso.

Fonte: Lana *et al.* (2001),

Os processos pelos quais os marulhos e as vagas são modificadas devido a diminuição da profundidade e a interação com o fundo são: empinamento, refração, difração, reflexão e arrebentação. A mudança da altura e no comprimento da onda devido à variação da profundidade é conhecido como empinamento de onda (shoaling). Já a refração é um fenômeno que afeta a altura e a direção das ondas. Esse ocorre quando a direção de propagação das ondas é oblíqua à orientação das isóbatas, fazendo com que a onda tenda a girar até que a orientação da frente de onda e da batimetria sejam paralelas entre si (Projeto SMC-Brasil, 2018).

Durante sua propagação as ondas oceânicas podem encontrar alguns obstáculos ou discontinuidades como ilhas, grandes variações de batimetria, ou quebra-mar. Isso faz com a onda sofra o processo de reflexão na zona do obstáculo e o processo de difração nas laterais, produzindo mudanças na altura e direção das ondas (Projeto SMC-Brasil, 2018).

Em regiões costeiras, as cristas das ondas em geral adquirem uma direção próxima à orientação da costa. Além disso, nesta região, a profundidade diminui e a altura da onda continua aumentando devido ao processo de empinamento. Entretanto, este aumento ocorre até um certo limite, uma vez que as ondas se tornam instáveis, que é quando ocorre sua quebra (Projeto SMC-Brasil, 2018).

A quebra da onda também dissipa a energia da onda e pode ser influenciado por diversos fatores, tais como a altura, período da onda e da declividade da praia. (Projeto SMC-Brasil, 2018).

3.3 ONDAS E MARÉS NA REGIÃO DO CEP

O regime de ondas na costa Sul do Brasil é dado pelo padrão de ventos no Atlântico Sul. Além disso, os ventos mais fortes são resultantes da passagem de ciclones extratropicais (Nemes & Marone, 2013). Os ciclones extratropicais são fenômenos normalmente ligados às passagens de frentes frias, caracterizam-se por fortes ventos e tempestades. Esses eventos são responsáveis pela formação de ondas altas sobre o oceano, podendo causar impactos negativos na economia e sofrimentos consideráveis para a população na região sul e Sudeste do Brasil (ROCHA *et al.* 2004).

Segundo Lana *et al.* (2001), as ondas são importantes na entrada do CEP, e possuem altura média de cerca de 0,5 m e períodos de 3 à 7 segundos. Porém, em eventos meteorológicos de tempestades, a altura média pode variar entre de 2 a 3 m e períodos superiores a 7 segundos.

Nemes & Marone (2013) mostraram a variabilidade intra-anual de dados de ondas medidos no litoral do Paraná. Para isso, foram feitas medições durante 14 meses e, segundo os autores, período suficiente para definir o clima de ondas na região. Os resultados obtidos pelos autores foi que a direção predominante de incidência das ondas, em ordem de importância: direção Sul-Sudeste (SSE), seguindo de Sudeste (SE), Sul (S) e Lés-sudeste (ESE). Ainda, segundo Nemes & Marone, 2013, existe uma predominância de ondas com períodos entre 8 e 9 segundos, classificadas como do tipo vagas, com menos incidências no outono e altura significativa de 1,0 m.

A presença de ondas do tipo *swell* também foi identificada por Nemes & marone (2013), e ocorrem de formas mais significativas no outono, com direção predominante Sul-Sudeste (SSE), períodos que variam entre 10 e 11s e alturas significativas entre 1,0 e 1,25 metros.

As marés no CEP são caracterizadas como semidiurna e, segundo Noernberg *et. al* (2008), as componentes mais importantes da maré astronômica são as componentes semidiurnas, M2 e S2, que juntas representam cerca de 50% a altura

da maré. As marés possuem amplitude média igual a 2,2 m em períodos de sizígia, caracterizado como mesomaré, enquanto as condições de micromaré podem ser observadas durante os períodos de quadratura (amplitude de maré entre 0,7 e 1,1 m) (LANA *et al.*, 2001). Entretanto, influenciado por fatores climáticos, as marés meteorológicas podem aumentar em até 80,0 cm o nível da água acima da maré astronômica, na região do porto de Paranaguá (LANA *et al.*, 2001). Além disso, a onda de maré no CEP é assimétrica, com cheias mais longas e vazantes mais curtas.

Considerando a importância ambiental, econômica e social do Complexo Estuarino de Paranaguá, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos, com o intuito de ampliar os conhecimentos sobre este ecossistema. Além dos estudos já citados anteriormente (NEMES & MARONE, 2013; LANA *et al.*, 2001; NOERNBERG *et al.*, 2008, MANTOVANELLI *et al.*, 2004 e DALAZEN *et al.*, 2017), trabalhos relevantes e que auxiliaram no desenvolvimento deste estudo foram os estudos desenvolvidos por Godoi (2011), Souza (2015) e Silva, Pereira & Rosman (2017), sobre o uso de modelos numéricos de propagação de ondas em regiões costeiras.

Godoi (2011) utilizou o modelo WAVEWATCH III para simular direção, altura média e período da onda na baía de Guanabara; os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo capaz de auxiliar na caracterização de eventos de ondas severas, que podem causar danos ambientais e econômicos para a região.

Souza (2015) estudou a interação e a variabilidade dos forçantes relacionados as ondas, marés e descarga fluvial, para entender o padrão geral de circulação no Complexo Estuarino de Paranaguá, a fim de investigar o impacto ambiental que o aumento da vazão e da ação das ondas teria na circulação hidrodinâmica e no transporte de sal do CEP, nos períodos de sizígias e quadraturas.

Silva, Pereira & Rosman (2017) apresentaram a análise da circulação hidrodinâmica na região costeira de Fortaleza. O estudo utiliza o modelo hidrodinâmico e de propagação de ondas do SisBaHiA[®] para realizar a análise, e considera a ação das marés, dos ventos locais e das ondas que incidem na costa, que foram obtidas através da base de dados do SMC-Brasil. Segundo os autores, os resultados obtidos, de modo geral, reproduziram bem as tendências observadas nos dados medidos.

3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.4.1 SisBaHiA®¹

Modelos são ferramentas que permitem uma visão dinâmica de fenômenos naturais e, por esse motivo, são utilizados para a gestão e planejamento de ações em corpos hídricos.

O SisBaHiA® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) é um sistema profissional de modelos computacionais desenvolvido pelo Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. (COPPE/UFRJ). Possui uma série de modelos, entre eles o modelo hidrodinâmico bidimensional e tridimensional e o modelo de propagação de ondas, que serão abordados nas próximas seções. O SisBaHiA® utiliza elementos finitos para a discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal.

Utilizado para representar o escoamento em domínios naturais com geometrias complexas, o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA® pode gerar resultados em forma bidimensionais (2DH) ou tridimensionais (3D).

Acoplado ao modelo hidrodinâmico, o modelo de propagação de ondas é capaz de propagar ondas monocromáticas ou espectros de ondas, considerando os efeitos de refração, difração, dissipação e arrebentação, sendo possível analisar os resultados em formas de mapas ou gráficos.

Existem dois tipos de modelos numéricos de propagação de ondas em águas rasas: Os que resolvem a fase (MRF) com base nas equações de balanço de quantidade de movimento e fluxo de massa, e aqueles que calculam a fase (MPF), os quais resolvem as equações de balanço de energia espectral ou ação da onda. O modelo de propagação do SisBaHiA® é um modelo espectral não dispersivo que resolve a fase (MRF) (IH CANTABRIA, 2017).

A interação entre os dois modelos se dá através dos tensores de radiação e de sub elevação de níveis devido às ações das ondas, calculados pelo modelo de propagação de onda e utilizados em cada passo de tempo pelo modelo hidrodinâmico, que determina a circulação hidrodinâmica da região considerando a influência das

¹ Texto adaptado de Rosman (2021)

ondas. Entretanto esta interação só é relevante em locais com grande variação da altura da onda.

Os tensores de radiação são calculados com base nos tensores que geram cada uma das componentes de energia. Essas componentes são propagadas com um ângulo θ em relação ao eixo x . A soma linear das mesmas, determina as expressões de tensores de radiação, expressas pelas Equações 1, 2 e 3 (IH CANTABRIA, 2017).

$$S_{xx}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 (n_j (1 + \cos^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2}) \quad (\text{Equação 1})$$

$$S_{yy}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 (n_j (1 + \sin^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2}) \quad (\text{Equação 2})$$

$$S_{xy}(x, y) = \frac{1}{4} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 (n_j \sin(2\theta_{jl})) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde S_{xx} é o tensor de radiação atuando no plano x , ao longo do eixo x ; S_{yy} é o tensor de radiação atuando no plano y ao longo do eixo y ; S_{xy} é o tensor de radiação atuando sobre o plano y ao longo do eixo x ; ρ é a massa específica da água; g é a gravidade; A_{jl} é a amplitude; e n_j é a relação da velocidade em relação à velocidade de fase do componente frequencial j .

Os valores de $S_{ij} = S_{ji}$ são computados no modelo de propagação de ondas e repassados ao modelo hidrodinâmico e são semelhantes as tensões geradas pelo vento. Tais termos representam o efeito das tensões de radiação devido as ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas. As equações de conservação de quantidade de movimento 2DH, para um escoamento integrado na vertical, na direção x (Equação 4) e na direção y (Equação 5), com as tensões de radiação são:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) \\ + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) - \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + 2\Phi \sin \theta V - \frac{U}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + 2\Phi \text{sen } \theta U - \frac{V}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (\text{Equação 5})$$

Nas equações U , V são respectivamente as velocidades médias na vertical, na direção x e y , $\bar{\rho}$ é a densidade da água promediada na coluna na vertical, τ_i^S e τ_i^B são as tensões de atrito na superfície livre e no fundo, respectivamente, ζ é a elevação da superfície livre, H a altura efetiva da coluna de água, $\bar{\tau}_{xx}$, $\bar{\tau}_{xy}$, $\bar{\tau}_{yy}$ são as tensões turbulentas, Σq é a soma dos balanços dos fluxos de precipitação, evaporação e infiltração por unidade de área, Φ é a velocidade angular de rotação da Terra e θ é o ângulo de Latitude.

3.4.2 SMC – Brasil

O Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) é um sistema computacional que combina uma série de bases de dados de batimetria, ondas e nível do mar (dados de maré astronômica e meteorológica), com o intuito de facilitar o estudo de problemas ambientais em zonas costeiras (IH CANTABRIA, 2017).

Desenvolvido inicialmente pelo Instituto Hidráulico Ambiental da Cantabria (IH Cantabria) da Universidade da Cantabria, com o apoio da Diretoria Geral de Costas do Ministério do Meio Ambiente da Espanha, o SMC foi adaptado para o Brasil através do projeto: “Transferência de metodologias e ferramentas de apoio à gestão da costa brasileira” (IH CANTABRIA, 2017).

O SMC combina uma série de dados de um período de 60 anos (1948 - 2008) de diferentes pontos ao longo da costa brasileira. Os dados de saída do sistema são obtidos através da reanálise, que estima parâmetros como a altura média (H_s), direção, período (T_s) e a frequência das ondas em um determinado ponto.

Para obtenção de dados e caracterização das ondas, o Projeto SMC-Brasil utilizou registros obtidos por meio de boias ou instrumentos colocados nas proximidades das regiões costeiras. Entretanto, esse tipo de informação possui uma limitação, uma vez que tempos de amostragem são curtos e são obtidas informações apenas em um ponto. De forma a amenizar esta limitação, o programa faz uso de

informações obtidas a partir de métodos de reanálise baseados em modelos numéricos.

Os dados do SMC possuem uma resolução horária com espaçamento de 1km para profundidade até 20 metros e espaçamentos de 10km para profundidades maiores que 20m. Além disso na página oficial do SMC-Brasil (<https://smcbrasil.paginas.ufsc.br/banco-de-dados/dados-de-ondas/>) é informado que os dados foram calibrados e validados para serem aplicados em estudos da dinâmica costeira do Brasil. A calibração foi realizada usando dados de duas boias: a primeira localizada em Tramandaí – RS, a 17 metros de profundidade (29°59'58"S, 50°06'09"O) e a segunda, localizada à 80 metros de profundidade, fundeada entre os anos de 2001 a 2005, a 35km da costa da Ilha de Santa Catarina (27°42'18"S, 48°8'2,4"O).

O SMC possui uma ferramenta que permite a transferência de uma série de dados de ondas a partir de profundidades indefinidas para pontos na costa previamente definidos, chamados de DOW (Downscaling Ocean Waves), que contém uma série temporal de ondas, e ainda a outra duas, associadas a maré astronômica, denominada pontos GOT (Global Ocean Tides), e a maré meteorológica, pontos GOS (Global Ocean Surge).

Definido o ponto DOW é possível fazer uma análise estatística das variáveis ambientais. Para verificar a influência das ondas na circulação interna através do SisBaHiA®, foram utilizados os dados obtidos pelo SMC-Brasil. Maiores informações sobre o SMC-Brasil podem ser obtidas em <https://smcbrasil.ufsc.br/>.

4 METODOLOGIA

Utilizando o modelo hidrodinâmico bidimensional (2DH) acoplado com o modelo de propagação de ondas, na presente seção são apresentados os dados usados nas simulações, assim como os cenários considerados neste trabalho. Primeiramente foi realizada as simulações para o verão de 2019 e, posteriormente, as simulações para o período de inverno de 2019. Sendo assim, é mostrado a seguir o conjunto de dados obtidos para os dois períodos.

4.1 DADOS DO MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

O domínio de modelagem, usado no modelo de circulação hidrodinâmica, foi previamente utilizado e apresentado por Cunha *et al.* (2015), e pode ser vista na Figura 6. O mesmo domínio foi utilizado em outros estudos: Dalazen (2017) e Santos (2016). Neste trabalho, todos os dados foram verificados e, quando necessário, adaptados de forma a atender o problema proposto.

A malha possui 1606 elementos finitos com 7216 nós, com espaçamento variando entre 120 e 2000 metros, distribuídos em uma área de domínio de 1.174 km².

A batimetria da região do CEP utilizada neste estudo, que pode ser observada na Figura 7, foi obtida através da interpretação das cartas náuticas (nº 1820, 1821 e 1822) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e de dados fornecidos pela empresa EnvEx Engenharia e Consultoria Ambiental. É possível observar que o CEP possui dois canais de entrada: o canal localizado à Nordeste possui profundidades maiores (entre 19 e 22 metros), já o canal da Galheta, à sul da Ilha do Mel, possui menores profundidades que variam entre 6 a 14 metros. Observa-se também os bancos de areia na entrada do CEP, que tende a dissipar a maior parte da energia das ondas, agindo como quebra-mares submersos.

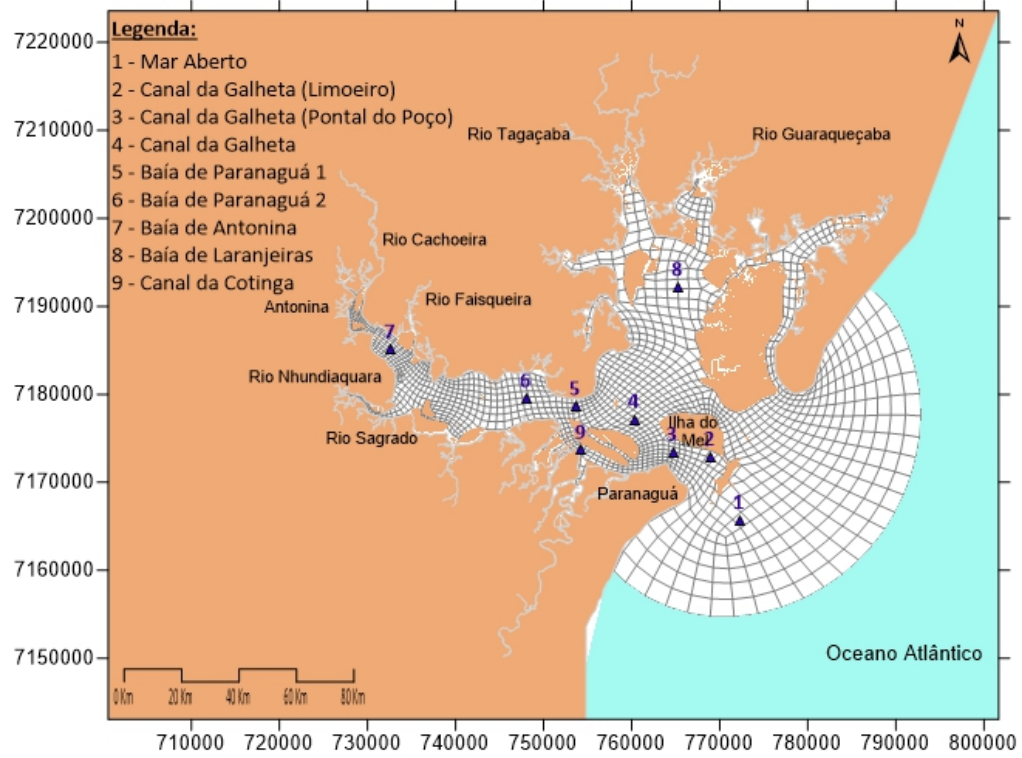


Figura 6. Definição do domínio de modelagem, da malha e localização das estações usadas para apresentar os resultados.

Fonte: Cunha *et al.* (2015)

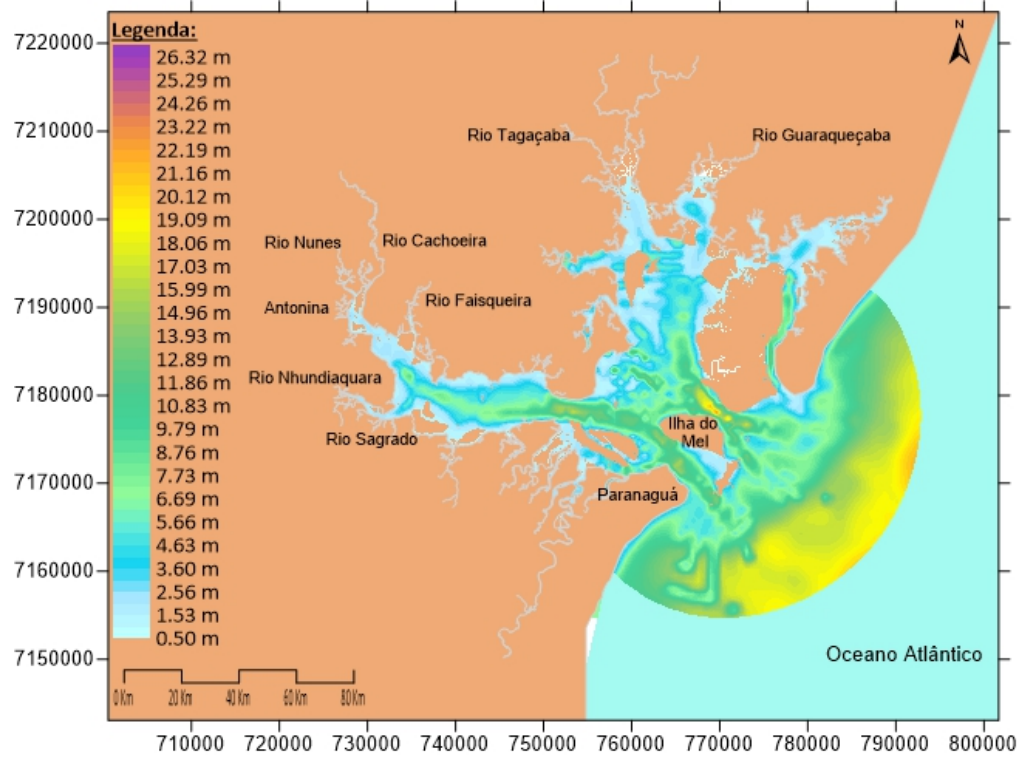


Figura 7. Topografia de fundo no domínio de modelagem do CEP.

Fonte: Cunha *et al.* (2015)

Os valores de amplitude da rugosidade do fundo para o Complexo Estuarino de Paranaguá, definidos por Cunha *et al.* (2015), podem ser observados na Figura 8. Utilizando como base os valores de rugosidade sugeridos por Rosman (2021), mostrados na Tabela 2, é possível observar que, próximo à saída do canal da Galheta, existe a presença de um banco de areia grossa. Além disso, é possível observar que os sedimentos do fundo do CEP são, em sua maioria, compostos por siltes, areias finas e médias.

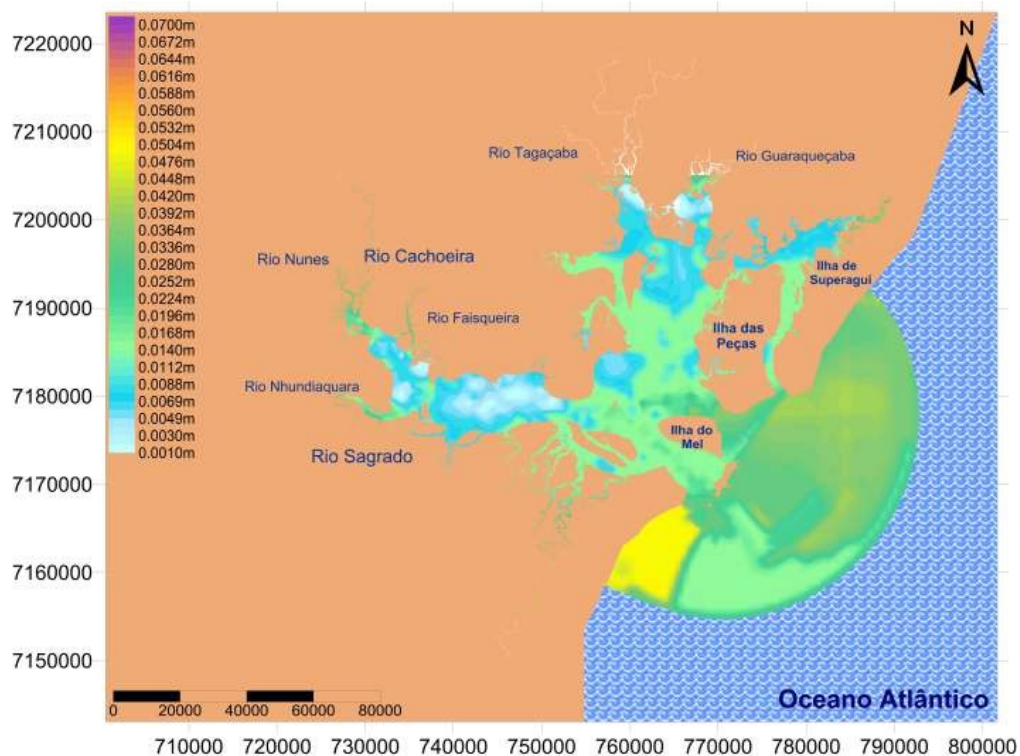


Figura 8. Valores da amplitude da rugosidade de fundo (m).

Fonte: Cunha *et al.* (2015)

Tabela 2. Valores sugeridos para a rugosidade equivalente de fundo

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltes e finos	$0,0001\text{m} < \epsilon < 0,0100\text{m}$
Predominância de areias finas	$0,0070\text{m} < \epsilon < 0,0150\text{m}$
Predominância de areias médias	$0,0100\text{m} < \epsilon < 0,0300\text{m}$
Predominância de areias grossas	$0,0250\text{m} < \epsilon < 0,0500\text{m}$
Predominância de areias muito grossas	$0,0400\text{m} < \epsilon < 0,0800\text{m}$
Predominância de areias com cascalho	$0,0500\text{m} < \epsilon < 0,1200\text{m}$
Sedimentos com vegetação	$0,0500\text{m} < \epsilon < 0,1500\text{m}$
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0,1500\text{m} < \epsilon < 0,4000\text{m}$

Fonte: Parte da tabela extraída de Rosman (2021), adaptado de Abbott e Basco (1989)

4.2 DADOS DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA

O modelo de propagação de onda é executado simultaneamente e de forma acoplada ao modelo da circulação hidrodinâmica. Desta forma, a circulação calculada pelo modelo hidrodinâmico considera a influência das ondas e dos demais forçantes, maré, vento e aporte fluvial para as simulações dos cenários onde o objetivo é verificar se a circulação hidrodinâmica é influenciada pelas ondas.

Para o modelo de propagação de onda é necessário definir um novo domínio de modelagem, que pode ser vista na Figura 9. Este domínio apresenta limitações em relação à direção das ondas que poderão ser propagadas. Na malha representada pela Figura 9, em verde, que possui um comprimento de cerca de 40 Km, representa o Lado de Incidência de Ondas, ou seja, onde a onda iniciará e será propagada para dentro do CEP. Neste caso, é possível propagar ondas com azimute entre 95° e 175° . O quadrado interno, pontilhado em azul, representa o limite onde o modelo irá apresentar os resultados. E o quadrado tracejado em vermelho representa os limites da batimetria.

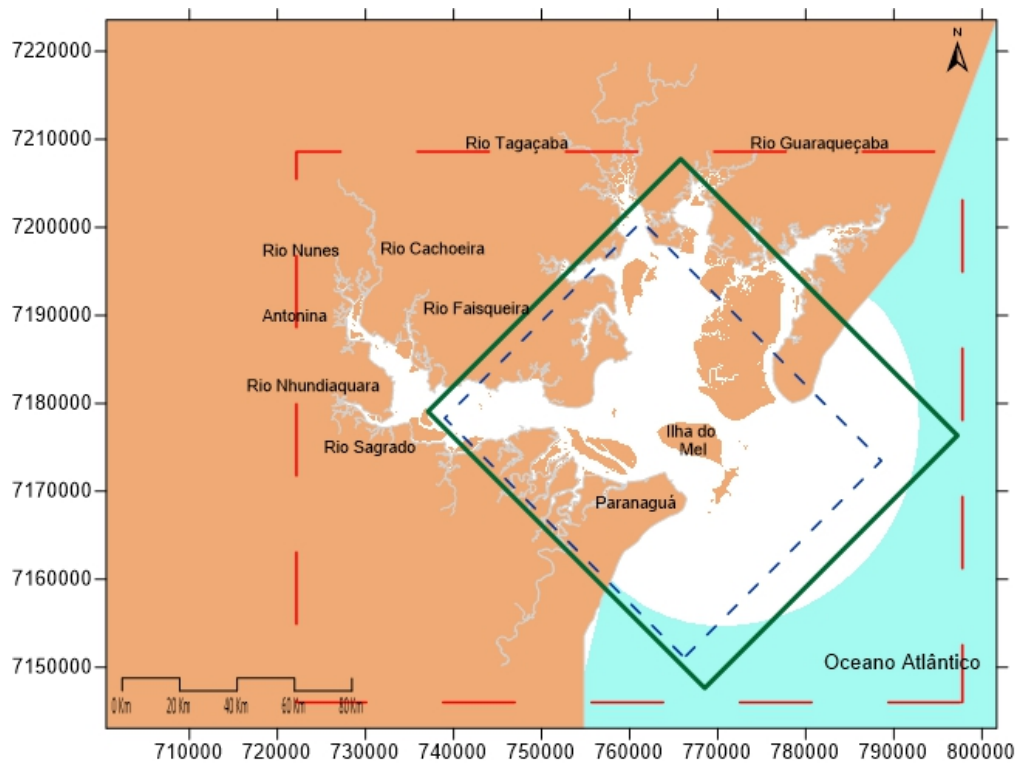


Figura 9. Malha para o modelo de propagação da onda.

Fonte: A autora (2021)

O modelo de Propagação de Ondas usa o método de diferenças finitas; os demais parâmetros definidos para este trabalho podem ser observados no ANEXO 1.

A batimetria utilizada para este domínio foi a mesma do modelo hidrodinâmico. As únicas alterações foram ajustes feitos para uma melhor delimitação das fronteiras de terra, uma vez que as ondas de gravidade funcionam de forma muito dependente a batimetria do modelo e, portanto, precisam estar muito bem definidas.

4.3 DADOS DE ONDAS

Os dados de ondas foram retirados da base de dados do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil). Estas informações foram extraídas do ponto P (Figura 10), na cota 25 m, próximo à entrada do CEP, com coordenadas (latitude: $-25,7^\circ$ e longitude: $-48,1^\circ$).

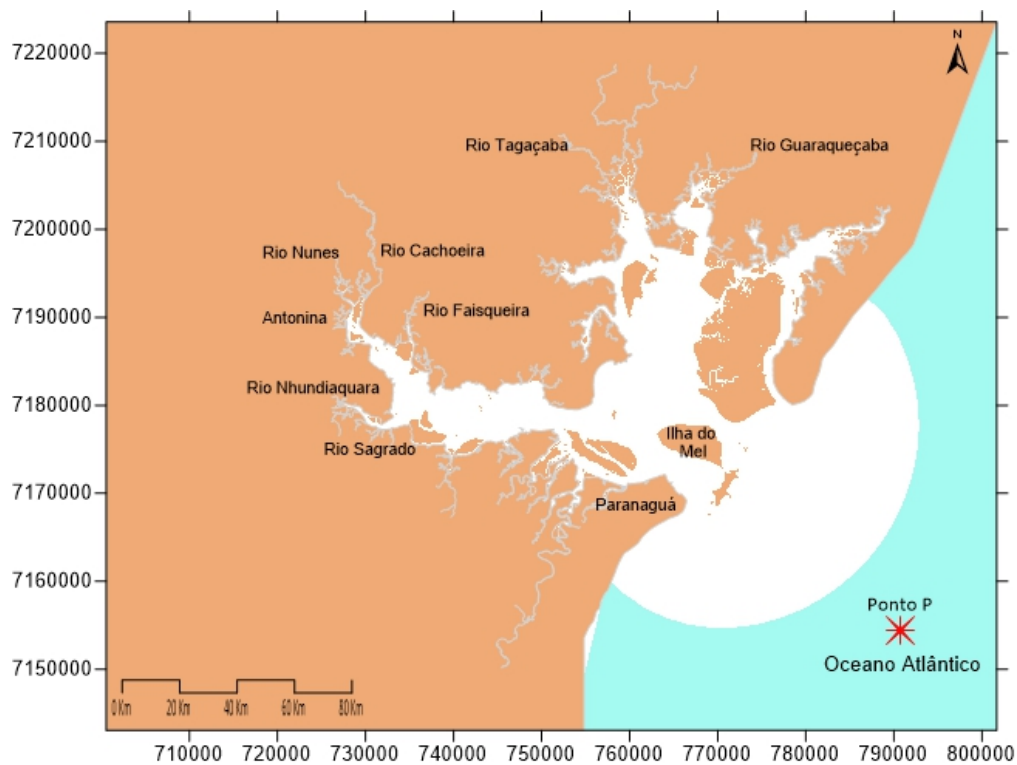


Figura 10. Localização do ponto P, onde os dados de ondas foram extraídos do SMC-Brasil.
Fonte: SMC-Brasil

De modo a facilitar a visualização, as informações mostradas nesta seção são um resumo dos dados gerados pelo SMC-Brasil, que foram usados no modelo hidrodinâmico e de propagação de ondas do SisBaHiA[®]. Os resultados completos obtidos pelo SMC, podem ser vistos no ANEXO 2.

De modo a representar o clima de ondas ao largo, para que os cenários de simulação possam ser definidos, foram utilizados os dados de ondas para o regime típico, $H_{s50\%}$, que é a altura significativa definida como o valor médio do terço das maiores ondas de um estado de mar; 50% indica o valor abaixo do qual estão 50% das alturas significativas registradas. Para o regime extremo foi usado o valor máximo de média móvel com período de 12h ao longo de todo o registro da série temporal de dados, H_{s12} indica o máximo valor de altura significativa promediada por períodos de 12h em todo o registro; no caso de um registro de 60 anos.

Como pode ser observado na Tabela 3, para o período de 1948 a 2008 (60 anos) com resolução horária, as ondas mais frequentes, representando 54,76% dos casos, são as ondas de ESE (Leste-sudeste), com $H_{s50\%}$ de 1,55 metros. Já as ondas de tempestades (H_{s12}), têm alturas de 2,99 metros, na mesma direção.

A segunda onda de maior influência no CEP são as ondas de SE (Sudeste). Representando 28,34% dos casos, estas ondas são ligeiramente maiores, com $H_{s50\%}$ de 1,69 metros e H_{s12} com alturas de 3,33 metros.

Tabela 3. Dados de ondas gerados pelo SMC-Brasil para o ponto P.

SETOR	%	$H_{s50\%}$ (m)	H_{s12} (m)
N	0,03	1,17	1,81
NNE	0,05	1,24	1,78
NE	0,10	1,17	1,93
ENE	0,30	1,12	2,62
E	9,62	1,28	2,7
ESE	54,76	1,55	2,99
SE	28,34	1,69	3,33
SSE	5,92	1,84	3,66
S	0,54	1,48	2,87
SSW	0,15	1,38	2,58
SW	0,05	1,37	2,13
WSW	0,03	1,29	2,03
W	0,03	1,27	1,99
WNW	0,02	1,19	1,75
NW	0,03	1,13	1,74
NNW	0,03	1,16	1,77

Fonte: SMC-Brasil (ANEXO 2 - Figura A)

Um outro dado fornecido pelo SMC é o de altura significativa da onda (H_s) e período de pico (T_p) representado pela Função de Densidade Conjunta de H_s e T_p

(ANEXO 2 - Figura D). Para o período de 1948 a 2008, a altura significativa da onda $H_{s50\%}$ é de 1,57 metros com períodos de 7 à 10 segundos, e a altura da onda H_{s12} é de 3,20 m com períodos de 10 à 13 segundos.

A Figura 11 mostra as rosas direcionais de Hs para as estações do ano no ponto P. Em todas as estações do ano, a maior frequência de ondas ocorre na direção citada anteriormente, ESE (Leste-sudeste). Além disso, considerando esta frequência anual e sazonal, temos que as ondas possuem uma altura média de 1,5 metros e um período de 7,6 segundos. (ANEXO 2 - Figura B e Figura C).

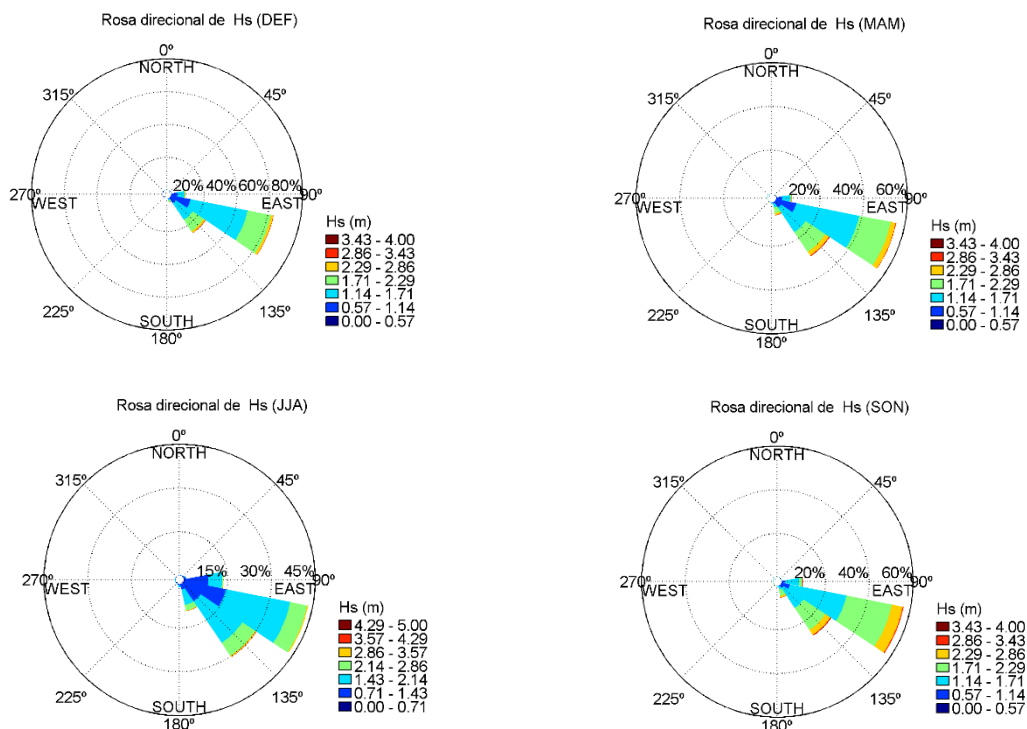


Figura 11. Rosas direcionais de Hs para as estações do ano no ponto P. DEF: dezembro, janeiro e fevereiro; MAM: março, abril e maio; JJA: junho, julho e agosto; SON: setembro outubro e novembro.
Fonte: SMC-Brasil (ANEXO 2 - Figura C).

Considerando a altura máxima de Hs obtida pelo SMC, temos que as maiores ondas, de 3,0 metros com períodos de 10,6 s, ocorrem na direção ESE. Entretanto, estas ondas possuem uma frequência anual baixa, quase nula, nos meses de Dezembro a Maio, e de 0,1%, de Junho a Novembro (ANEXO 2 - Figura B).

Analisando as rosas direcionais da altura significativa das ondas para as estações do ano, Figura 11, temos que nos meses entre Dezembro e Maio (DEF e MAM), que representam as estações do verão e outono, a altura da onda mais

significativa varia entre 1,14 à 1,71 metros. Além disso a direção predominante é a ESE, seguida de Sudeste (SE), com pouca frequência das ondas de Leste (E).

No inverno, representadas pelos meses de Junho à Agosto (JJA), e para a primavera, de Setembro a Novembro (SON), as direções das ondas possuem mesmo comportamento direcional que as estações anteriores, com predominância de ESE, seguida do SE, E e SSE. Entre os meses Junho à Agosto, a altura média da onda fica entre 1,43 à 2,14 metros; já para os meses de Setembro à Novembro, varia entre 1,71 à 2,29 m.

Utilizando o modelo de propagação de ondas do SisBaHiA[®], as ondas mais frequentes, que neste caso são as mesmas para o verão e inverno, foram propagadas para dentro do Complexo Estuarino de Paranaguá. Sendo assim, de forma sintetizada as ondas médias (H_s) e de tempestades (H_{12}) possuem respectivamente alturas e períodos de 1,55 m e 7,6 s, para H_{s12} é de 3,0 metros e 12 segundos

Além das ondas obtidas pelo SMC-Brasil, foram simuladas sériestemporais, com dados horários de altura, período e direção de ondas ao largo, para o período de verão e inverno, obtidas através de modelos de reanálises do ERA-Interim pelo sistema Copernicus Climate Change Service (C3S) (STÜKER et al., 2016).

4.4 DADOS DE VENTO

O vento tem um papel importante na circulação hidrodinâmica. Os dados usados neste trabalho, fornecidos pelo SIMEPAR – Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná, foram medidos na estação Paranaguá (código: 25534852), latitude 25°30'21,719S e longitude -48°31'47,906" O, para o ano de 2019. Além disso, dados horários de intensidade e direção de ventos foram coletados em seis pontos, obtidos a partir do modelo reanálise do ERA-Interim, do sistema *Copernicus Climate Change Service* (STÜKER et al., 2016).

Estes dados de reanálise são obtidos a partir da combinação de dados anteriores observados com modelos que geram séries temporais de diversas variáveis climáticas. O período e a periodicidade são os mesmos da estação de Paranaguá. A localização da estação do SIMEPAR e dos pontos utilizados neste trabalho está mostrada na Figura 12.

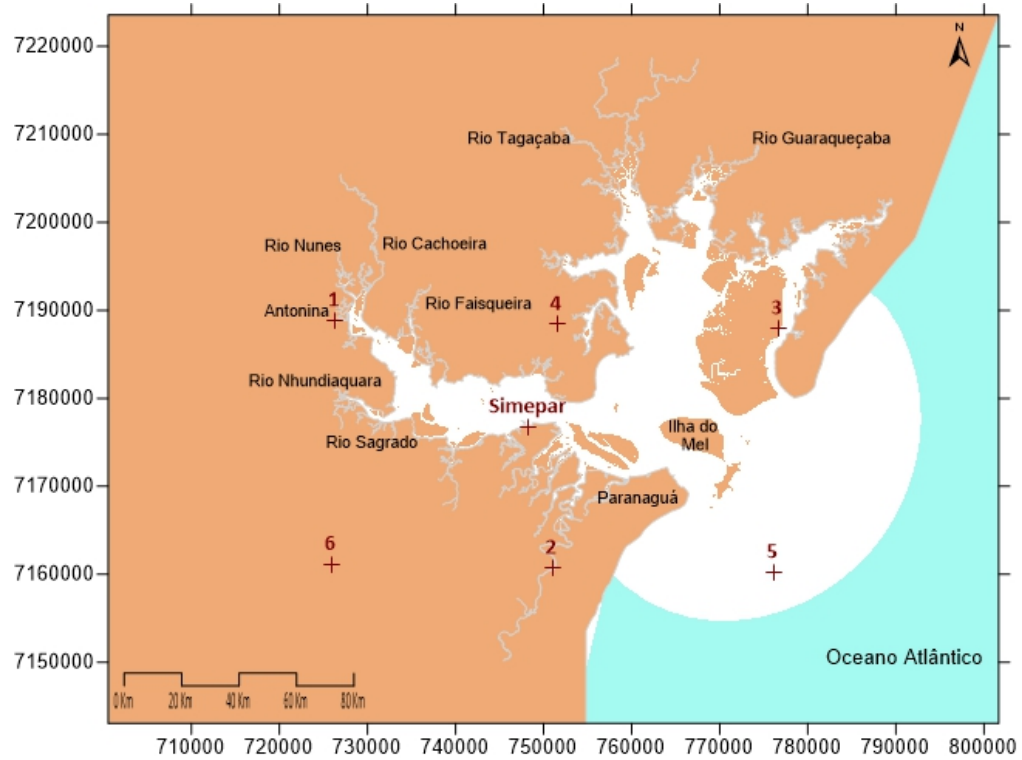


Figura 12. Localização das estações de vento.

Fonte: Simepar & Copernicus Climate Change Service

A partir destes dados foi possível comparar valores de dados observados com os dados de reanálise do ERA-Interim. A Figura 13 mostra a comparação das velocidades do vento da estação de Paranaguá com os pontos 2 e 4 do ERA-Interim para o mês de janeiro de 2019. Estas estações foram selecionadas devido à proximidade com o CEP. Como o comportamento e os valores máximos entre as estações são próximos, os dados de reanálise foram considerados adequados para este estudo. (STÜKER et al., 2016).

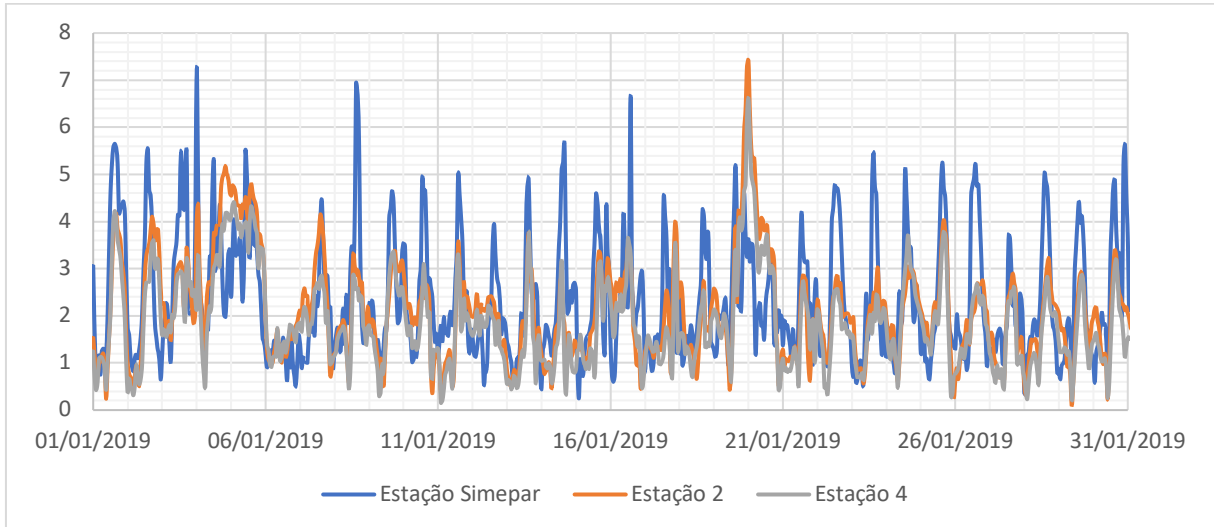


Figura 13. Comparação das velocidades do vento da estação de Paranaguá com os pontos 2 e 4 do ERA-Interim para o mês de janeiro de 2019. **Fonte:** Simepar & Copernicus Climate Change Service

As Figuras 14 à 20 mostram as rosas dos ventos para o período de verão (janeiro e fevereiro) e inverno (julho e agosto) de 2019, para estação Paranaguá (SIMEPAR) e para os pontos do ERA-Interim (1 a 6). É possível verificar que, para verão do ano de 2019, o vento mais frequente ocorreu na direção Sul-Sudeste (SSE) (Pontos 1 até 6), com velocidade variando entre de 2,0 e 4,0 m/s. Nos pontos 1, 4 e 6 e na estação de Paranaguá observa-se um vento frequente na direção Noroeste, com velocidade variando entre 0,5 e 5,70 m/s. Nos pontos 3, 5 e 6 observa-se um vento na direção Nordeste, com velocidade variando entre 0,5 e 8,8 m/s.

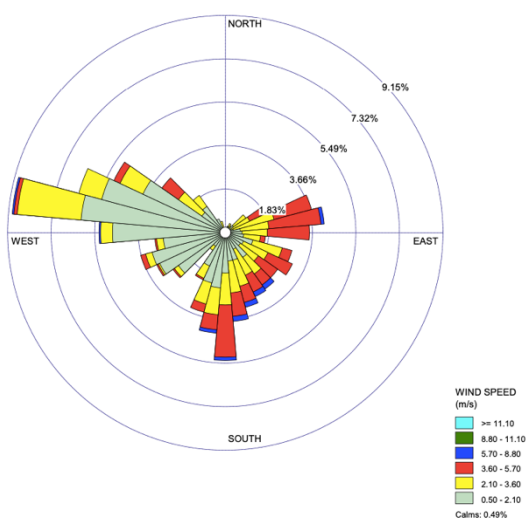


Figura 14. Rosa dos ventos da estação Paranaguá (Simepar) - verão do ano de 2019.

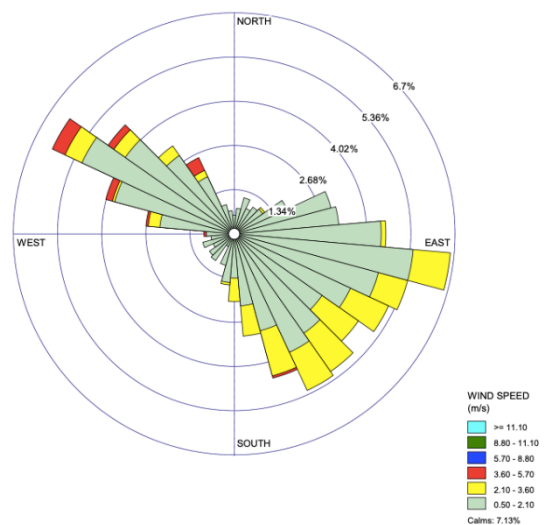


Figura 15. Rosa dos ventos no ponto 1- verão do ano de 2019.

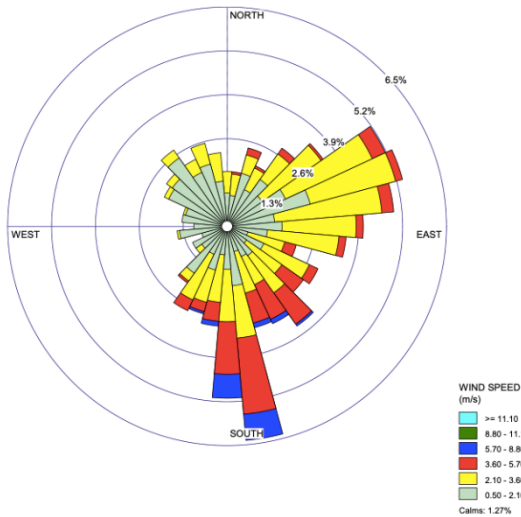


Figura 16. Rosa dos ventos no ponto 2 - verão do ano de 2019.

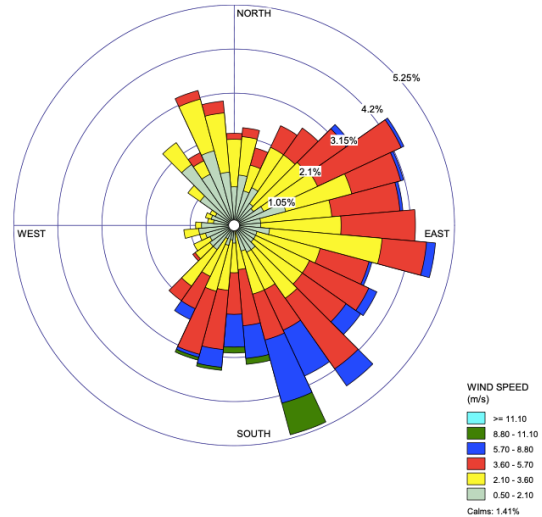


Figura 17. Rosa dos ventos no ponto 3 - verão do ano de 2019.

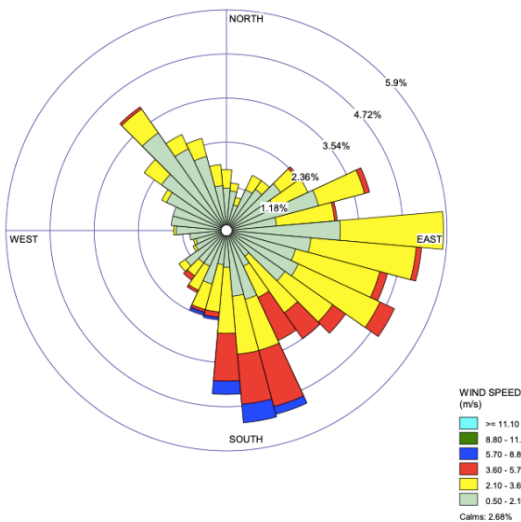


Figura 18. Rosa dos ventos no ponto 2 - verão do ano de 2019.

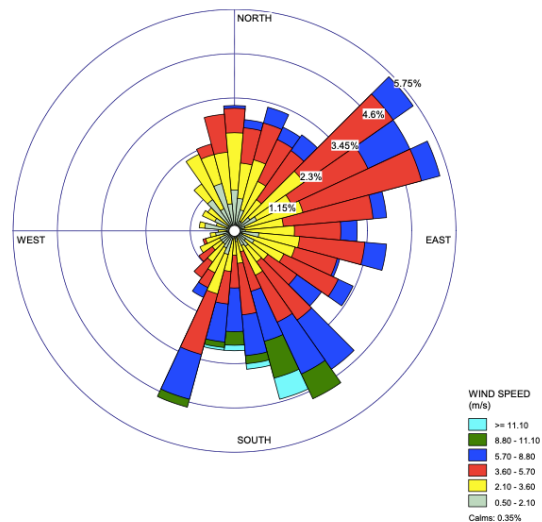


Figura 19. Rosa dos ventos da no ponto 5 - verão do ano de 2019.

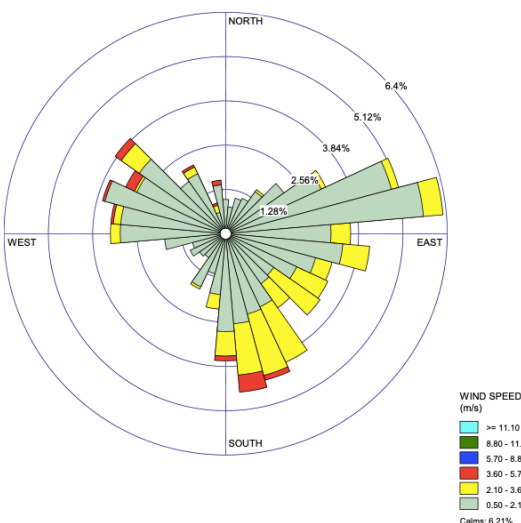


Figura 20. Rosa dos ventos no ponto 6 - verão do ano de 2019.

No período do inverno, (Figura 21 a Figura 27) observa-se que o vento mais frequente é na direção sul, na maioria das estações, com velocidade variando entre 0,5 e 11,10 m/s. Porém, nos pontos 1 e 6, o vento mais frequente são nas direções Oes-Noroeste e oeste com velocidades entre 0,5 e 3,6 m/s. Também é possível verificar que, durante este período, com exceção dos pontos 1 e 6, ocorre vento frequente na direção Nordeste.

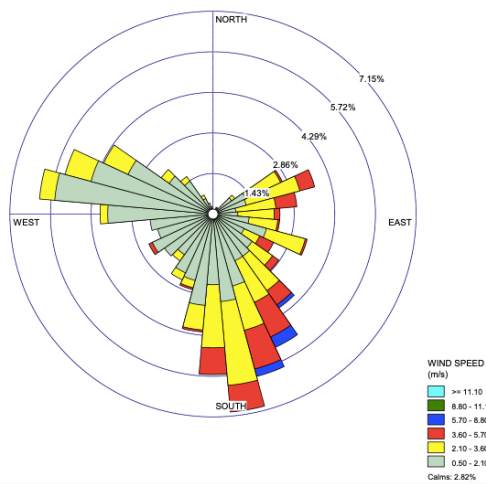


Figura 21. Rosa dos ventos da estação do SIMEPAR - inverno do ano de 2019.

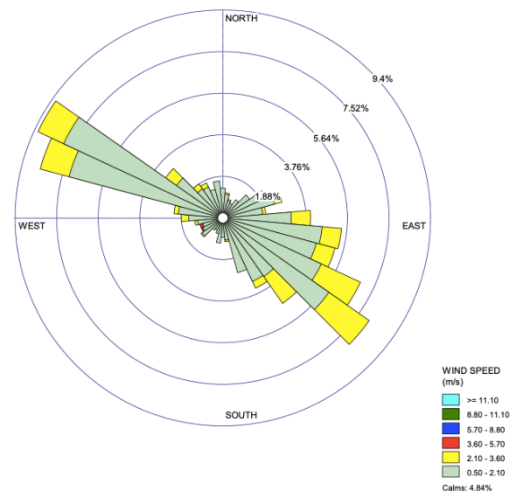


Figura 22. Rosa dos ventos no ponto 1 - inverno do ano de 2019.

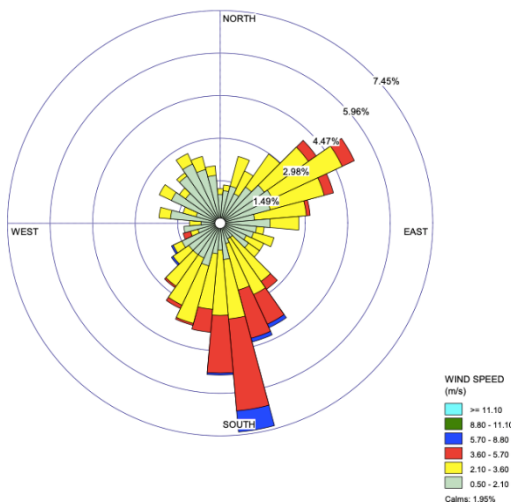


Figura 23. Rosa dos ventos no ponto 2 - inverno do ano de 2019.

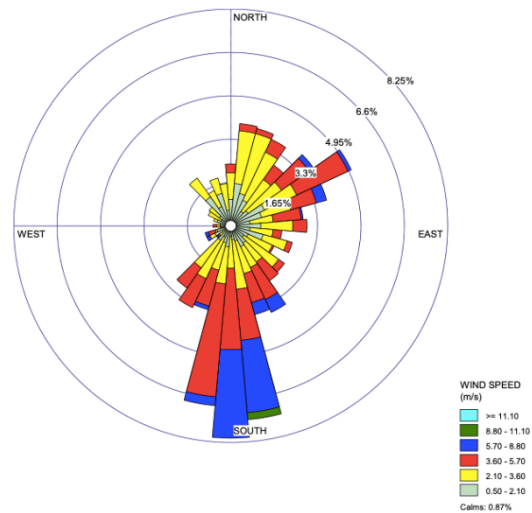


Figura 24. Rosa dos ventos no ponto 3 - inverno do ano de 2019.

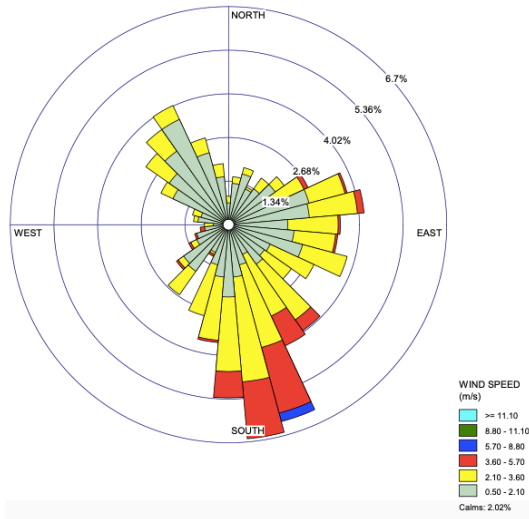


Figura 25. Rosa dos ventos no ponto 4 - inverno do ano de 2019.

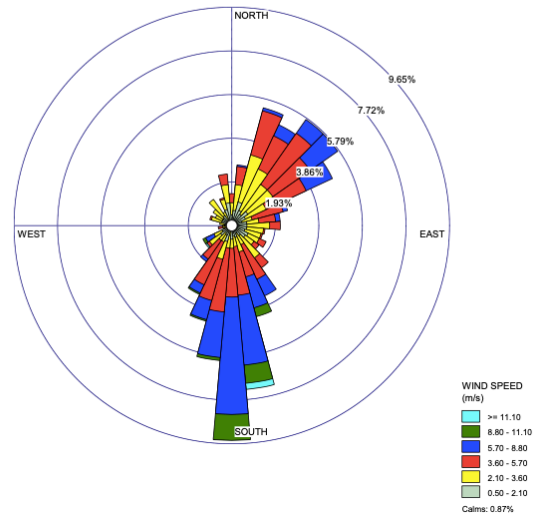


Figura 26 Rosa dos ventos no ponto 5 - inverno do ano de 2019.

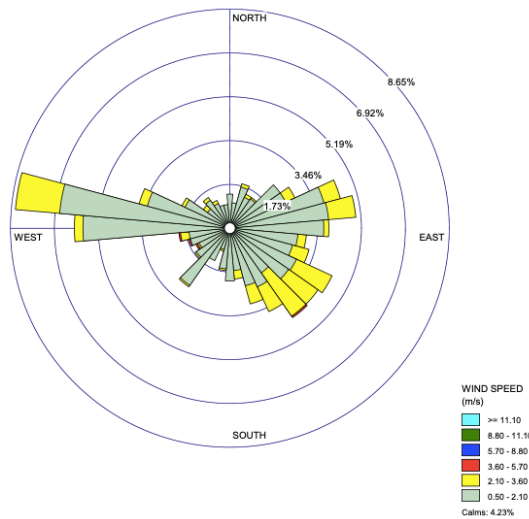


Figura 27. Rosa dos ventos no ponto 6 - inverno do ano de 2019.

4.5 DADOS DE VAZÃO

Nas simulações foram consideradas as contribuições de sete corpos hídricos que desaguam na região do CEP. As informações sobre as vazões para os principais rios, Cachoeira, Nhundiaquara, Tagaçaba, Guaraqueçaba, Sagrado e Nunes, foram obtidas no banco de dados Hidroweb (ANA, 2021). As vazões médias mensais estão mostradas na Tabela 4 e Figura 28.

Tabela 4. Dados de vazão média mensais dos rios que deságuam no CEP.

Meses	Vazões (m ³ /s)					
	Cachoeira ⁽¹⁾	Nhundiaquara ⁽²⁾	Tagaçaaba ⁽²⁾	Guaraqueçaba ⁽³⁾	Sagrado ⁽³⁾	Nunes ⁽⁴⁾
Janeiro	16,90	11,43	26,45	6,84	5,01	4,21
Fevereiro	15,34	16,16	31,05	11,43	5,97	4,02
Março	17,68	18,02	44,74	13,17	3,62	3,78
Abril	18,72	10,40	21,49	6,84	2,79	3,64
Maió	12,72	22,02	37,11	11,14	4,70	1,91
Junho	8,71	14,02	23,09	6,99	3,95	1,54
Julho	5,95	5,52	9,72	3,25	1,63	2,46
Agosto	7,74	5,40	7,66	2,36	1,42	1,54
Setembro	5,43	13,59	11,65	3,30	3,56	1,28
Outubro	10,97	10,45	10,05	4,49	2,04	1,68
Novembro	9,37	23,07	17,92	5,63	3,68	1,77
Dezembro	9,73	10,02	12,00	4,42	3,33	-

(1) Dados de 2017 (Janeiro até Maio) e 2016 (abril até dezembro); (2) Dados de 2019; (3) Dados de 2019 (janeiro até Novembro e dados de 2018 (Dezembro)); (4) Dados de 2015 (Janeiro até abril) e 2010 (maio até dezembro).

Fonte: Hidroweb (ANA, 2021)

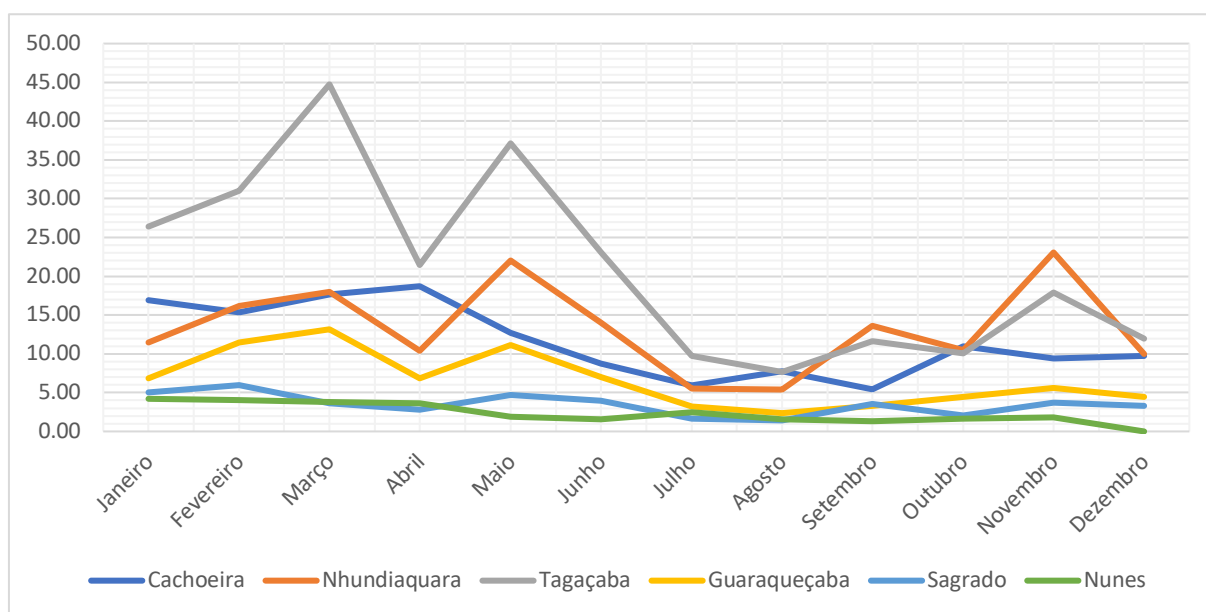


Figura 28. Vazão média mensais dos rios que deságuam no CEP.

Fonte: Hidroweb (ANA, 2021)

Considerando o período do verão, é possível verificar que as vazões médias obtidas foram: 16,90 m³/s para o rio Cachoeira, 16,16 m³/s para o rio Nhundiaquara, 31,05 m³/s para o rio Tagaçaaba, 11,43 m³/s para o rio Guaraqueçaba, 5,97 m³/s para o rio Sagrado; e 4,21 m³/s para o rio Nunes.

Já no período do inverno as vazões médias máxima tiveram valores menos quando comparadas ao verão: 8,71 m³/s para o rio Cachoeira, 14,02 m³/s para o rio

Nhundiaquara, 23,09 m³/s para o rio Tagaçaba, 6,99 m³/s para o rio Guaraqueçaba, 3,95 m³/s para o rio Sagrado; e 2,46 m³/s para o rio Nunes.

Para o rio Faisqueira, os valores de vazão adotados foram obtidos por Mantovanelli (1999) através de medições feitas no inverno de 1997 e no verão de 1998. Com isso, para o período de verão a vazão medida foi de 5,82 m³/s e para o inverno de 0,50 m³/s.

4.6 DADOS DE MARÉ.

A curva de maré astronômica no CEP, usada neste trabalho, foi determinada a partir de constantes harmônicas definidas por Marone e Jamiyanna (1997). As constantes harmônicas utilizadas neste estudo podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5. Constantes harmônicas, período, amplitude e fase, usadas no modelo hidrodinâmico.

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
Q1	96726,08	0,03	0,99
MO3	30190,69	0,11	1,06
O1	92949,63	0,11	1,40
M2	44714,16	0,49	1,68
S2	43200,00	0,33	1,76
L2	43889,83	0,03	1,83
K1	86164,09	0,08	2,41
mu2	46338,33	0,04	2,51
MK3	29437,70	0,06	2,64
N2	45570,05	0,07	2,91
MN4	22569,03	0,07	3,86
M3	29809,44	0,16	4,57
M4	22357,08	0,16	4,75
M1	89399,69	0,02	4,76
MS4	21972,02	0,07	6,21

Na Figura 29 é possível verificar a curva de maré, gerada para o período de modelagem de 01/01/2019 até 31/12/2019. Nela é possível verificar que os ciclos de sizígia e quadratura possuem comportamentos semelhante ao longo do ano, e possuem amplitudes máximas 1,20 m, aproximadamente.

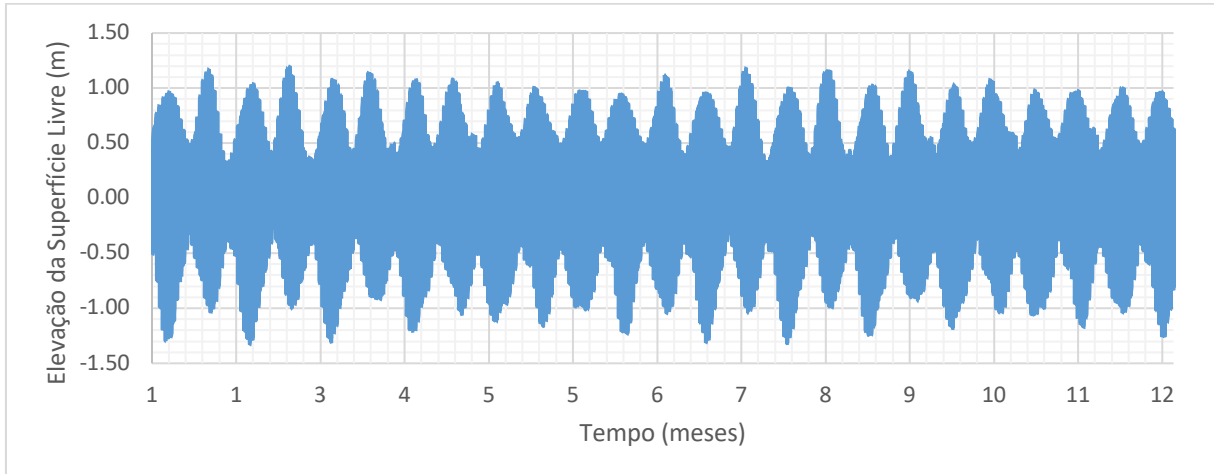


Figura 29. Curvas de maré.

4.7 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

De modo a analisar a influência das ondas sobre a circulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá, são propostos 8 cenários de simulação. As diferenças entre os cenários estão relacionadas com as características das ondas: altura, período e variação temporal e a sazonalidade dos dados de vento e aporte fluvial. Os cenários propostos são:

- **Cenário 1:** Este cenário corresponde a análise da circulação hidrodinâmica do CEP, sem a influência das ondas. Serão utilizados dados de vazões médias, vento e maré. O período de simulação é de 2 meses de forma a abranger períodos de maré de sizígia e quadratura, para Janeiro e Fevereiro de 2019.
- **Cenário 2:** Este cenário corresponde a análise da circulação hidrodinâmica do CEP, sem a influência das ondas. Serão utilizados dados de vazões médias, vento e maré. O período de simulação é de 2 meses de forma a abranger períodos maré de sizígia e quadratura, para Julho e Agosto de 2019.
- **Cenário 3:** Este cenário corresponde ao cenário 1, com a inclusão do clima de ondas médio obtido pelo SMC-Brasil (H_s).
- **Cenário 4:** Este cenário corresponde ao cenário 1, com a inclusão do clima de ondas para evento extremo (H_{12}) obtido pelo SMC-Brasil.

- **Cenário 5:** Este cenário corresponde ao cenário 1, com a inclusão do clima de ondas variável obtido pela reanálise do ERA-Interim para o período.
- **Cenário 6:** Este cenário corresponde ao cenário 2, com a inclusão do clima de ondas médio obtido pelo SMC-Brasil (H_s).
- **Cenário 7:** Este cenário corresponde ao cenário 2, com a inclusão do clima de ondas para evento extremo (H_{12}) obtido pelo SMC-Brasil.
- **Cenário 8:** Este cenário corresponde ao cenário 2, com a inclusão do clima de ondas variável obtido pela reanálise do ERA-Interim para o período.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados para todos os cenários, obtidos com as simulações do modelo hidrodinâmico e de propagação de onda do SisBaHiA®. Primeiramente é feita uma análise qualitativa dos resultados da circulação hidrodinâmica para o cenário 1, a fim de verificar o desempenho do modelo em simular a circulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá. Em seguida são mostrados os resultados obtidos para todos os cenários, onde são analisados os valores das componentes das velocidades e das tensões no fundo para cada uma das estações definidas. A Figura 30 mostra a localização das 9 estações (Mar Aberto; Canal da Galheta (Limoeiro); Canal da Galheta (Pontal do Poço); Canal da Galheta; Baía de Paranaguá 1; Baía de Paranaguá 2; Baía de Antonina; Baía de Laranjeiras; e Canal da Cotinga) que foram definidas no SisBaHiA® para apresentar os resultados obtidos. A posição de cada estação foi definida de forma a abranger todo as regiões do CEP: a estação Mar Aberto está localizada na região costeira adjacente e as estações Baía de Antonina e Baía de Laranjeiras, nas regiões mais internas do Complexo Estuarino de Paranaguá. As demais, na região da baía de Paranaguá, no canal da Coatinga e no canal da Galheta.

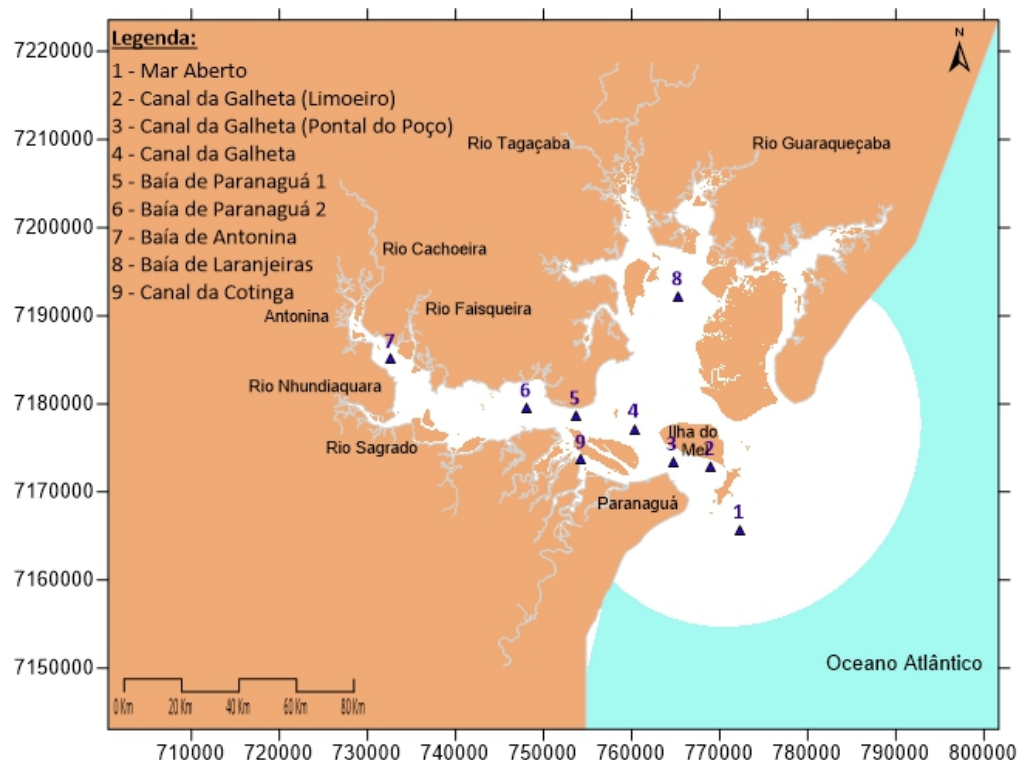


Figura 30. Localização das estações usadas para apresentar os resultados.

Fonte: Cunha *et al.* (2015)

5.1 VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

De forma a verificar se o modelo está propagando a onda de maré corretamente para dentro do CEP, foram selecionadas 5 estações, mostradas na Figura 30, para observar os resultados: Canal da Gualheta (Limoeiro); Canal da Gualheta (Pontal do Poço); Baía de Paranaguá 1; Baía de Antonina e Baía de Laranjeiras.

A onda de maré sofre amplificação e atraso à medida que entra no interior do CEP. Esta análise tem como objetivo verificar se o modelo está propagando a onda corretamente, em relação ao atraso e à amplificação. Este atraso corresponde ao tempo que a onda leva desde sua entrada até atingir o final do Complexo Estuarino de Paranaguá. Como pode-se observar na Figura 31, a estação mais próxima da entrada do canal (Estação Canal da Galheta (Limoeiro)), no dia 20/01/2019 o instante preamar ocorreu às 2h45min, a estação Canal da Galheta (Pontal do Poço) teve seu pico cerca de 15 minutos depois, às 3h. As estações Baía de Paranaguá 1 e Baía de Laranjeiras apresentaram instantes preamares no mesmo horário, às 3h30min. Já estação localizada na Baía de Antonina apresentou a sua preamar às 4h, com um o atraso de 1h15min em relação a Estação Canal da Galheta. Os resultados estão em concordância com os observados por Tamura & Cunha (2016), que encontraram um intervalo de aproximadamente 1h30min no CEP em simulações semelhantes.

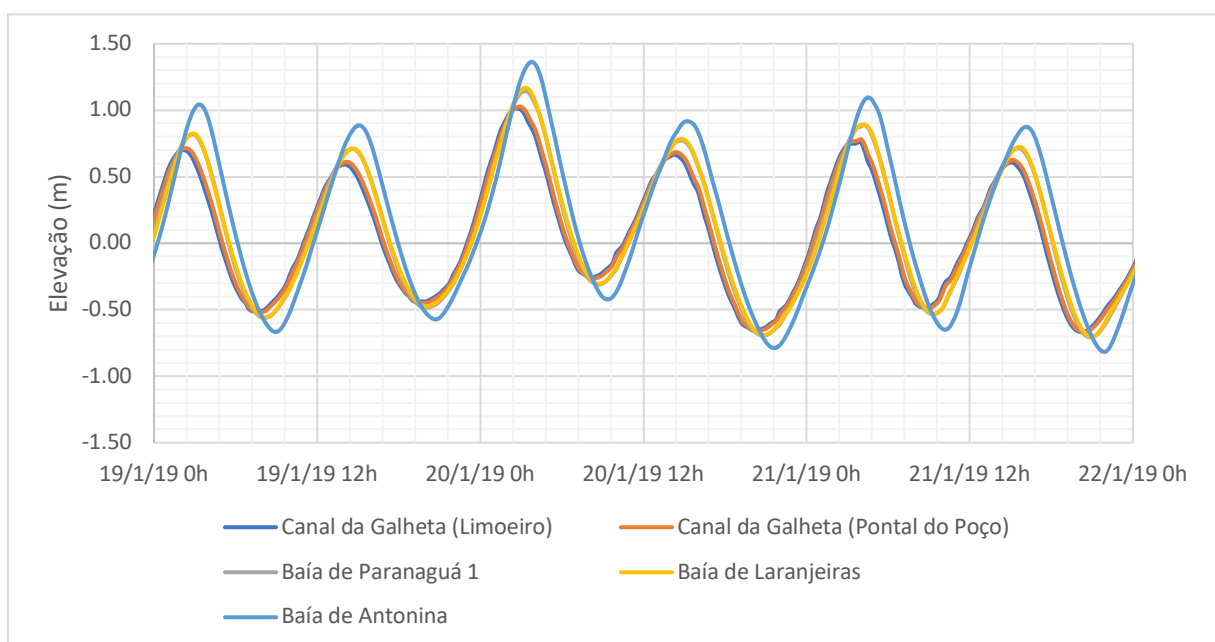


Figura 31. Elevação obtida pelo SisBaHia nas estações do CEP entre 19/01/2019 e 22/01/2019.

Fonte: A autora (2021)

Ainda considerando o cenário 1, foi feita uma análise das componentes das velocidades (Norte-Sul e Leste-Oeste) em todas as estações mostradas na Figura 30. Os resultados das estações Canal da Gualheta (Limoeiro) e Baía de Antonina podem ser observados nas Figura 32 e Figura 33; já os resultados de todas as estações podem ser observados no ANEXO 3 (Figura F à Figura N).

Com relação as componentes, entende-se que com relação as velocidades Nortes-Sul, os valores positivos representam a componente Norte e os valores negativos a componente Sul. Para as componentes Leste-Oeste, os valores positivos representam o Leste e os negativos o Oeste.

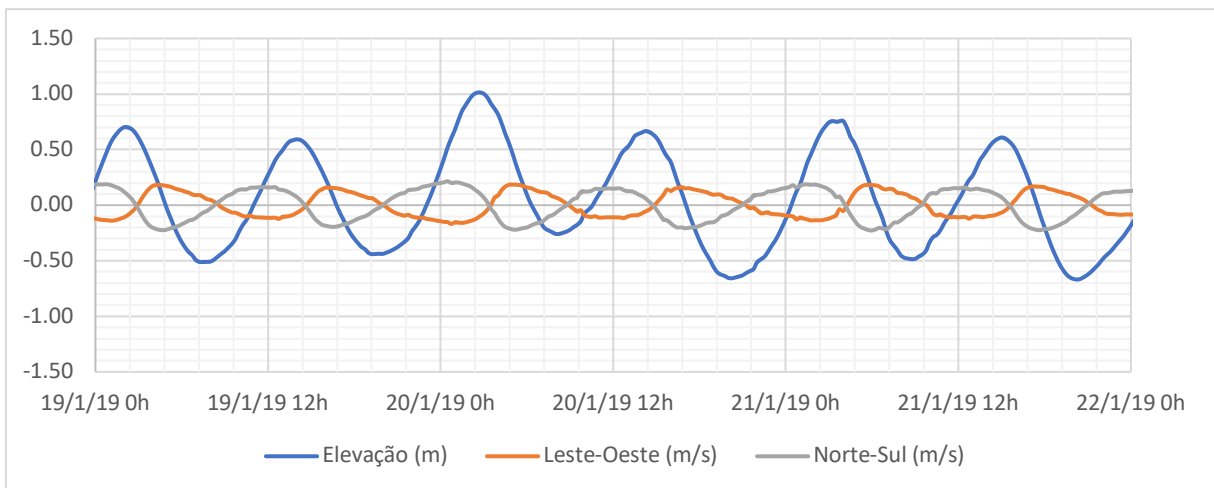


Figura 32. Elevações e componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da Velocidade para o Cenário 1 na Estação Canal da Gualheta (Limoeiro)
Fonte: A autora (2021)

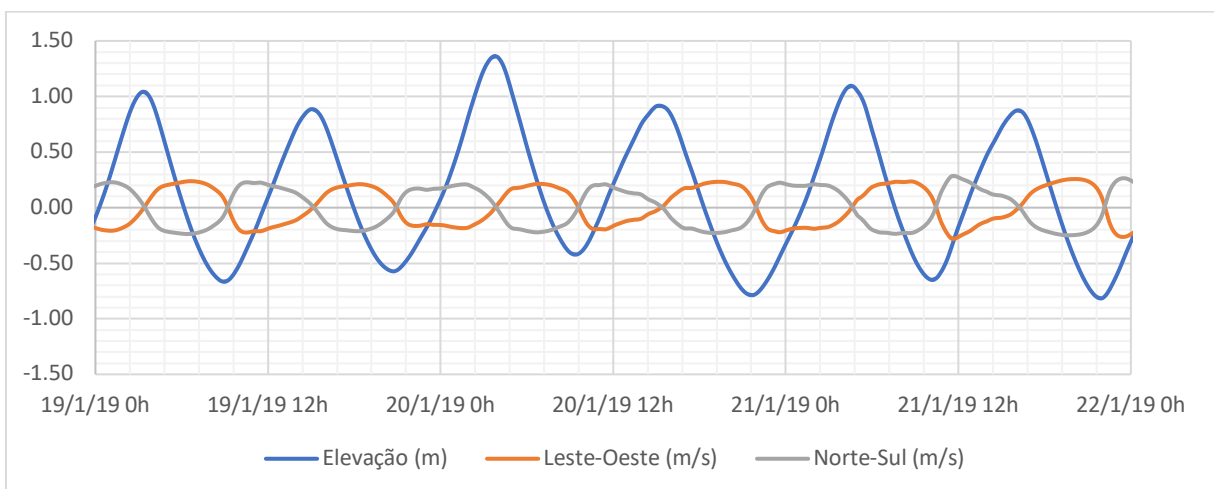


Figura 33. Elevações e componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da Velocidade para o Cenário 1 na Estação Baía de Antonina
Fonte: A autora (2021)

Analisando os gráficos é possível verificar que as estações localizadas no interior do CEP, próximas e na baía de Paranaguá (Estações Canal da Galheta, Baía de Paranaguá 1 e Baía de Paranaguá 2) apresentam a componente Leste-Oeste mais expressiva, devido ao alinhamento da baía. Já a estação Laranjeiras, devido à sua localização, é a única estação onde a componente Norte-Sul é maior, também condizente com o alinhamento desta baía. Nas demais estações, as componentes Norte-Sul e Leste-Oeste são equivalentes. Observa-se ainda que a elevação da superfície livre e a componente da velocidade mais expressiva, para cada estação, não estão em fase, característica típica de ondas estacionárias. (LANA *et al.*, 2001).

5.2 RESULTADOS DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA (MPO)

Simulando apenas o modelo de propagação de onda do SisBahHia para uma onda monocromática, é possível verificar como ocorre a sua intrusão dentro do CEP. Foram simuladas duas ondas: com a altura significativa definida como o valor médio do terço das maiores ondas de um estado de mar, $H_{s50\%}$ (Figura 34), ou seja, o estado de mar médio, e o regime extremo, H_{12} , altura de onda significativa superada em 12 horas ao ano, ou seja, associada a tempestades anual média (Figura 36). É possível ainda calcular as correntes próximas ao fundo para as duas condições de estado de mar: médio (Figura 35) e extremo (Figura 37).

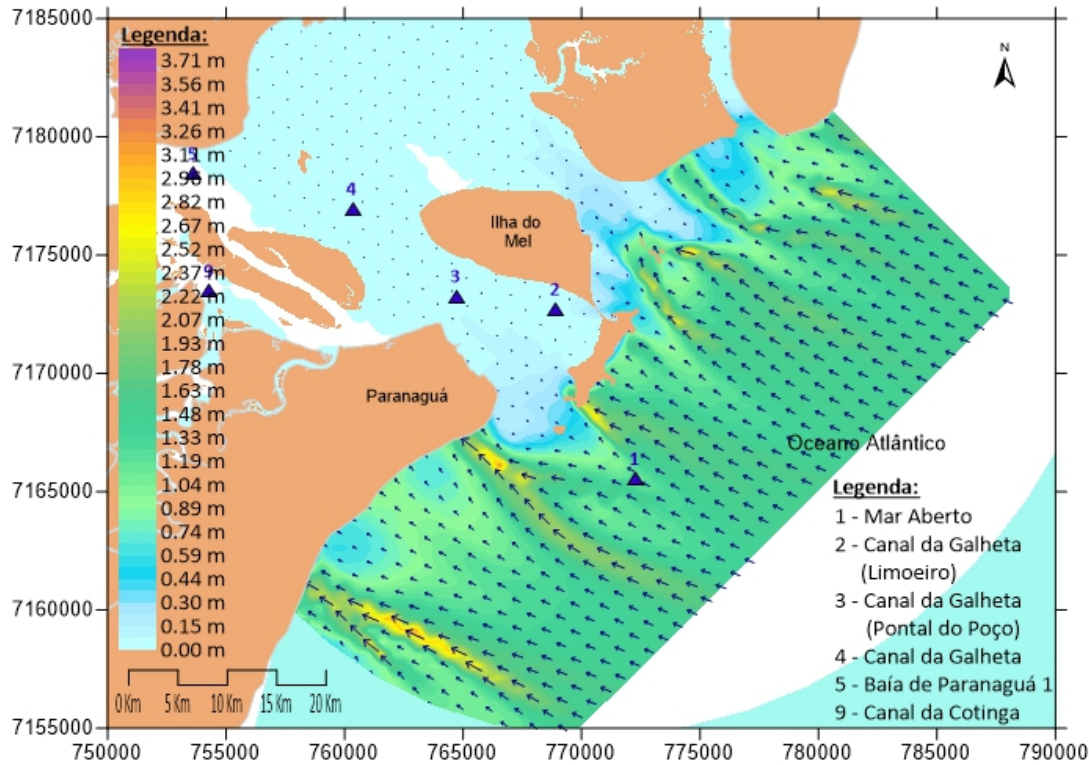


Figura 34. Altura e direção da onda obtidos pelo modelo de propagação da onda monocromática do SisBaHia para o estado de mar médio.

Fonte: A autora (2021)

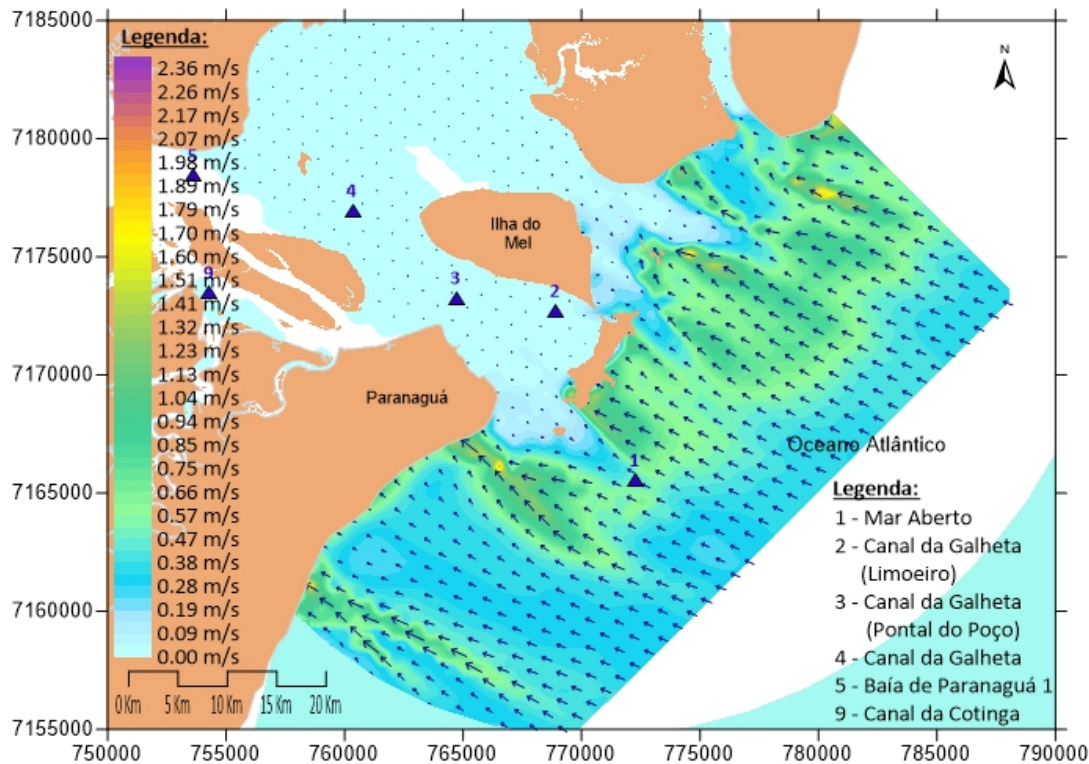


Figura 35. Correntes no fundo obtidos pelo modelo de propagação da onda monocromática do SisBaHia para o estado de mar médio.

Fonte: A autora (2021)

Como observado por Souza (2015) e Lana et al. (2001), mesmo durante o regime extremo, a intrusão das ondas é limitada ao setor externo do CEP. Os bancos de areia tendem a dissipar a maior parte da energia das ondas, agindo como quebra-mares submersos. Apenas alturas de onda abaixo de 0,3 m, para estado de mar médio (Figura 34), e 0,5 m, para eventos extremos (Figura 36), podem ser encontradas dentro do CEP. Observa-se ainda uma amplificação da altura de onda na região dos bancos de areia localizados na entrada do CEP, indicando uma forte relação com a batimetria da região, já que a onda tende a sofrer empinamento em regiões mais rasas.

Como consequência, as correntes no fundo seguem a mesma distribuição das alturas de ondas, sendo mais intensas na região externa do CEP e menos intensa nas regiões internas.

Como pode ser observado na Figura 36 e Figura 37, as ondas de tempestade (H_{12}), assim como as ondas médias, também são maiores na região costeira adjacente, quando comprado com o interior do CEP.

Além disso, na Figura 36 é possível observar que as alturas das ondas de tempestades na região costeira adjacente, são relativamente maiores e acabam sofrendo menores desvios na direção quando comparadas com H_s .

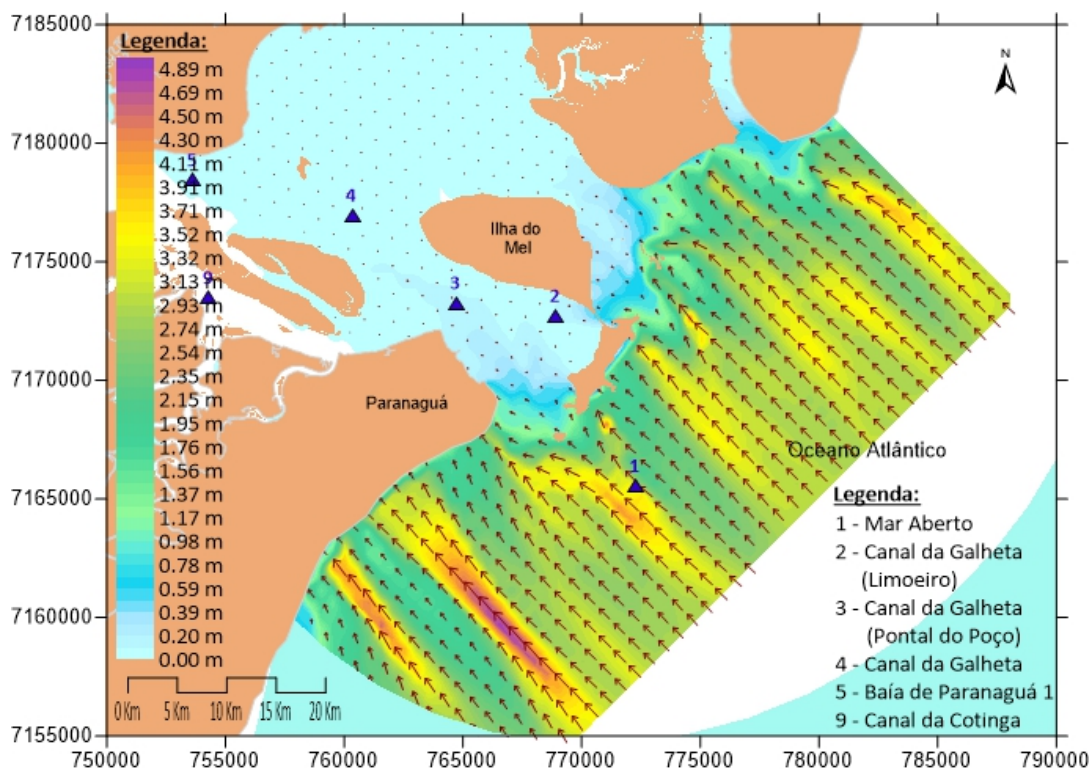


Figura 36. Altura e direção da onda obtidos pelo modelo de propagação da onda monocromática do SisBaHia para o regime extremo.

Fonte: A autora (2021)

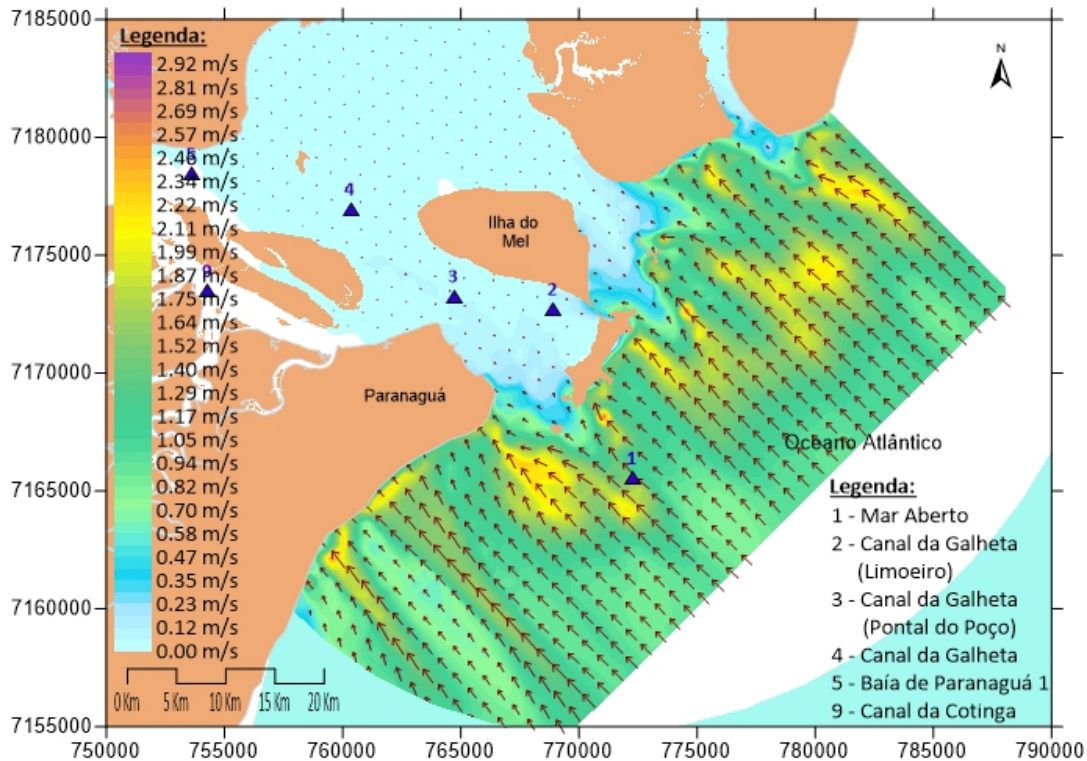


Figura 37. Correntes no fundo obtidas pelo modelo de propagação da onda monocromática do SisBaHia para o regime extremo.

Fonte: A autora (2021)

5.3 COMPARAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DO CEP PARA DIFERENTES CENÁRIOS PARA O PERÍODO DE VERÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo o modelo hidrodinâmico acoplado com o modelo de propagação de onda do SisBaHia®, e comparado os diferentes cenários para o período do verão.

5.3.1 RELAÇÃO DAS VELOCIDADES DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 1, 3, 4 E 5.

Analisando os resultados obtidos para as 9 estações, é possível observar que não houve diferenças significativas nos valores das componentes das velocidades entre os cenários com e sem ondas. Ou seja, os valores das componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da velocidade com ou sem o efeito da onda foram praticamente iguais.

A única exceção ocorreu na estação do Canal da Galheta (Limoeiro), cuja os resultados podem ser vistos nas Figura 38 e Figura 39 (ou na Figura P do ANEXO 4).

Neste caso, as velocidades obtidas pelo modelo hidrodinâmico sem a influência das ondas, se mostraram ligeiramente superiores quando comparada com a circulação do CEP considerando as ondas como forçantes acoplada à circulação.

Uma vez que a estação está localizada na entrada do CEP, é possível verificar que, segundo a análise das velocidades, está é a única região em que é possível observar alguma influência das ondas sobre a circulação. Ou seja, as ondas médias, variáveis e de tempestades, não atingem região mais interna do CEP e, portanto, não modificam a circulação.

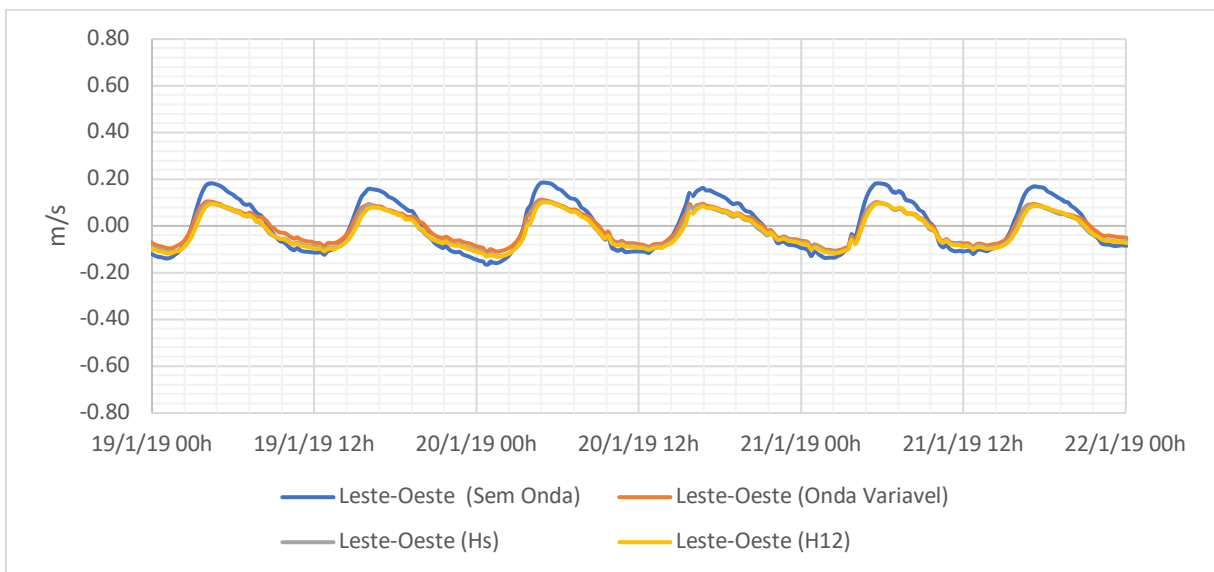


Figura 38. Componente Leste-Oeste da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).
Fonte: A autora (2021)

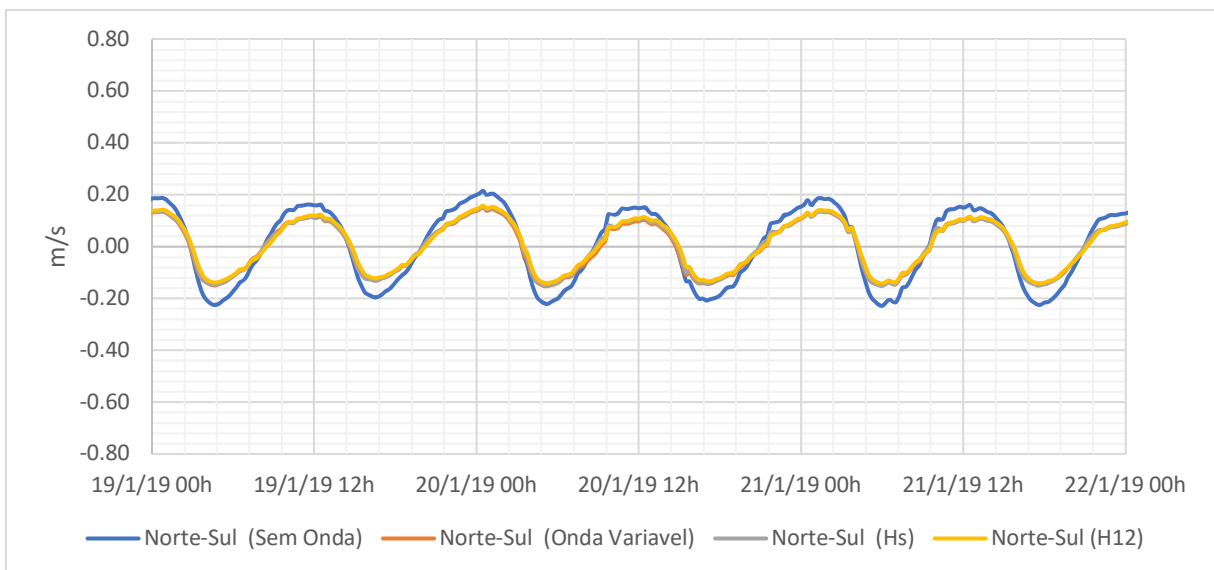


Figura 39. Componente Norte-Sul da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).
Fonte: A autora (2021)

Na região costeira adjacente, onde a estação mar aberto está localizada, cuja os resultados são mostrados nas Figura 40 e Figura 41 embora se esperasse uma influência das ondas nos valores das velocidades, as variações não foram observadas de forma significativas. É possível que o fato desta região ser mais profunda que a região interna do CEP possa explicar este resultado.

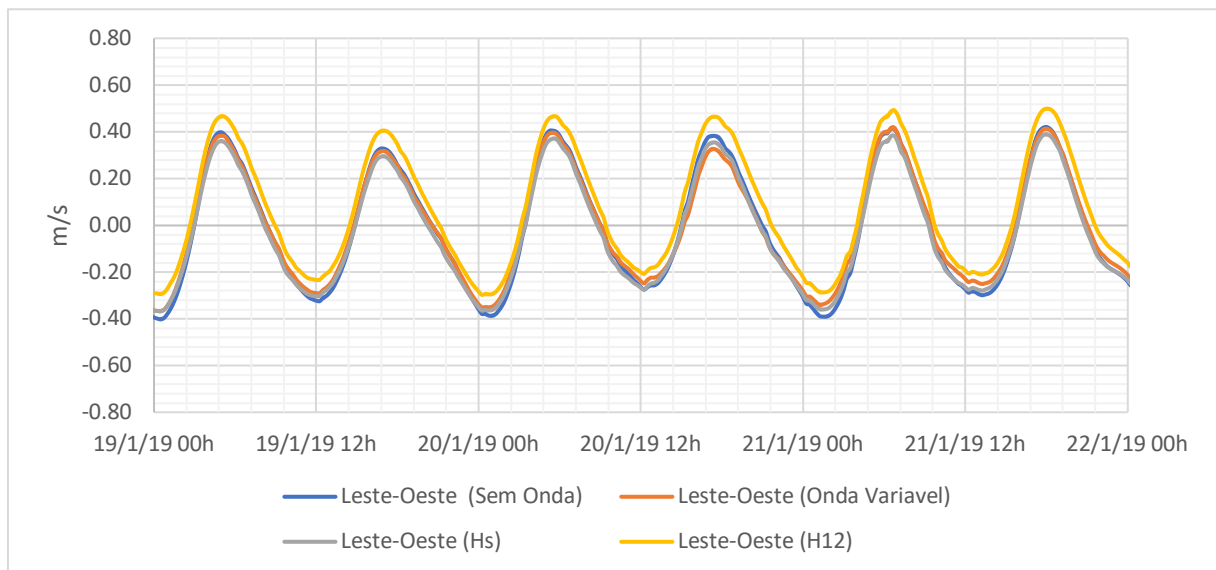


Figura 40. Componente Leste-Oeste da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5. na Mar Aberto
Fonte: A autora (2021)

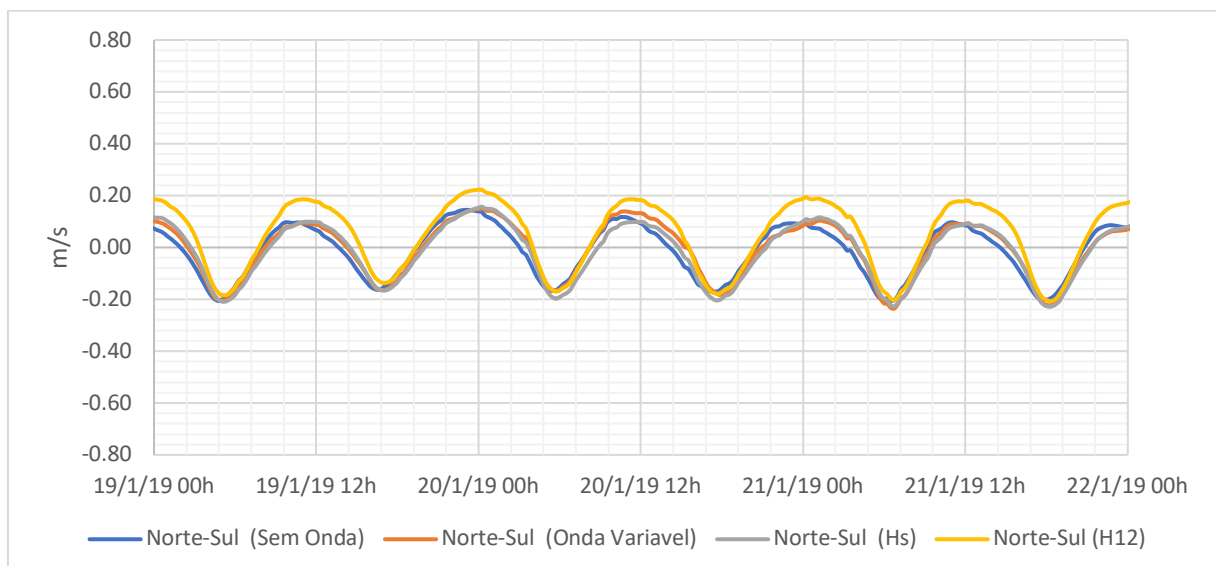


Figura 41. Componente Norte-Sul da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5. na Estação Mar Aberto
Fonte: A autora (2021)

As Figura O à Figura W, no ANEXO 4, apresentam os resultados, para os cenários 1, 3, 4 e 5, para as componentes das velocidades nas estações mostradas na Figura 30.

5.3.2 RELAÇÃO DOS MÓDULOS DE TENSÃO NO FUNDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 1, 3, 4 E 5.

Uma vez que as ondas estão fortemente relacionadas aos transportes de sedimentos no fundo, uma segunda análise que pode ser feita para verificar a influência das ondas na circulação hidrodinâmica do CEP, através da comparação dos valores de tensão do fundo. As Figura 42 até Figura 50 apresentam os resultados da tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5, para todas as estações mostradas na Figura 30.

Na análise dos resultados da estação denominada Mar Aberto (Figura 42), é possível verificar valores distintos de tensão no fundo para os diferentes tipos de onda. Além disso, considerando que quanto maior a tensão no fundo maior a propensão a transportes de sedimentos, é possível observar que, neste caso, as ondas de tempestades são mais significativas do que as ondas variáveis e médias. Esse era o resultado esperado, considerando que esta estação está localizada na região adjacente costeira do CEP e, portanto, a onda não sofre nenhum amortecimento.

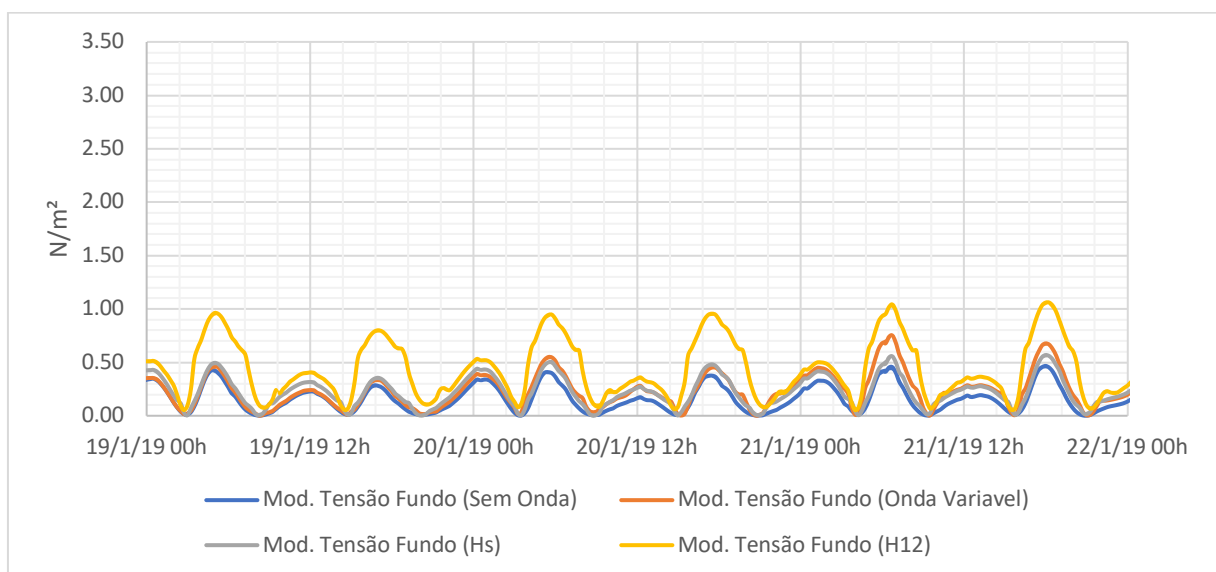


Figura 42. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Mar Aberto
Fonte: A autora (2021)

A Figura 43 que mostra os resultados obtidos na entrada do CEP (Estação Canal da Galheta (Limoeiro)). Como esperado, apresenta uma grande diferença nos valores de tensão no fundo para as diferentes simulações, que consideram ou não as ondas nesta região. Entretanto, os valores de tensão no fundo para os três tipos de climas de ondas são semelhantes. Desta forma, por mais que existam diferentes climas de ondas na região, o tipo da onda não é relevante na região interna do CEP.

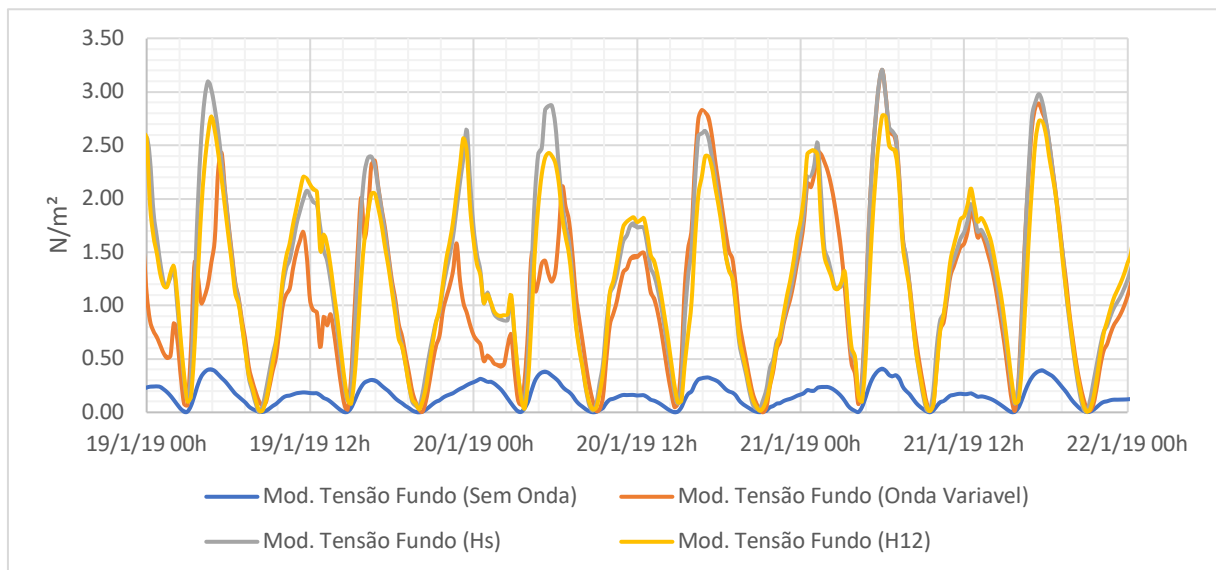


Figura 43. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta (Limoeiro)

Fonte: A autora (2021)

Analisando o interior do CEP através das estações Canal da Galheta (Pontal do Poço), Canal da Galheta, Baía de Paranaguá 1 e Baía de Antonina, demonstradas nas Figura 44 até Figura 47, é possível verificar certa similaridade no comportamento da tensão do fundo. Nestas estações, os resultados das simulações com e sem o efeito das ondas não modificaram os valores de tensão no fundo.

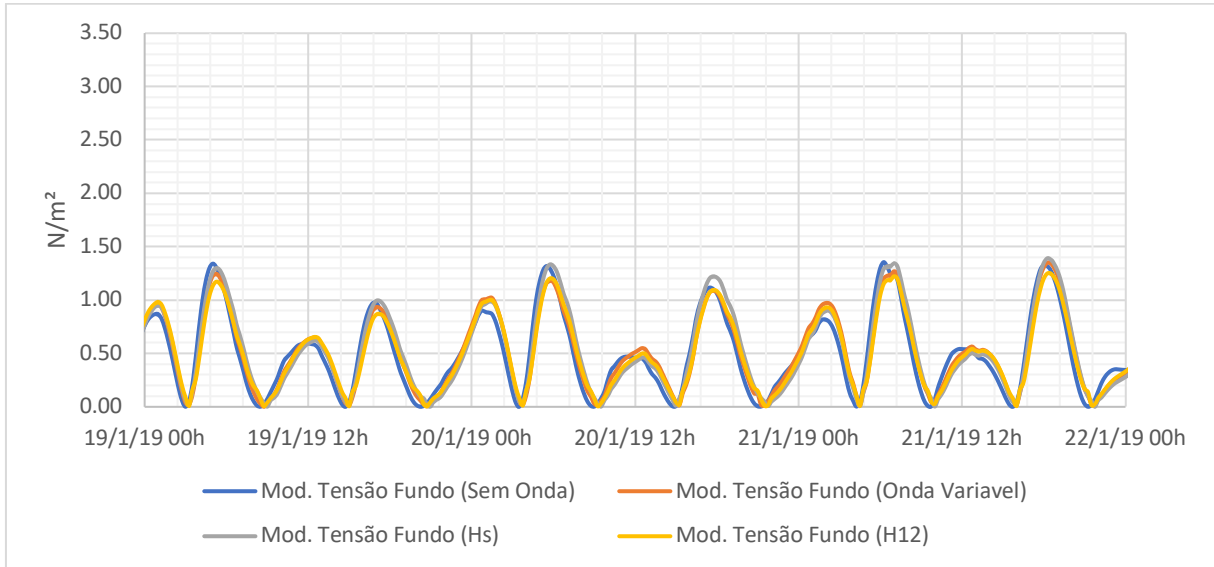


Figura 44. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta (Pontal do Poço)

Fonte: A autora (2021)

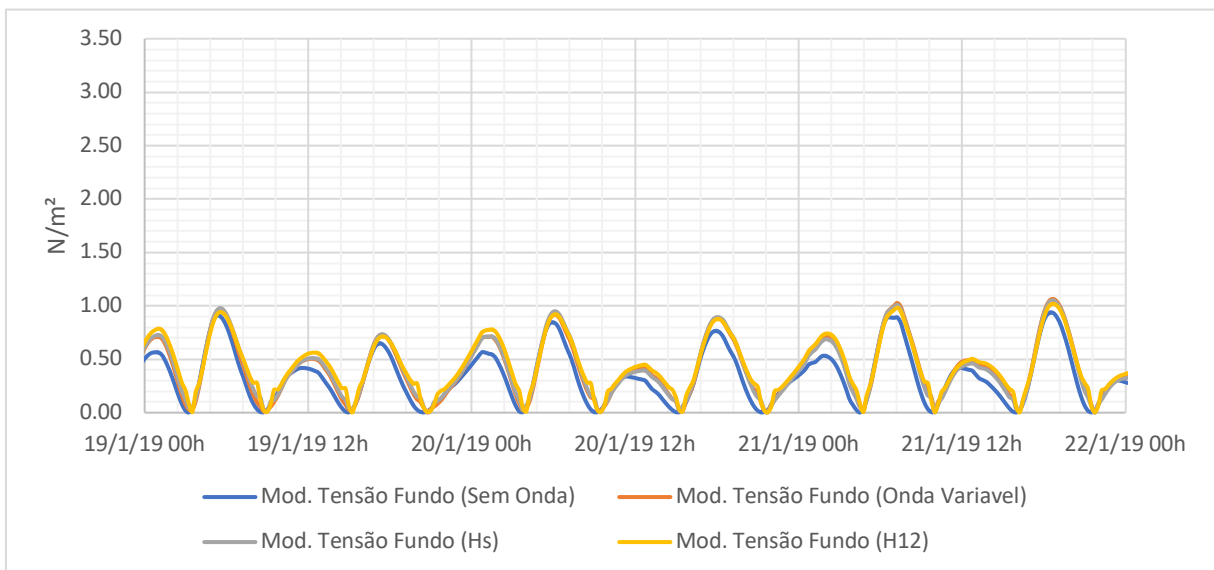


Figura 45. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta.

Fonte: A autora (2021)

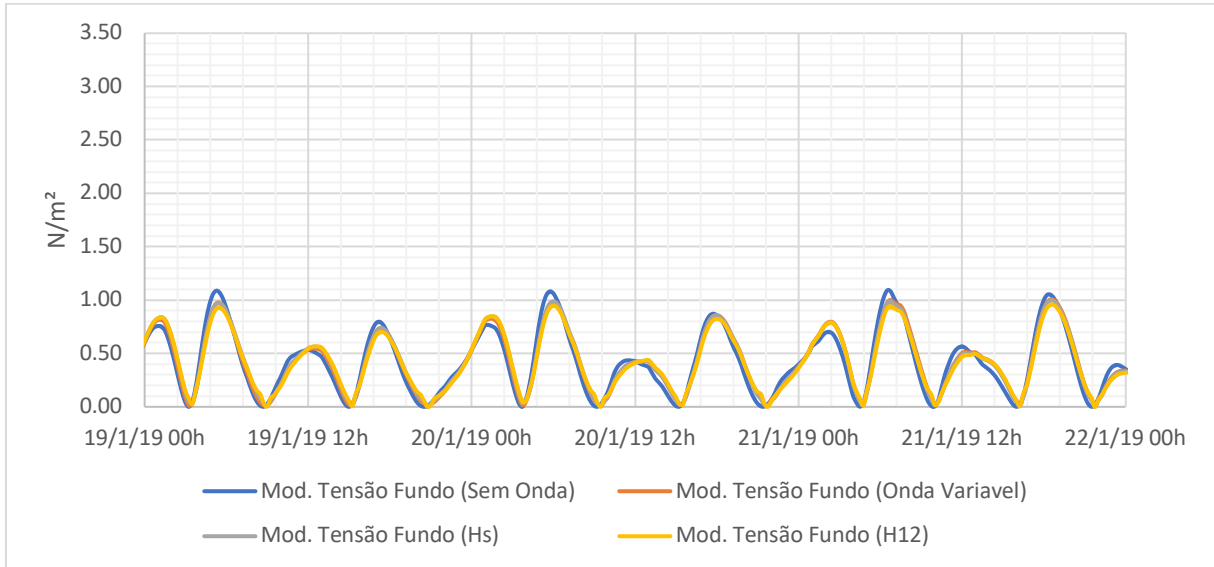


Figura 46. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Paranaguá 1.
Fonte: A autora (2021)

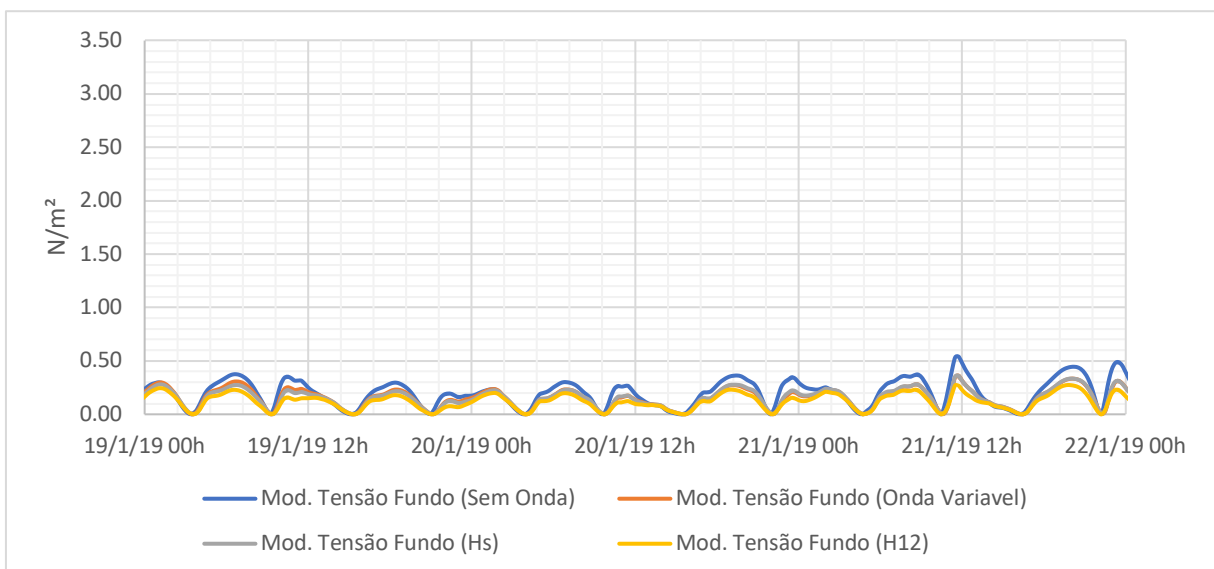


Figura 47. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Antonina.
Fonte: A autora (2021)

Contudo, na estação Canal da Cotonga (Figura 48), é possível perceber uma diferença significativa nos valores de tensão do fundo com relação as simulações dos diferentes climas de ondas. Isso mostra que por mais que as ondas não “entrem” no canal da Galheta, o acoplamento ente os dois modelos modificaram de forma importante os valores de tensão no fundo nesta região. Esta variação pode estar diretamente ligada a batimetria local, uma vez que no Canal da Cotonga, a profundidade é menor que a no canal da Galheta. Comportamento semelhante pode ser observado na a estação Baía de Paranaguá 2, também com profundidade reduzida (Figura 49).

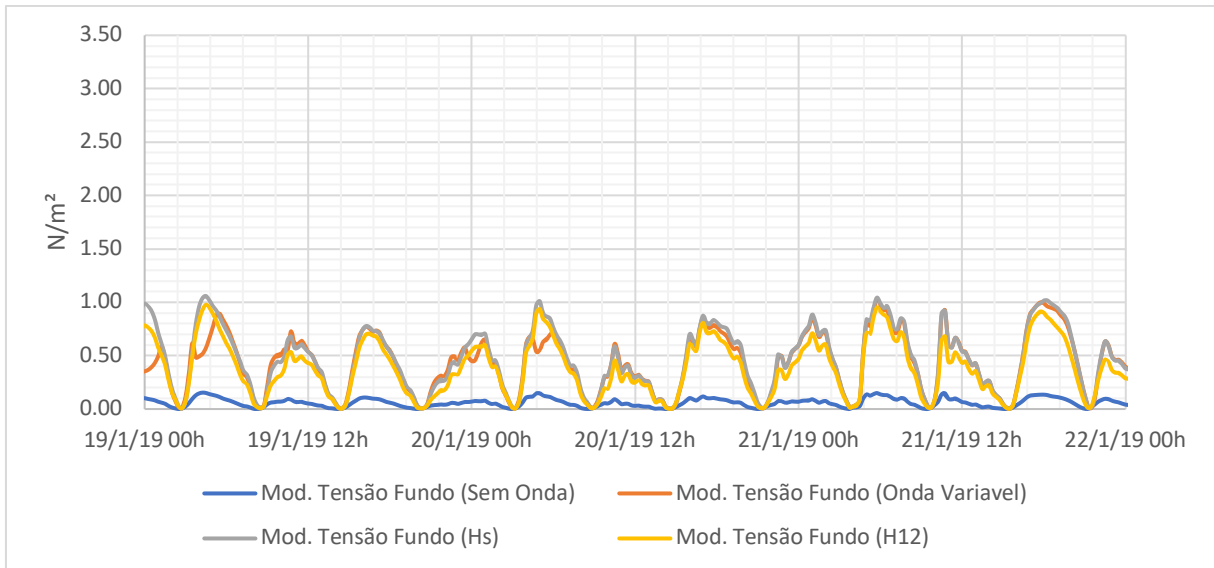


Figura 48. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Cotonga
Fonte: A autora (2021)

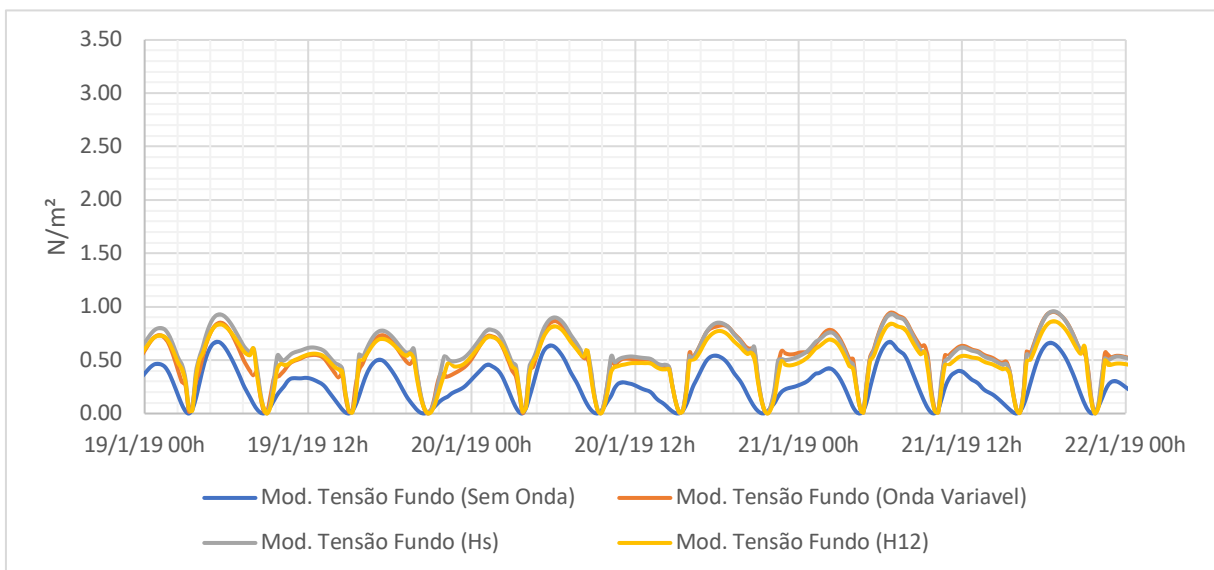


Figura 49. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Paranaguá 2.
Fonte: A autora (2021)

Por fim, pode-se observar nos resultados na estação Baía de Laranjeiras (Figura 50) que, da mesma forma que os casos anteriores, mostra que a variação dos valores de tensão do fundo é relevante apenas para as simulações sem e com influência das ondas e, ou seja, o tipo da onda não influencia nos resultados.

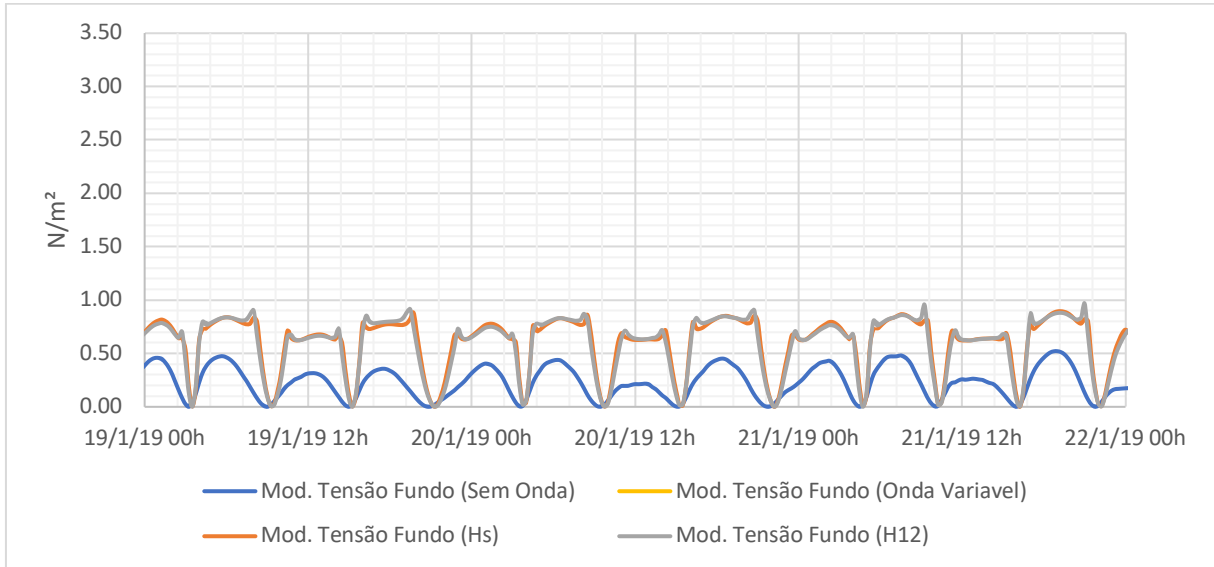


Figura 50. Módulos de tensão do fundo para os cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Laranjeiras.
Fonte: A autora (2021)

5.3.3 AVALIAÇÃO DO AMORTECIMENTO DA ONDA

Uma forma de ver o amortecimento da onda definida ao largo, na região do CEP, é através da comparação das alturas significativas do clima de ondas variável obtidos pela reanálise do ERA-Interim.

Na Figura 51 é possível verificar, através dos valores das alturas médias das ondas (H_s), que as ondas sofrem um grande amortecimento ao entrar no CEP. Comparando as alturas obtidas nas as estações Canal da Galheta (Limoeiro) e Canal da Galheta (Pontal do Poço), localizadas na entrada do CEP, e a estação Mar aberto, na região adjacente costeira, é possível observar as alturas de ondas são cerca de 8 vezes menores na estação Canal da Galheta (Limoeiro) e 16 vezes menores no Canal da Galheta (Pontal do Poço), quando comparadas com os valores da estação Mar aberto.

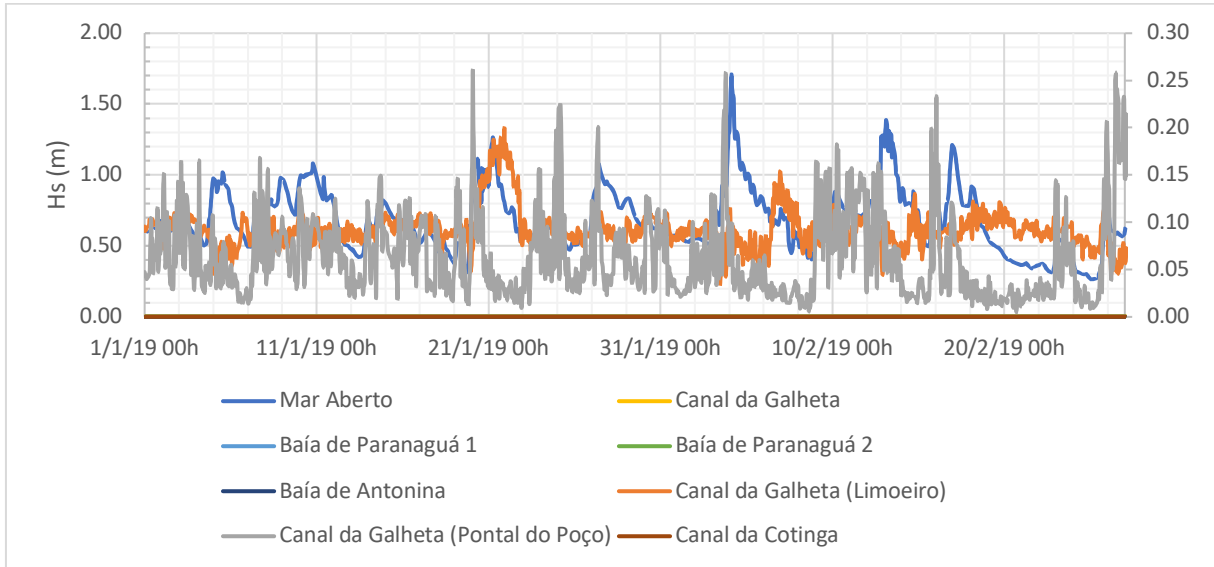


Figura 51. Altura média da onda variável para o cenário 5. Estação Mar Aberto usa o eixo principal e as demais estações, o eixo secundário.

Fonte: A autora (2021)

5.4 COMPARAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DO CEP PARA DIFERENTES CENÁRIOS PARA O PERÍODO DE INVERNO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo o modelo hidrodinâmico acoplado com o modelo de propagação de onda do SisBaHiA®, através de simulação realizadas para todos os cenários do período do inverno, cenários 2, 6, 7 e 8.

5.4.1 RELAÇÃO DAS VELOCIDADES DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 2, 6, 7 E 8.

Da mesma forma que já foi observado no período do verão, no período de inverno não houve diferenças significativas das componentes das velocidades entre os cenários com e sem ondas, na maioria das estações. Ou seja, como explicado anteriormente, as componentes Norte-Sul e Leste-Oeste sem o forçante onda foram praticamente iguais comparada com os valores que consideram a onda como uma forçante.

Da mesma forma que o cenário de verão, uma das exceções ocorreu na estação do Canal da Galheta (Limoeiro), que pode ser vista na Figura 52 e Figura 53 (ou na Figura Y do ANEXO 5). As velocidades obtidas no modelo hidrodinâmico sem

a influência das ondas se mostraram ligeiramente superiores quando comparada com os valores que considerando as ondas como forçantes acoplada na circulação hidrodinâmica.

Já contrariando o que ocorreu no período do verão, a outra exceção ocorreu na região costeira adjacente, onde a estação mar aberto está localizada, demonstrada pelas Figura 54 e Figura 55 (ou na Figura X do ANEXO 5). Nesta análise é possível verificar, de forma sutil, valores distintos das componentes de velocidade para os diferentes tipos de onda. Incluindo maiores valores para as ondas de tempestades quando comparadas velocidades das ondas variáveis e médias.

Uma vez que estas estações estão localizadas na região adjacente costeira e na entrada do CEP, é possível verificar que, estas são as únicas estações em que é possível observar a uma influência das ondas na circulação. Ou seja, como no período do verão, as ondas médias, variáveis e de tempestade não atingem a região mais interna do CEP.

As Figura X até a Figura FF, que podem ser vistas no ANEXO 5, apresentam os resultados das componentes das velocidades nos cenários 2, 6, 7 e 8, para todas as estações mostradas na Figura 30.

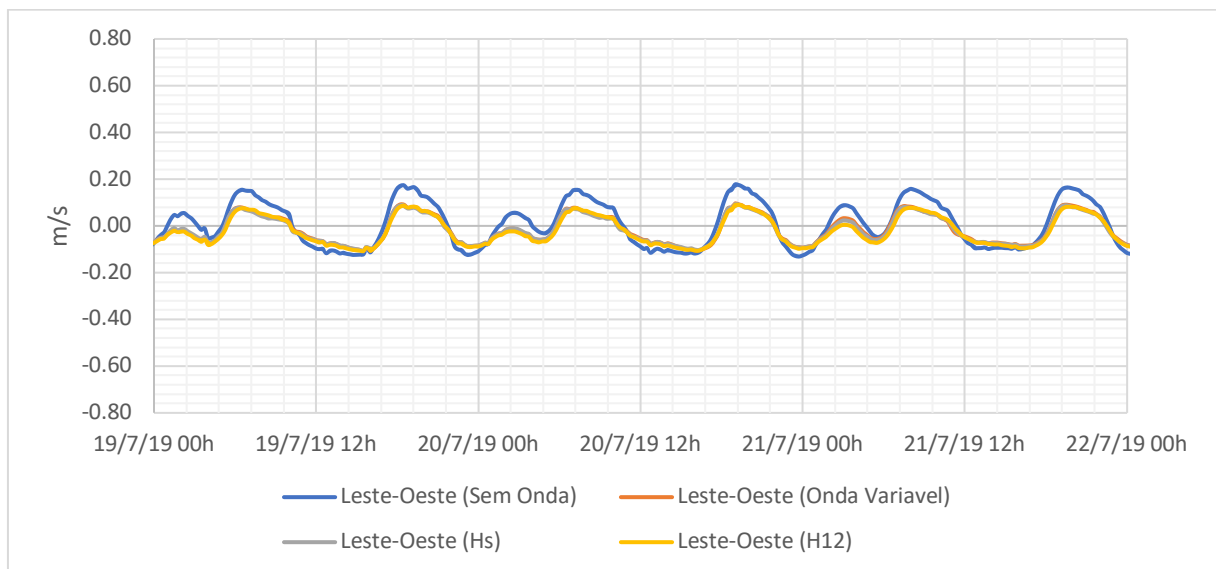


Figura 52. Componente Leste-Oeste da velocidade para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).

Fonte: A autora (2021)

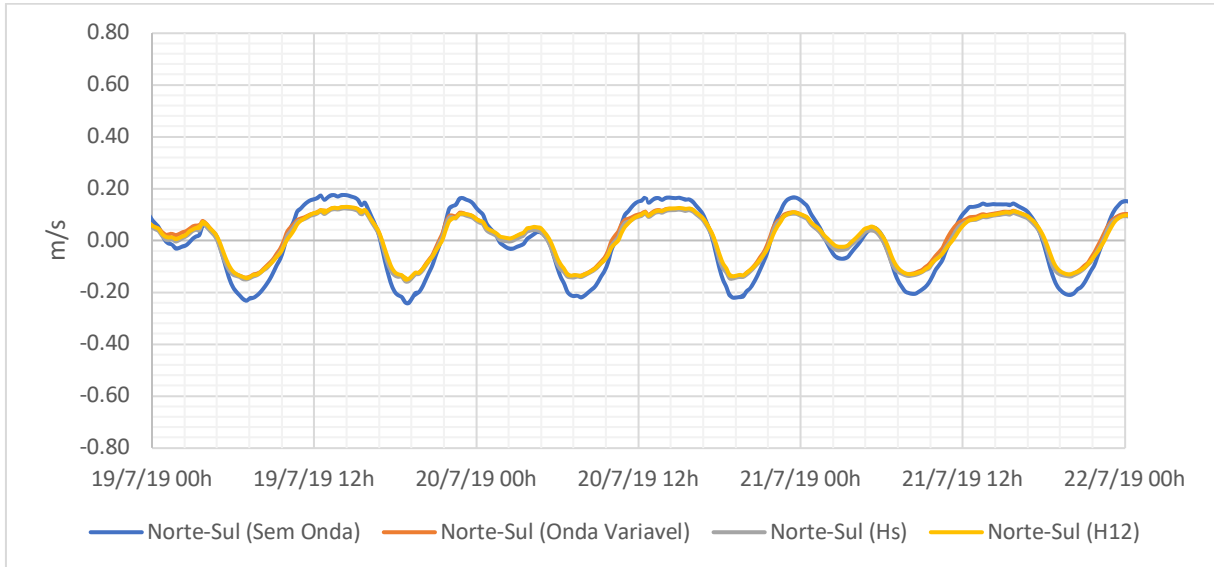


Figura 53. Componente Norte-Sul da velocidade para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na Estação Canal da Galheta (Limoeiro).

Fonte: A autora (2021)

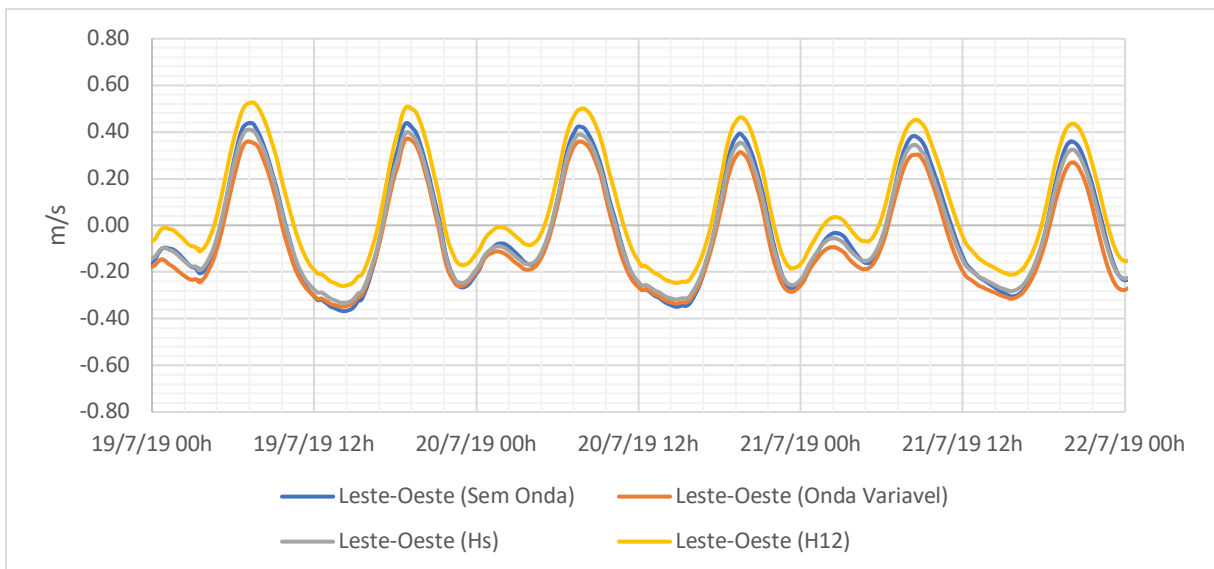


Figura 54. Componente Leste-Oeste da velocidade para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Mar Aberto.

Fonte: A autora (2021)

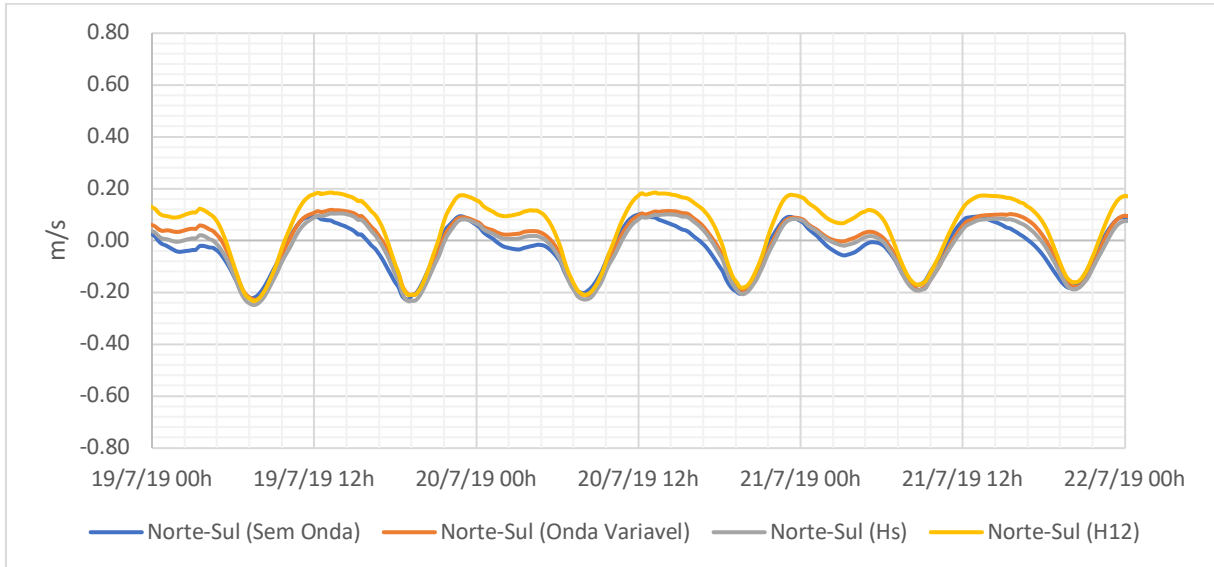


Figura 55. Componente Norte-Sul da velocidade para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na Estação Mar Aberto.
Fonte: A autora (2021)

5.4.2 RELAÇÃO DOS MÓDULOS DE TENSÃO NO FUNDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 2, 6, 7 E 8.

De uma forma geral, verificando os resultados dos cenários do inverno é possível perceber que o comportamento da circulação hidrodinâmica neste período, continua muito similar aos resultados dos cenários do verão.

Na análise dos resultados da estação denominada Mar Aberto (Figura 56), como no período do verão, é possível verificar valores distintos de tensão no fundo para os diferentes tipos de onda. Incluindo maiores valores para as ondas de tempestades quando comparadas às tensões do fundo das ondas variáveis e médias.

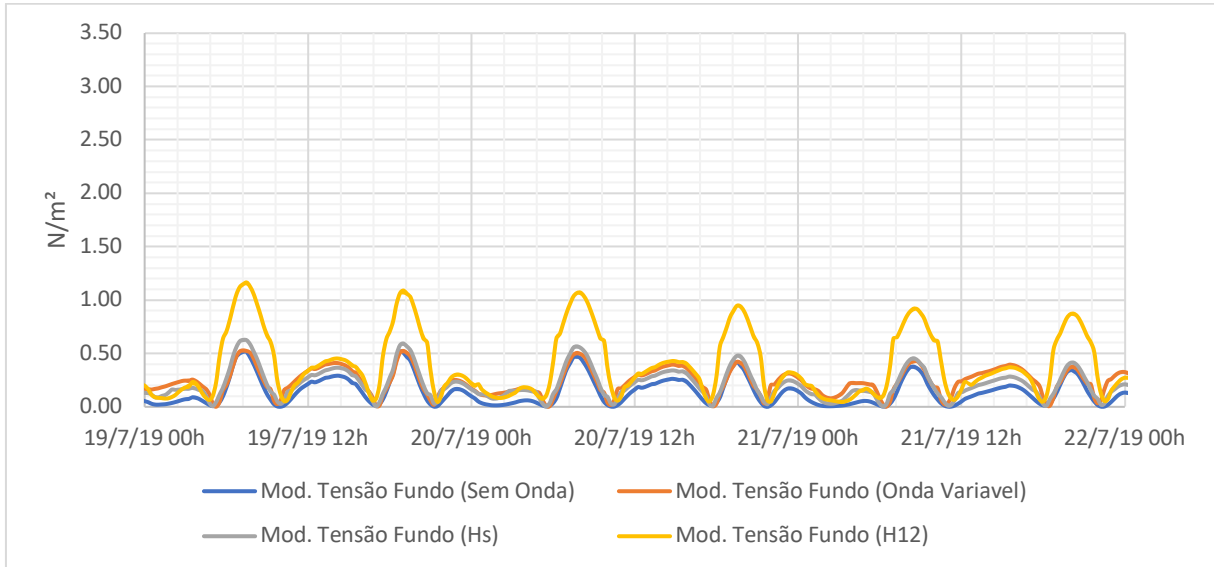


Figura 56. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Mar Aberto.
Fonte: A autora (2021)

A Figura 57 mostra os resultados obtidos na entrada do CEP (Estação Canal da Galheta (Limoeiro)). Como já observado no período do verão, os resultados apresentam diferenças significativas nos valores de tensão no fundo para os cenários distintos. Entretanto para os períodos de verão e inverno, as alturas das ondas não tiveram mudanças relevantes e os valores de tensão no fundo, para os três tipos de ondas, continuaram semelhantes. Desta forma, por mais que exista influência das ondas na região, o tipo da onda e a sazonalidade não é relevante na entrada do CEP.

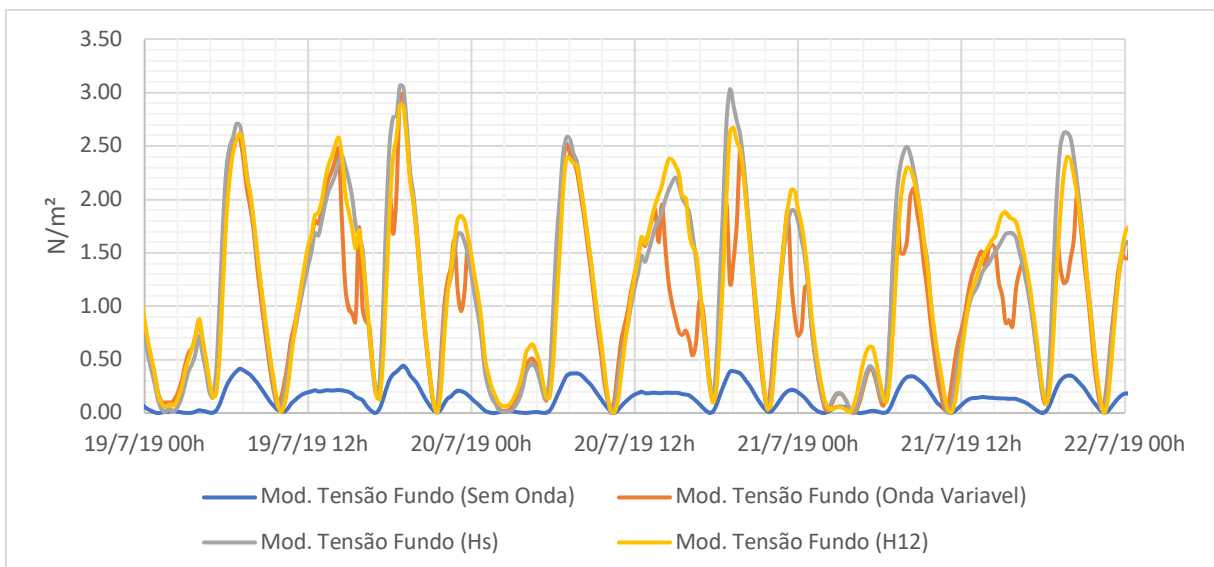


Figura 57. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta (Limoeiro).
Fonte: A autora (2021)

Analisando os resultados no interior do CEP, nas estações Canal da Galheta (Pontal do Poço), Canal da Galheta, Baía de Paranaguá 1 e Baía de Antonina (Figura 58 à Figura 61), é possível verificar a mesma similaridade no comportamento dos valores de tensão do fundo encontrado no verão. Os resultados das simulações com e sem as ondas não modificaram os valores de tensão no fundo.

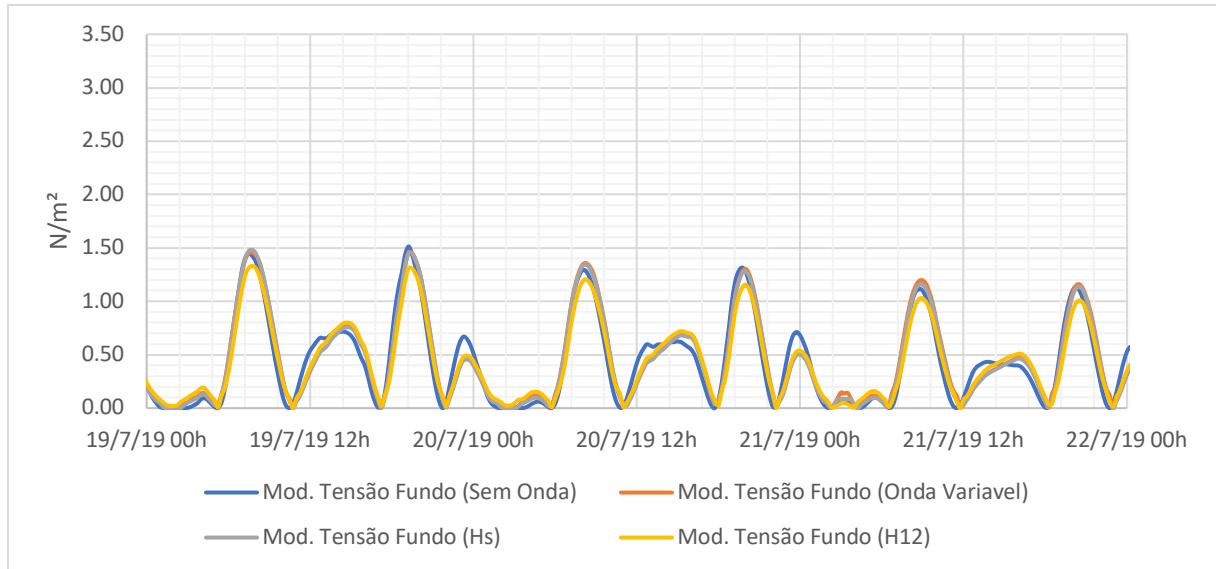


Figura 58. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta (Pontal do Poço).

Fonte: A autora (2021)

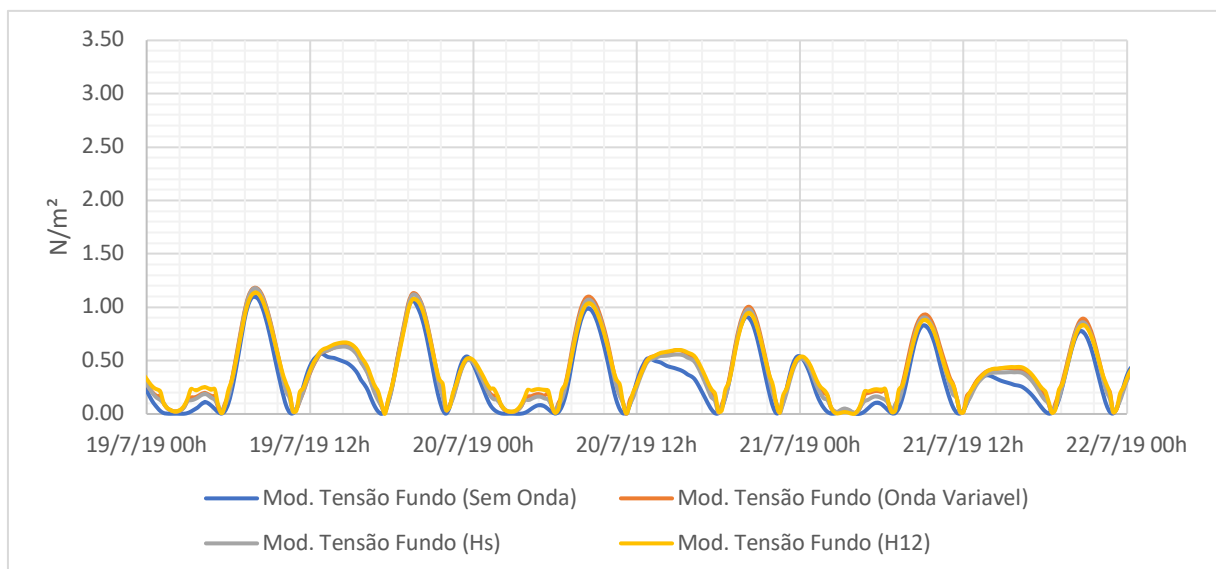


Figura 59. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta.

Fonte: A autora (2021)

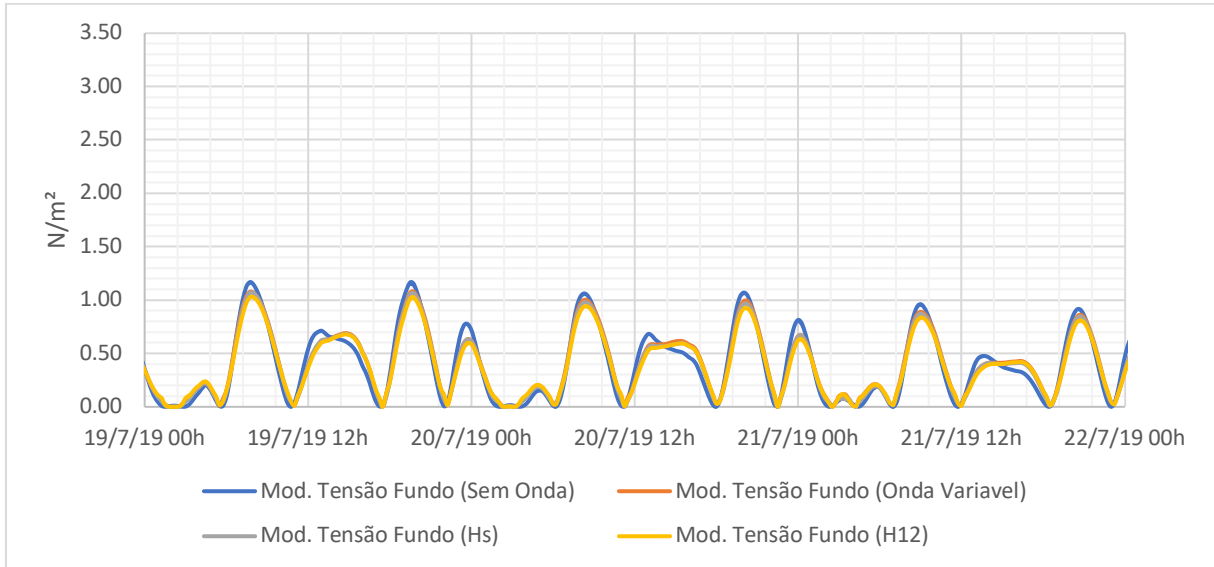


Figura 60. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Paranaguá 1.
Fonte: A autora (2021)

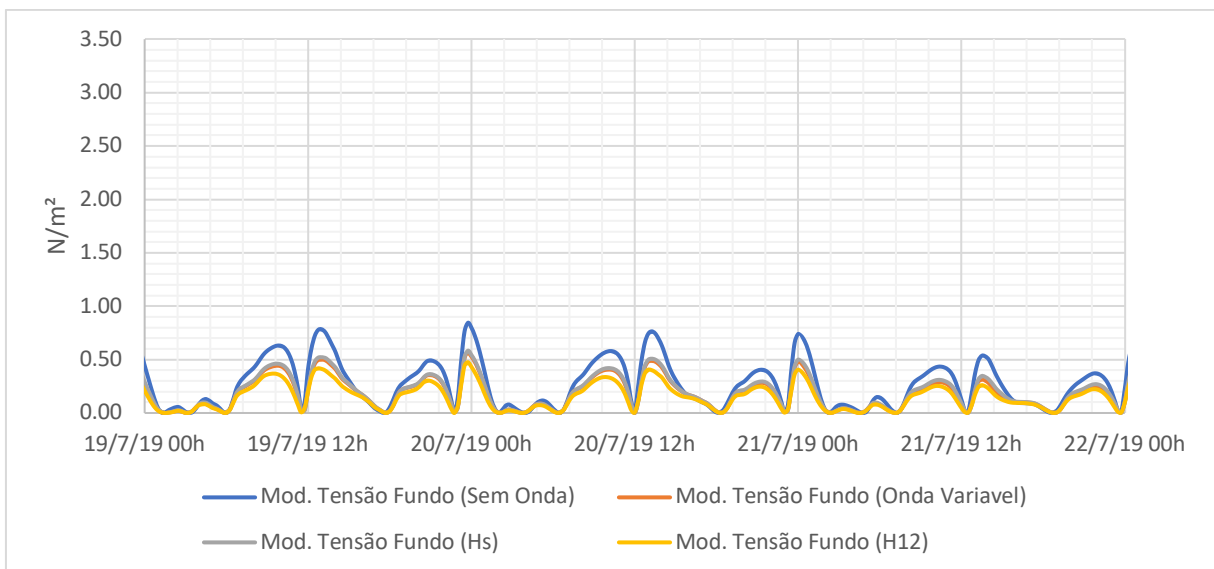


Figura 61. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Antonina.
Fonte: A autora (2021)

Da mesma forma que o período do verão (Figura 48), a Figura 62 apresenta os valores de tensão de fundo na estação Canal da Cotonga. É possível perceber uma diferença pequena nos valores de tensão do fundo com relação as simulações dos diferentes cenários. Ou seja, igualmente ao período do verão, por mais que as ondas não “entrem” no canal da Galheta, o acoplamento entre os dois modelos modificaram de forma importante os valores de tensão no fundo do Canal da Cotonga. E como já foi citado anteriormente, esta variação possivelmente está relacionada à batimetria

local, uma vez que no Canal da Cotinga, a profundidade é menor que a no canal da Galheta.

Entretanto, como pode ser observado na Figura 63, esta variação também foi pequena e é verificada apenas para os cenários sem a influência das ondas.

Por fim, pode-se constatar nos resultados da estação Baía de Laranjeiras (Figura 64), que diferentemente do período do verão, para os cenários de inverno nesta apresentou influência relevante das ondas nos valores de tensão do fundo para a região.

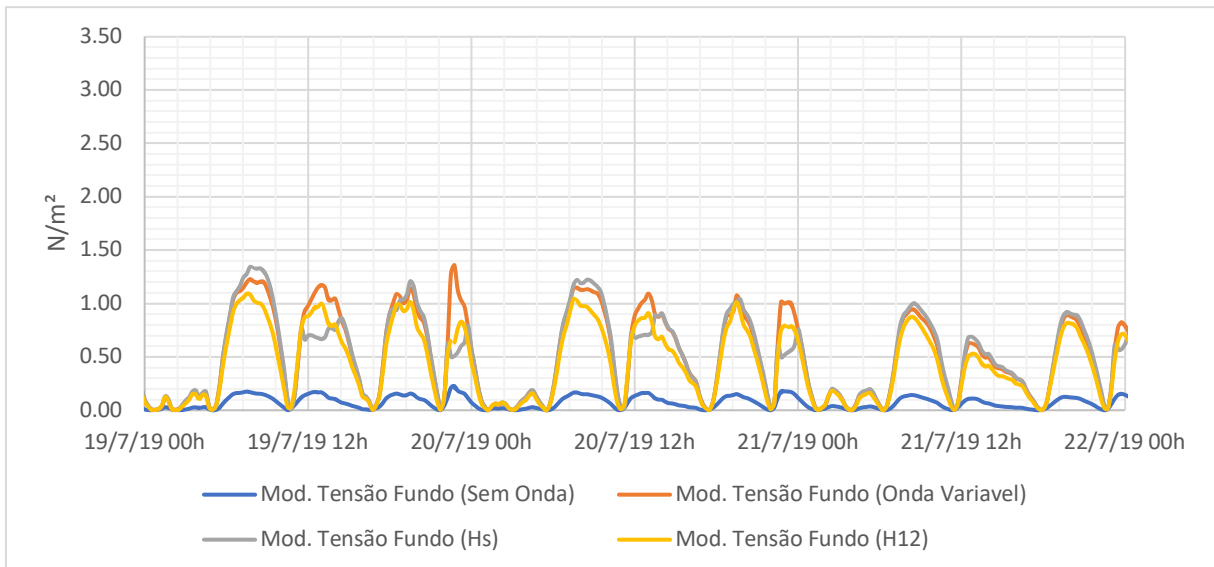


Figura 62. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Cotinga.
Fonte: A autora (2021)

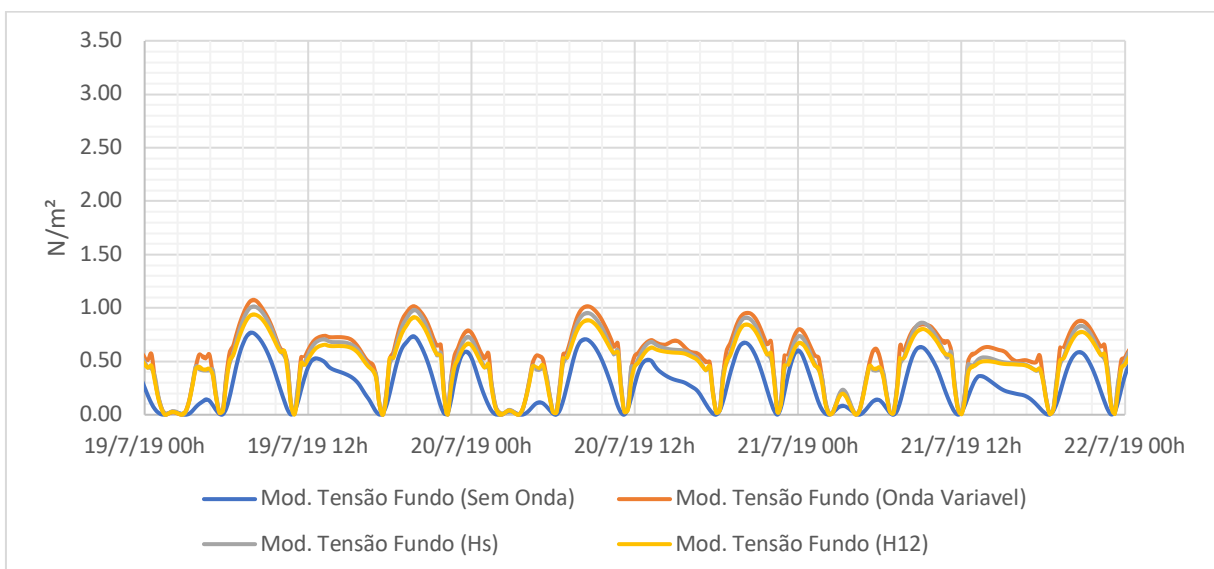


Figura 63. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Paranaguá 2.
Fonte: A autora (2021)



Figura 64. Módulos de tensão do fundo para os cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Laranjeiras.
Fonte: A autora (2021)

5.4.3 AVALIAÇÃO DO AMORTECIMENTO DA ONDA A PARTIR DO CENÁRIO 8

Na Figura 65 é possível verificar, através dos valores das alturas médias das ondas (H_s), que as ondas sofrem um grande amortecimento ao entrar no CEP. Comparando as alturas obtidas nas estações Canal da Galheta (Limoeiro) e Canal da Galheta (Pontal do Poço), localizadas na entrada do CEP, e a estação Mar aberto, na região adjacente costeira, é possível observar as alturas de ondas são cerca de 8 vezes menores na estação Canal da Galheta (Limoeiro) e 20 vezes menores no Canal da Galheta (Pontal do Poço), quando comparadas com os valores da estação Mar aberto.

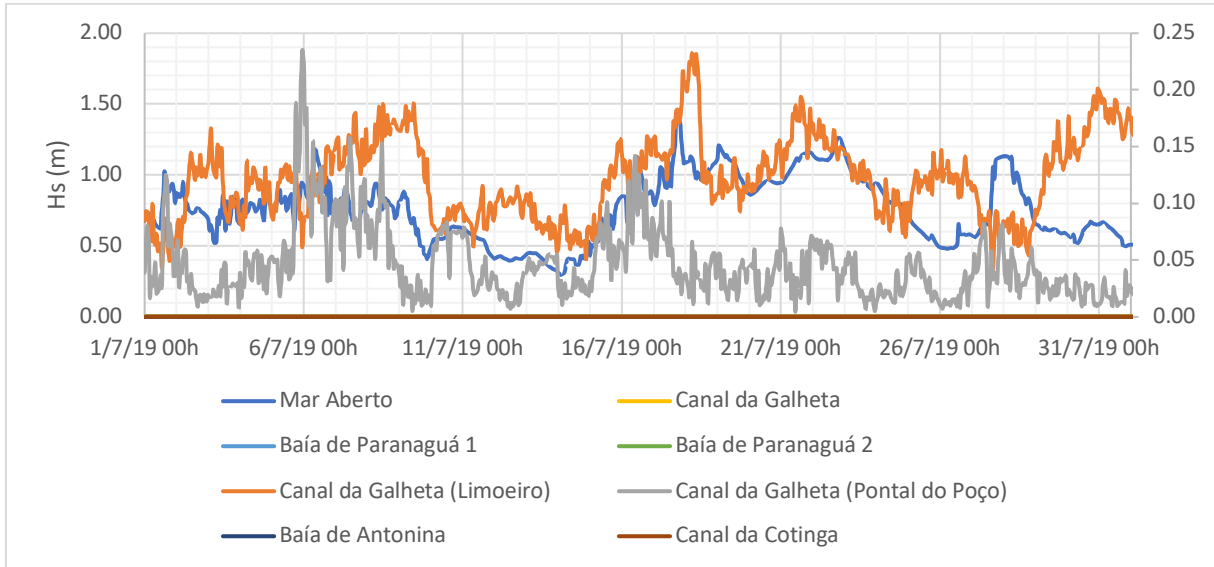


Figura 65. Alturas médias das ondas variáveis para o cenário 8. A estação Mar Aberto usa o eixo principal e as demais estações, o eixo secundário.

Fonte: A autora (2021)

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentada uma aplicação dos modelos de circulação hidrodinâmica acoplados com o modelo de propagação da onda do SisBaHiA®, visando analisar a circulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), com e sem a influência das ondas, considerando os climas de ondas médio, extremo e variável para o ano de 2019.

A fim de realizar uma verificação no desempenho do modelo em simular a circulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá, primeiramente foi feita uma análise qualitativa dos resultados da circulação hidrodinâmica para os forçantes maré, vento e descarga fluvial. Verificou-se que o atraso do pico de preamar entre a entrada do CEP e a baía de Antonina foi de 1h15min; tais resultados estão em concordância com os observados por Tamura & Cunha (2016), que encontraram um intervalo de aproximadamente 1h30min no CEP em simulações semelhantes.

O clima de ondas médio e extremo foram simulados independentemente, considerando duas ondas distintas monocromáticas. Nos resultados foi observado que em ambos os regimes, a intrusão das ondas é limitada ao setor externo do CEP. Isso ocorre devido à presença dos bancos de areia na entrada do CEP, que agem como quebra-mares submersos e tendem a dissipar a maior parte da energia das ondas. Além disso foi possível verificar uma amplificação da altura de onda na região dos bancos de areia localizados na entrada do CEP, indicando uma forte relação com a batimetria da região, já que a onda tende a sofrer empinamento em regiões mais rasas.

As componentes Norte-Sul e Leste-Oeste das velocidades, com e sem o forçante onda, foram praticamente iguais nas regiões externas e internas do CEP. A exceção ocorreu na entrada do CEP, onde os valores de velocidade apresentaram uma leve diferença para as simulações com e sem o forçante ondas. Dessa forma, é possível concluir que os climas de ondas médio, extremo e variável pouco influenciam a circulação na região interna do CEP.

Os resultados para a tensão do fundo mostraram as principais diferenças, quando foram comparados os diferentes cenários. Para o clima de ondas extremo, ocorreram as maiores diferenças entre os cenários simulados. Na entrada do CEP verifica-se uma diferença significativa nos valores de tensão no fundo para as diferentes simulações. Entretanto, os valores de tensão no fundo para os três climas

de ondas são semelhantes e, portanto, por mais que ondas influenciem os valores de tensão do fundo, o tipo de clima de onda não é relevante, principalmente na entrada do CEP. As regiões no interior do estuário, de forma geral, demonstram certa similaridade no comportamento da tensão do fundo para as simulações com e sem o forçante ondas.

Este mesmo comportamento também foi observado na análise do amortecimento das ondas variáveis. Foi possível observar que as ondas sofrem um grande amortecimento logo na entrada do CEP e tende a “desaparecer” nas demais regiões. Por fim, as simulações para o período de inverno mostraram resultados semelhantes ao período de verão.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. A. **Determinação e Análise das Principais Componentes de Maré Terrestre e de Carga Oceânica, por Meio de Dados de Posição e do Campo de Gravidade Terrestre**. Brasília, 2019.

ANA - Agência Nacional de Águas, Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acessado em: 24 de jul de 2021.

APPA - ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTONINA. **Porto de Antonina**. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/portaltv3/pdf/Portos/2012/Antonina.pdf>>. Acesso em 24 jun de 2021.

CUNHA, C. L. N. *et al.* **Uso de técnicas de modelagem para avaliar o transporte de sedimentos no complexo estuarino de Paranaguá**. In VIII Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. 2015.

DALAZEN, J. P. **Modelagem numérica da renovação das águas no Complexo Estuarino de Paranaguá**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

EMPRAPA **Porto de Paranaguá**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/macrologistica/exportacao/porto_paranagua>. Acesso em 30 de mai de 2021.

HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**. Nova York: Cambridge University Press, 2007.

IH CANTABRIA – MMA. Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: **Manual do Usuário do SMC 3.0**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017. Disponível em: <<https://smcbrasil.ufsc.br/manuais-documentos-tematicos/manuais-do-usuario-e-de-referencia/>>. Acesso em 18 de jul de 2021.

IH CANTABRIA – MMA. Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: **Manual de Referência –OLUCA - SP**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017. Disponível em: <<https://smcbrasil.ufsc.br/manuais-documentos-tematicos/manuais-do-usuario-e-de-referencia/>>. Acesso em 18 de jul de 2021.

LAMOUR, M. R; SOARES, C. R. & CARRILHO, J.C. **Mapas De Parâmetros Texturais De Sedimentos De Fundo Do Complexo Estuarino De Paranaguá – PR**. Boletim Paranaense de Geociências, n. 55, p. 77-82, 2004. Editora UFPR

LANA, P. C.; Marone, E.; Lopes, R. M.; Machado, E. C.,. **The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil**. In: Seeliger U., Kjerfve B. (eds) Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Ecological Studies (Analysis and Synthesis): 131–145. Springer, Berlin, pp. 131–145. 2001.

MANTOVANELLI, A. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem.** 146 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

MANTOVANELLI, A. *et al.* **Combined tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary.** *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 59, n. 4, p. 523-537, 2004.

MARONE E. & JAMIYANNA D. **Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of Paranaguá Bay, Paraná, Brazil.** *Nerítica* 11, 95- 107. 1997.

MIGUENS, A. P. **Marés e correntes de maré; correntes oceânicas.** *Navegação: a ciência e a arte-navegação costeira, estimada e em águas restritas.* Niterói: DHN- Diretoria de Hidrografia e Navegação, órgão da Marinha do Brasil, v. 1, p. 227-274, 1996.

MTPA - MINISTÉRIOS DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. **Plano Mestre do Complexo Portuário de Paranaguá e Antonina.** 2016. Disponível em: <http://antigo.infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento_portuario/planos_mestres/versao_preliminar/vp22.pdf> Acesso em 18 de jul de 2021.

NEMES, D. D & MARONE, E. **Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do Estado do Paraná, Brasil.** *Boletim Paranaense de Geociências*, volume 68-69 pp. 12-25. 2013.

NOERNBERG, M.A.; ANGELOTTI, R.; CALDEIRA, G.A. & RIBEIRO DE SOUSA, A.F. **Determinação da Sensibilidade do Litoral Paranaense à Contaminação por Óleo.** *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, vol 1.2(2). pp. 49-59. 2008.

Projeto SMC-Brasil: **ondas:** documento temático. Ministério do Meio Ambiente *et al.* Brasília, DF, 2018.

ROCHA, R. P.; SUGAHARA, S. & SILVEIRA R.B. **Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean:** hindcast and validation against altimeter data. *Weather and Forecasting*, 19, 398 – 410. 2004.

ROSMAN, P. C. C., **Referência Técnica Do SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**, Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>>. 2021. Acesso em 18 de jul de 2021.

SANTOS, F. A. D. P. **Influência da dragagem do canal da galheta na circulação hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SANTOS, N. M. **Os Manguezais do Complexo Estuarino De Paranaguá: Variações Interdecadais, Distribuição da Biomassa Aérea e Formas de Uso da**

Madeira. Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos. Universidade Federal do Paraná, 2013.

SATO, O. IOF1224 - Ondas e Marés. Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica Instituto Oceanográfico - Universidade De São Paulo São Paulo, SP, 2010.

SILVA, E. R. M. **EIA Estudo de Impacto Ambiental.** 2004 Disponível em: < <https://www.sedest.pr.gov.br/Pagina/EIARIMA-Obras-de-Ampliacao-e-Modernizacao-da-Estrutura-Portuaria-2004> >. Acesso em 19 de jul de 2021/

SILVA, R. A. G.; PEREIRA, S. P.& ROSMAN, P. C. C. **Modelagem numérica da circulação costeira e das correntes litorâneas na costa de Fortaleza – CE.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS - SBRH, XXII.-Florianópolis, Santa Catarina, 2017.

SOUZA, M. M. **Modelagem Computacional do Complexo Estuarino de Paranaguá Sob a Influência se Ondas, Marés e Descarga Fluvial.** Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

STÜKER, E. *et al.* **Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul.** Ciência e Natura, Santa Maria v.38 Ed. Especial-IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, p. 284 – 290, 2016.

TAMURA, M. M. & CUNHA, C. L. **Evolução da Sedimentação Nos Canais De Acesso Aos Portos No Complexo Estuarino de Paranaguá.** N XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA LIMA, PERÚ.

ANEXO 1 – Parâmetros do Modelo de Propagação de Ondas

SisBaHiA 11 MPO - Modelos de Propagação de Ondas

Título: 1.Propagar_onda_mono Estado: Rodou sem Erros

Domínios de Modelagem | **Parâmetros de Modelagem** | Correntes | Resultados

Ângulo Norte-X (°): 90.0000 Gravidade (m/s²): 9.8062 Ind. Arrebentação: 0.7800 Tol. Delta Prof.: 10.0000 Nível Médio (m): 0.0000

Grade de Propagação de Ondas (GPO)

Lado Transverso à Costa (LTC)

Comprimento	Núm. de Linhas	Delta-LTC (m)
44436.0164	1000	44.480

Posição da Origem

Coordenada X	Coordenada Y
797224.0422	7176349.8031

Lado de Incidência de Ondas (LIO)

Comprimento	Núm. de Linhas	Delta-LIO (m)
40593.5108	500	81.350

Subdivisões de Delta-LIO: 10 Ângulo LTC-Norte (°): 45.0000

Fronteira Lateral (LTC)

Fechada (refletiva)

Aberta (transmissiva)

Cálculo da Dispersão

Iterativo (precisão > 99.99%)

Direto (precisão > 99.95%)

Tipo do Modelo

Linear

Stokes ajustado (Hedges model)

Stokes

Utiliza valores de corrente

Suaviza

Peso Local: 0.5000 Coef. Amort.: 0.0400

Mecanismos de Dissipação

Camada limite turbulenta

Amortecimento por fundo poroso

Camada limite laminar

Subdiretório de Resultados: MPO106909629

Ondas incidentes na fronteira

Tipo de campo de onda

Distribuído ou simples Espectral Executa Modelo ao Largo

Campo de Onda | Modelo ao Largo

Período	Nível Maré	Amplitude	Azimute
7.6000	0.0000	7.5800E-01	112.5000

Executa | Verificar | **Visualizar**

Busca:

Início: 14:45 Projeto: Calibração 13/11/2021 15:23

Análise multivariada (SOM) do clima de ondas no ponto DOW

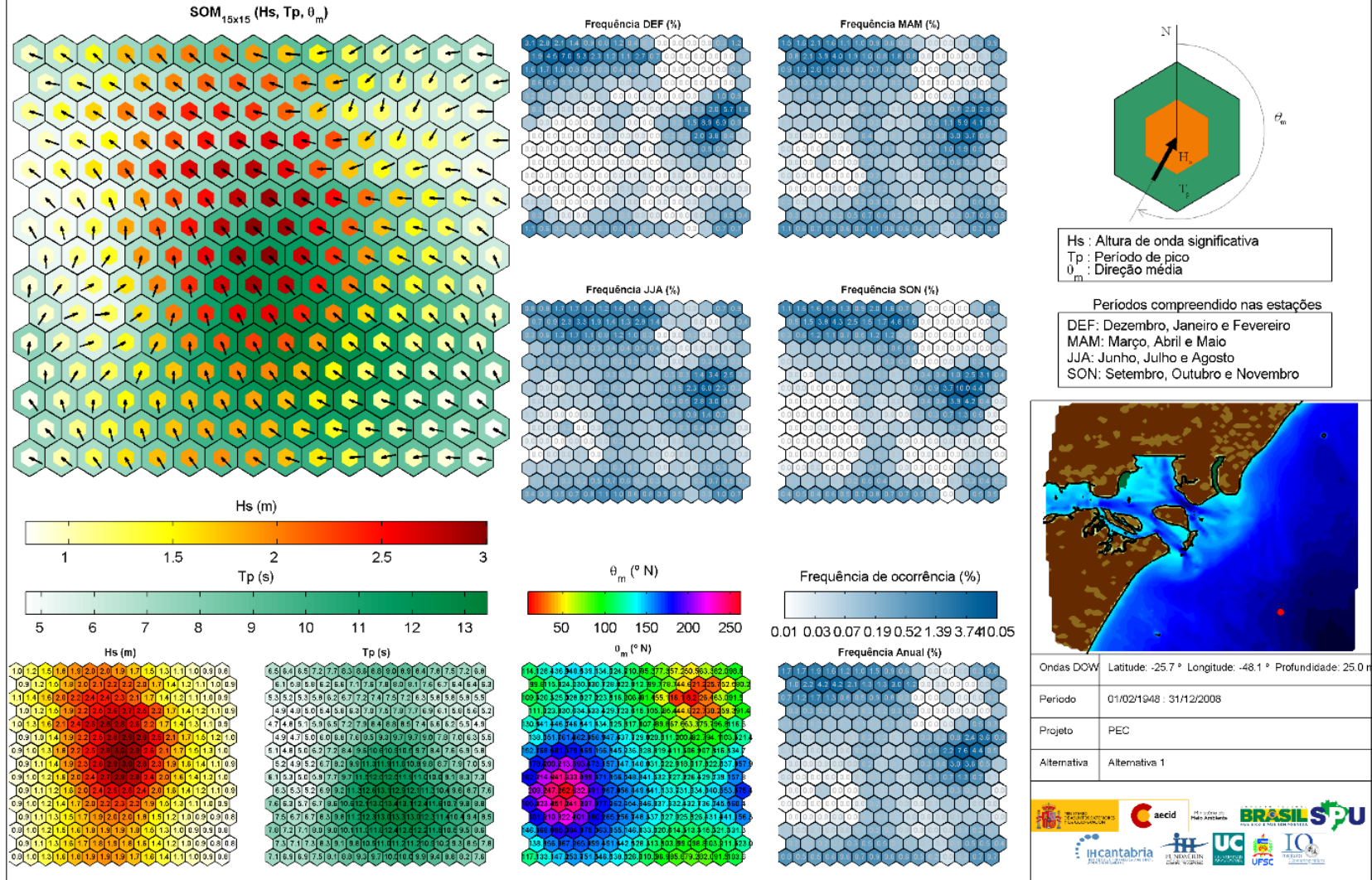


Figura B. Análise multivariada (SOM) do clima de ondas no ponto DOW (Ponto P).

Fonte: SMC-Brasil

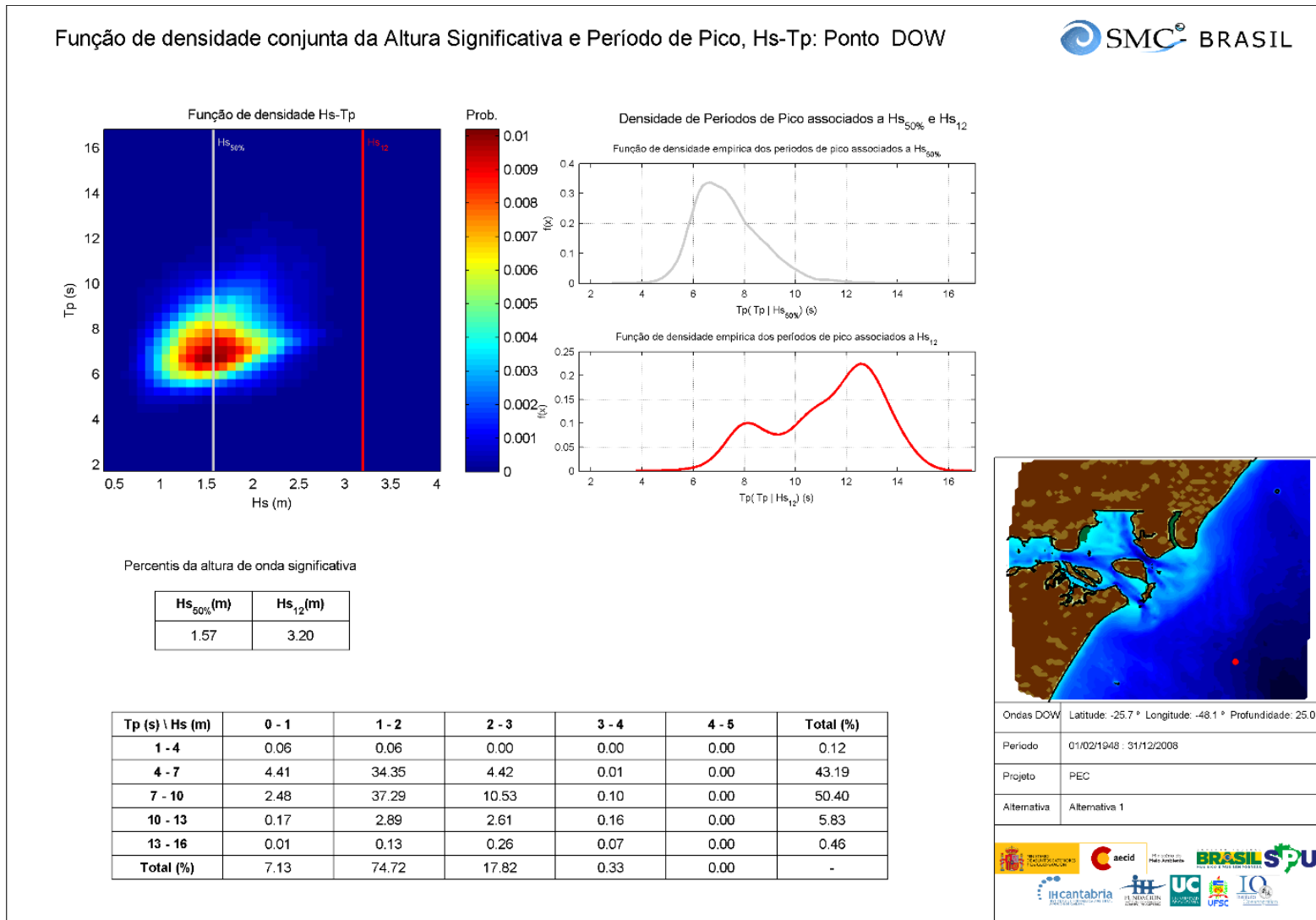


Figura D. Função de densidade conjunta da Altura Significativa e Período de Pico, Hs-Tp: Ponto DOW (Ponto P).
Fonte: SMC-Brasil

ANEXO 3 – Gráficos das Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1.

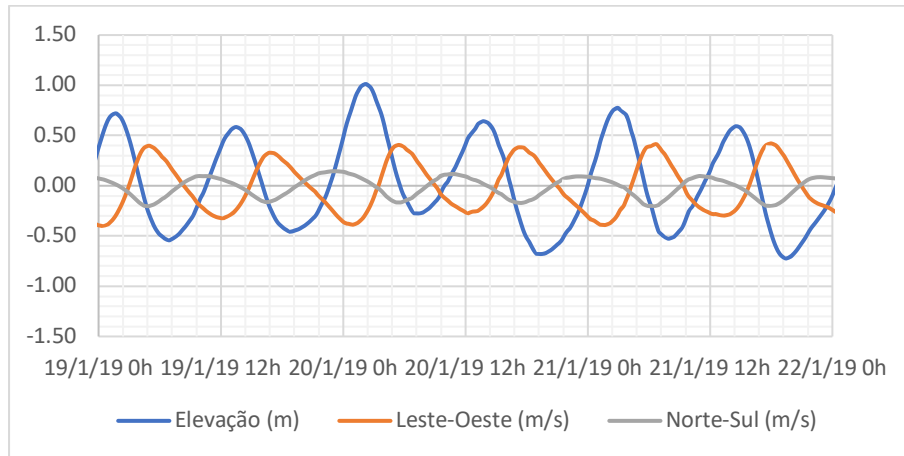


Figura F. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Mar Aberto. **Fonte:** A autora (2021)

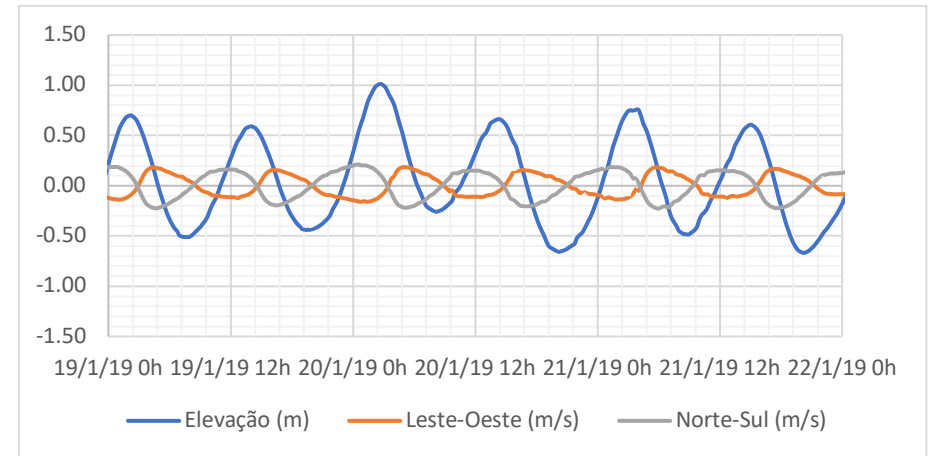


Figura G. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Canal da Galheta (Limoeiro) **Fonte:** A autora (2021)

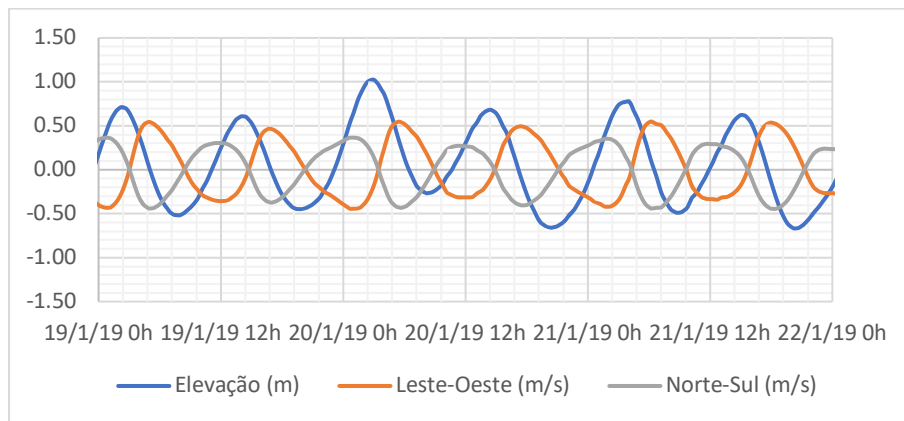


Figura H. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Canal da Galheta (Pontal do Poço). **Fonte:** A autora (2021)

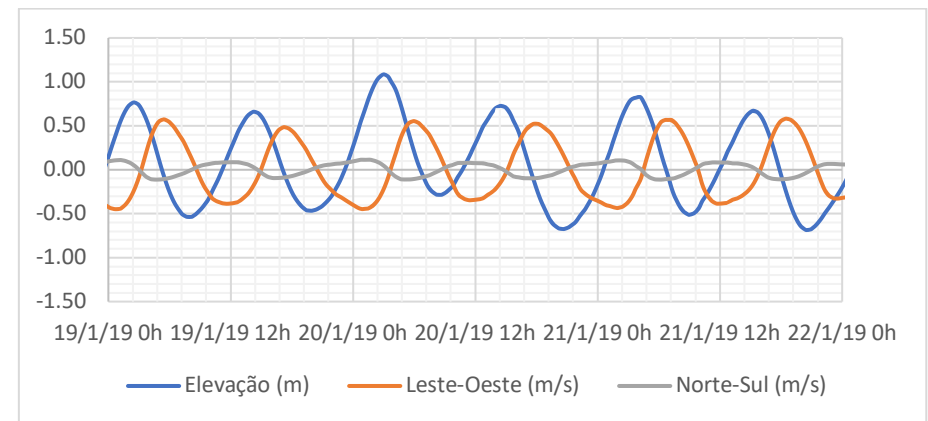


Figura I. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Canal da Galheta. **Fonte:** A autora (2021)

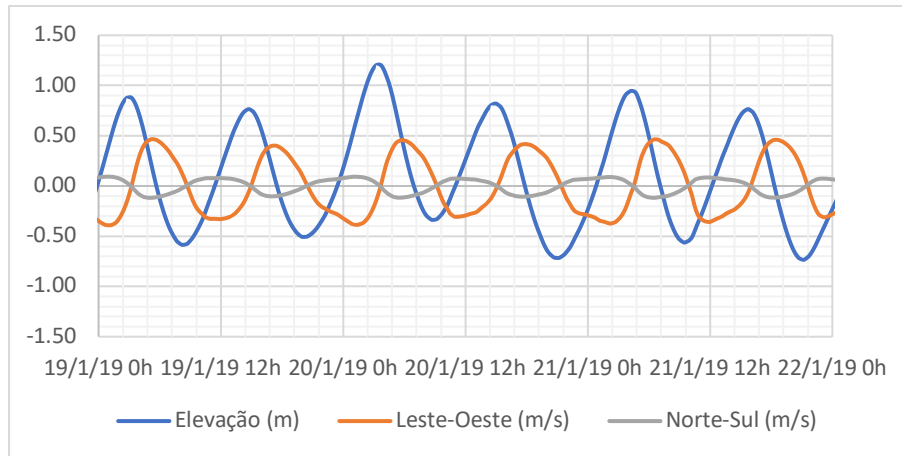


Figura J. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Baía de Paranaguá 1
Fonte: A autora (2021)

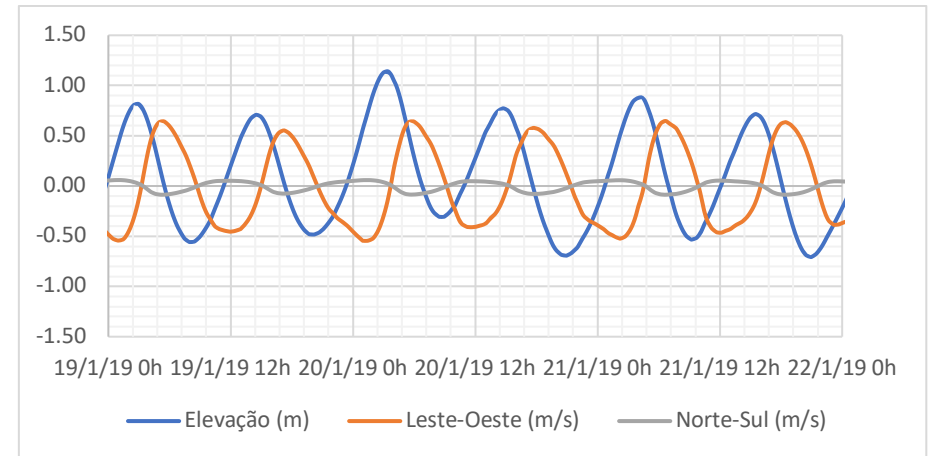


Figura K. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Baía de Paranaguá 2
Fonte: A autora (2021)

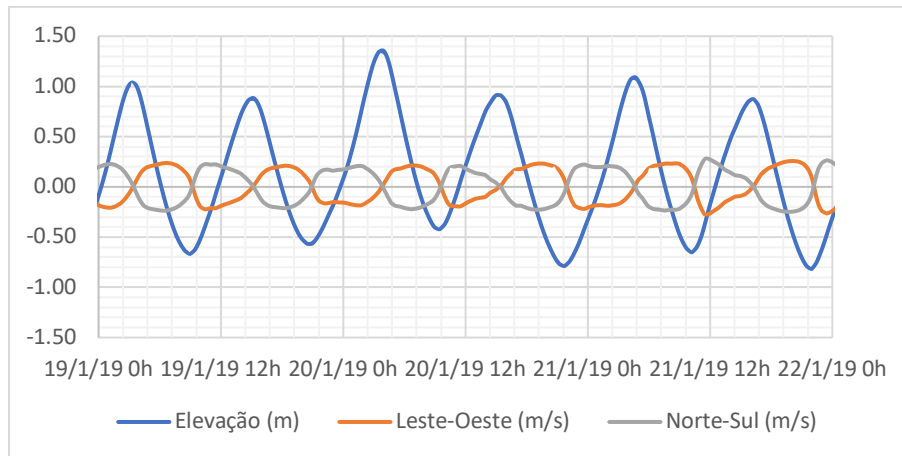


Figura L. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Baía de Antonina
Fonte: A autora (2021)

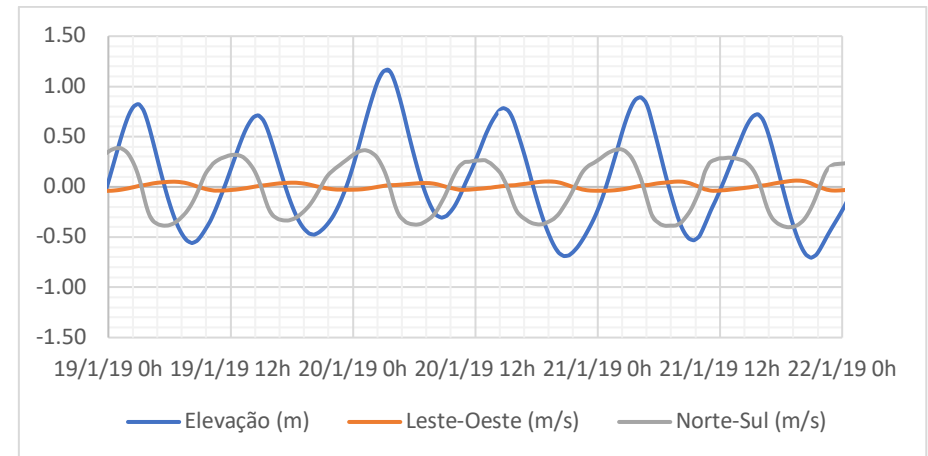


Figura M. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Baía de Laranjeiras
Fonte: A autora (2021)

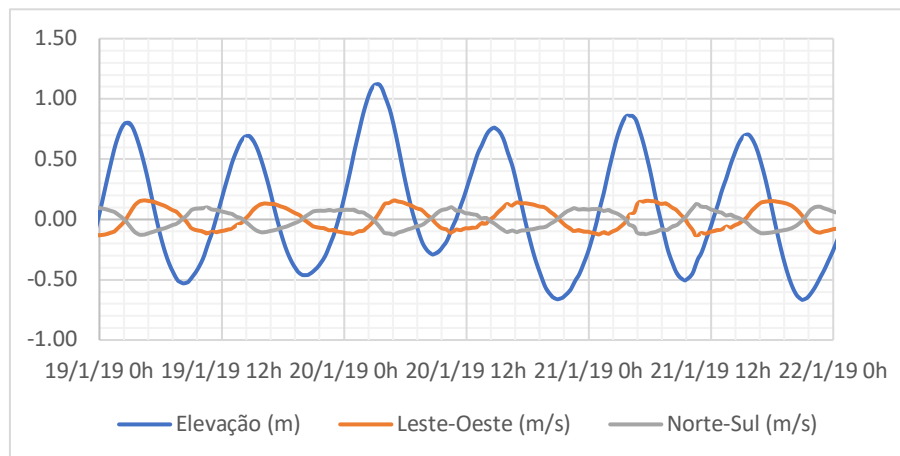


Figura N. Elevações e Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) da Velocidade para o Cenário 1 na estação Canal da Cotinga
Fonte: A autora (2021)

ANEXO 4 – GRÁFICOS DAS VELOCIDADES DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 1, 3, 4 E 5.

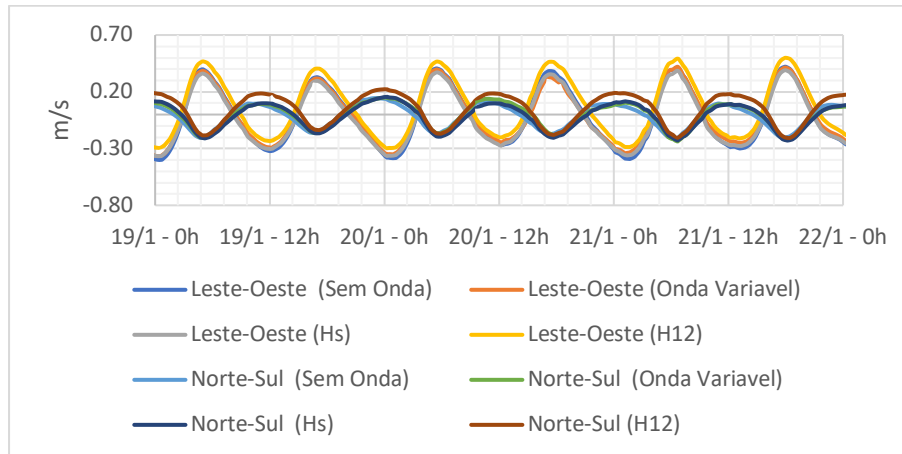


Figura O. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Mar Aberto. **Fonte:** A autora (2021)

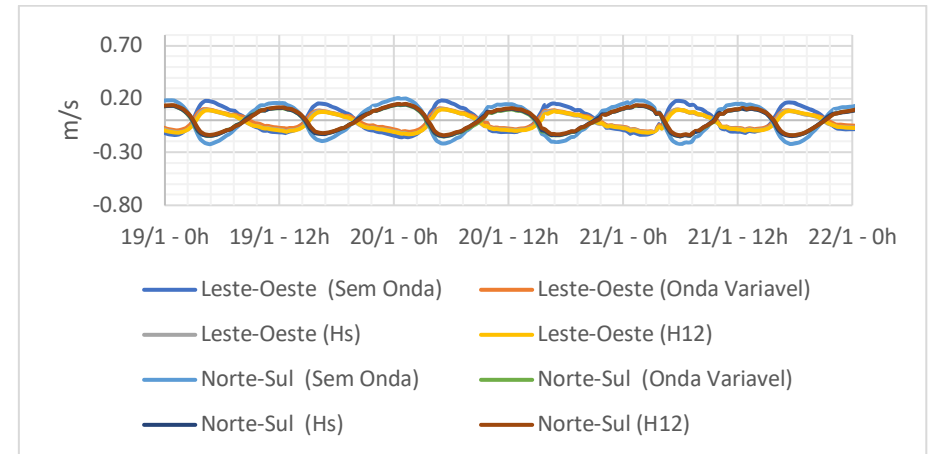


Figura P. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta (Limoeiro). **Fonte:** A autora (2021)

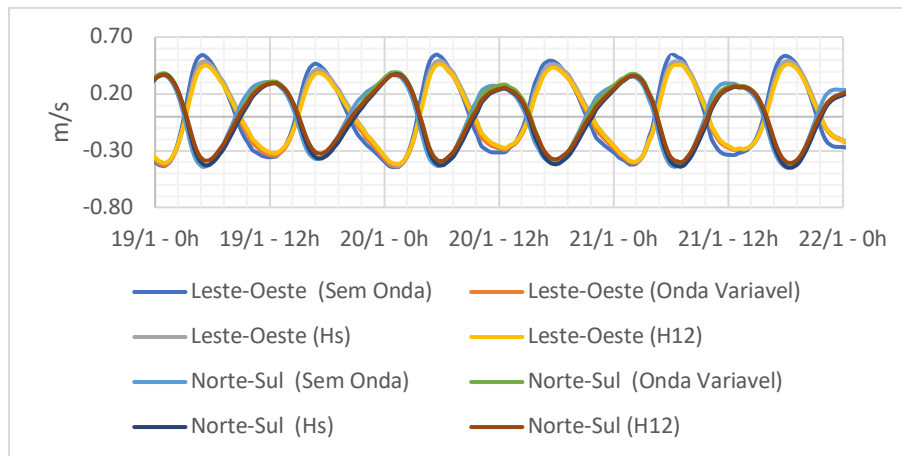


Figura Q. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta (Pontal do Poço). **Fonte:** A autora (2021)

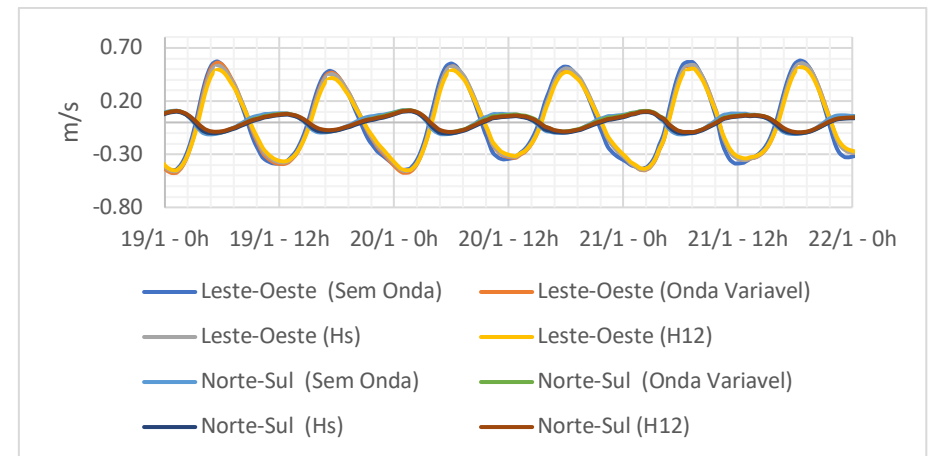


Figura R. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Galheta. **Fonte:** A autora (2021)

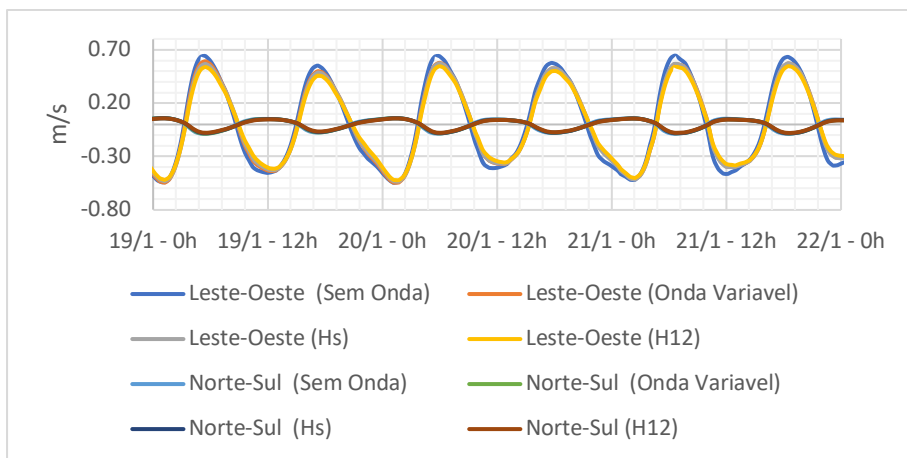


Figura S. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Paranaguá 1
Fonte: A autora (2021)

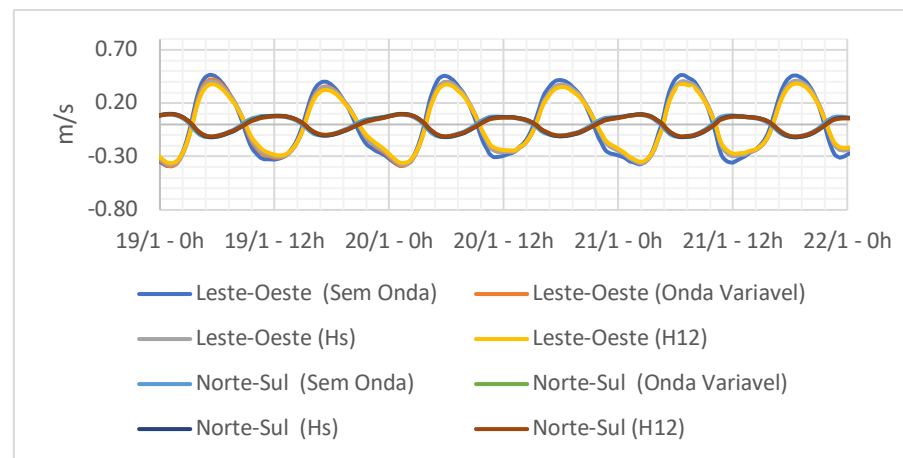


Figura T. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Paranaguá 2
Fonte: A autora (2021)

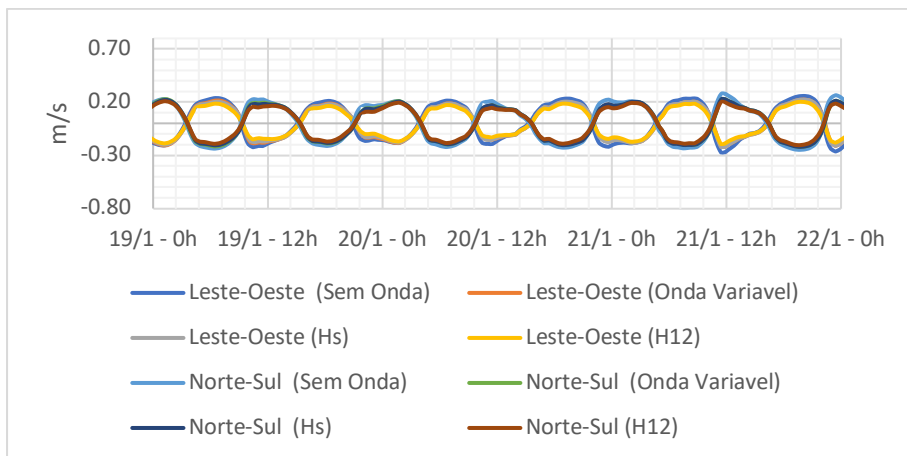


Figura U. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Antonina
Fonte: A autora (2021)

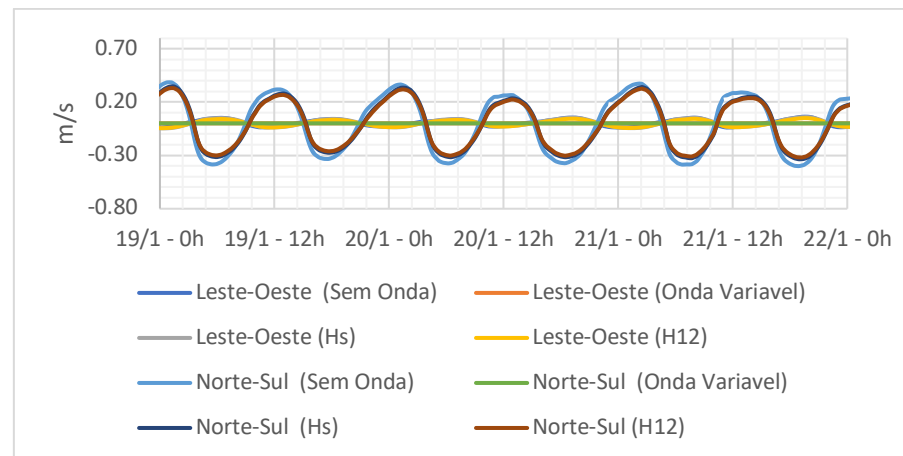


Figura V. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Baía de Laranjeiras
Fonte: A autora (2021)

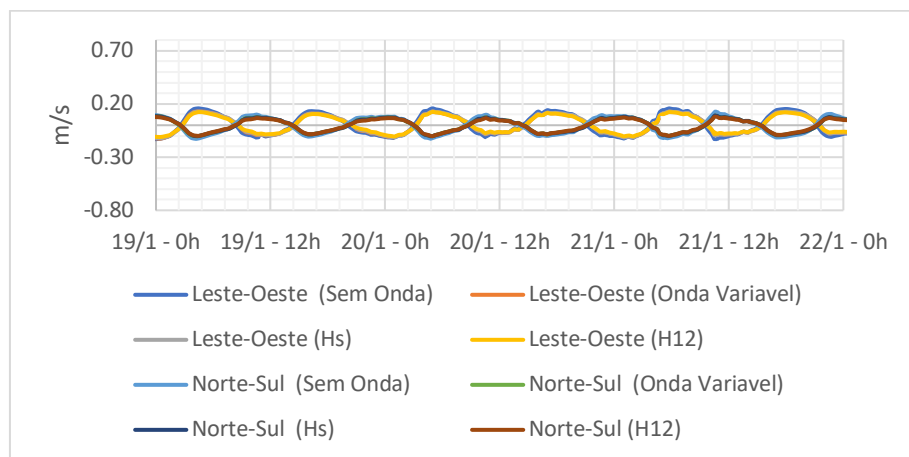


Figura W. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 1, 3, 4 e 5 na estação Canal da Cotinga
Fonte: A autora (2021)

ANEXO 5 – GRÁFICOS DAS VELOCIDADES DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA OS CENÁRIOS 2, 6, 7 E 8.

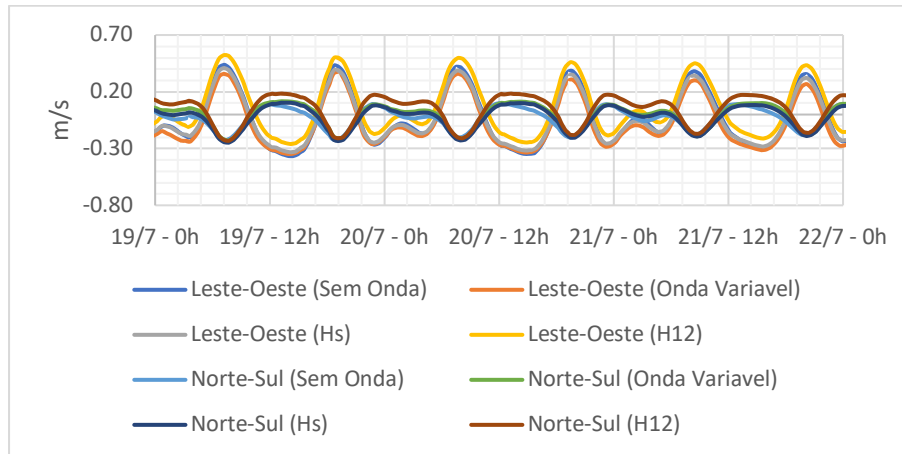


Figura X. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Mar Aberto. **Fonte:** A autora (2021)

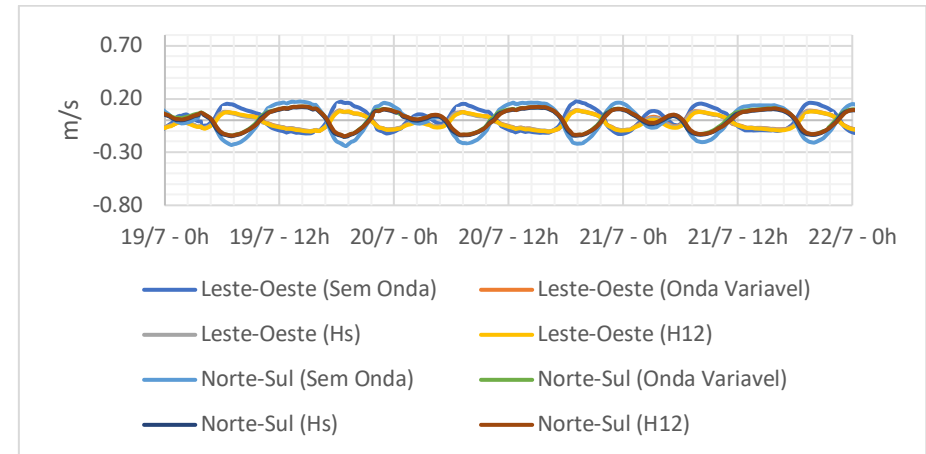


Figura Y. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta (Limoeiro). **Fonte:** A autora (2021)

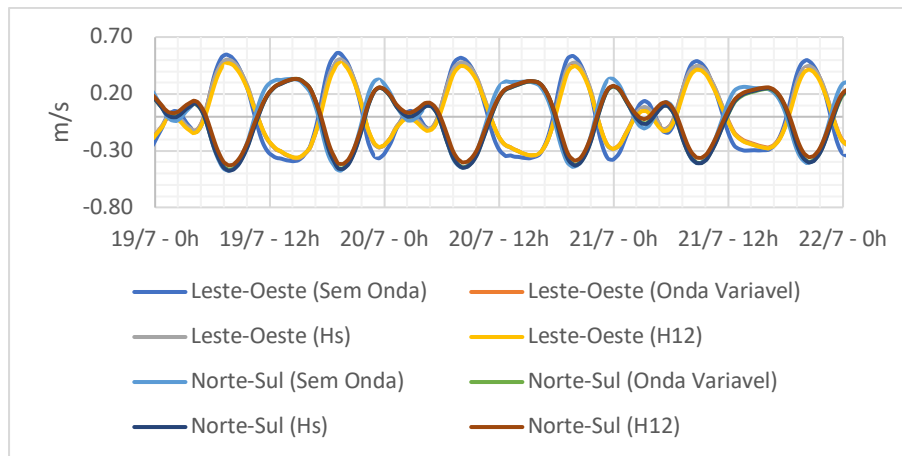


Figura Z. E Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta (Pontal do Poço). **Fonte:** A autora (2021)

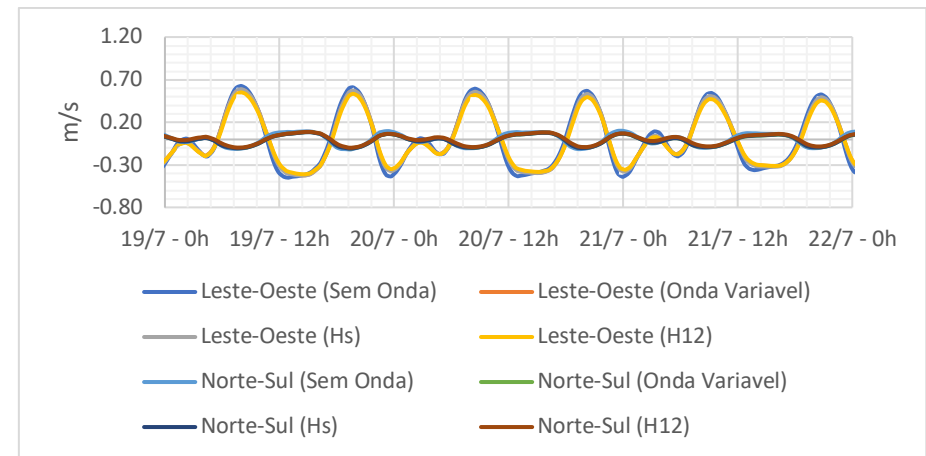


Figura AA. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Galheta. **Fonte:** A autora (2021)

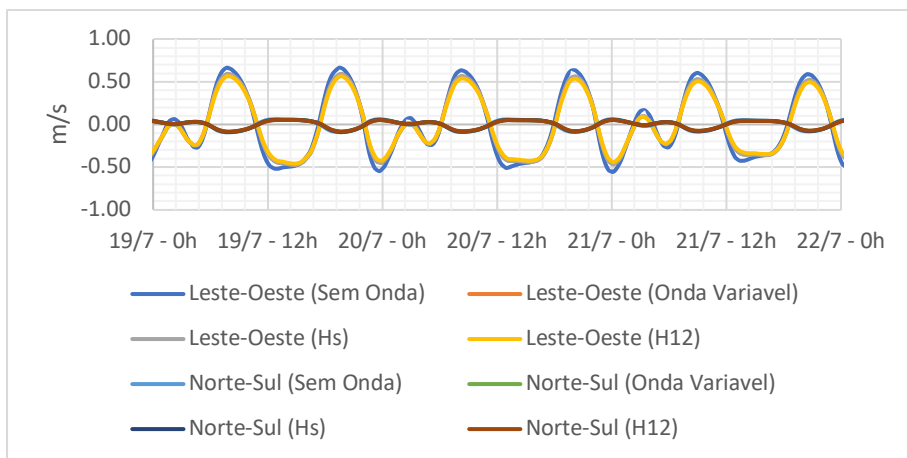


Figura BB. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Paranaguá 1
Fonte: A autora (2021)

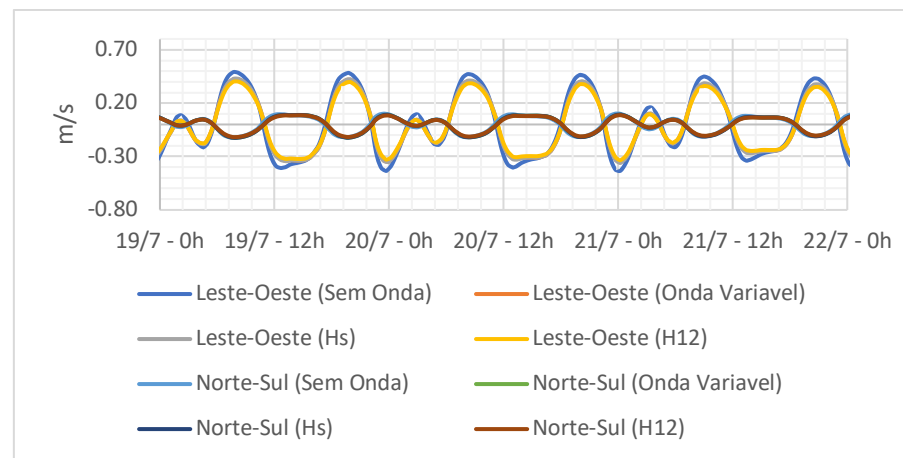


Figura CC. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Paranaguá 2
Fonte: A autora (2021)

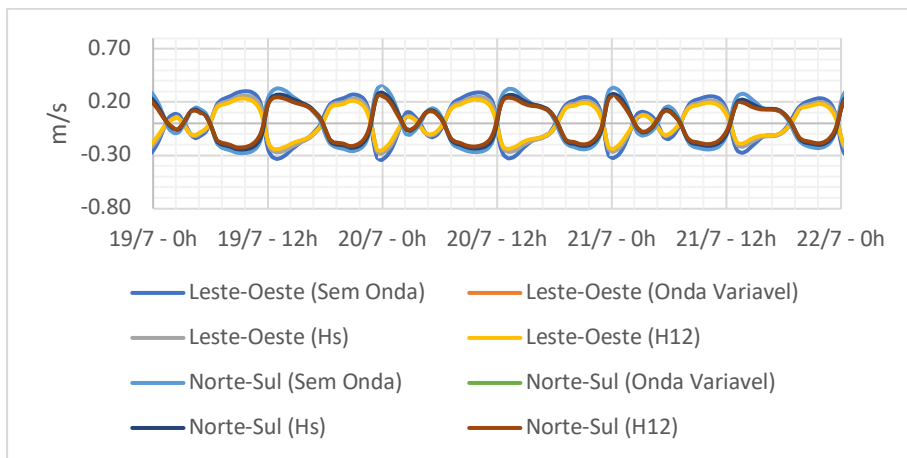


Figura DD. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Antonina
Fonte: A autora (2021)

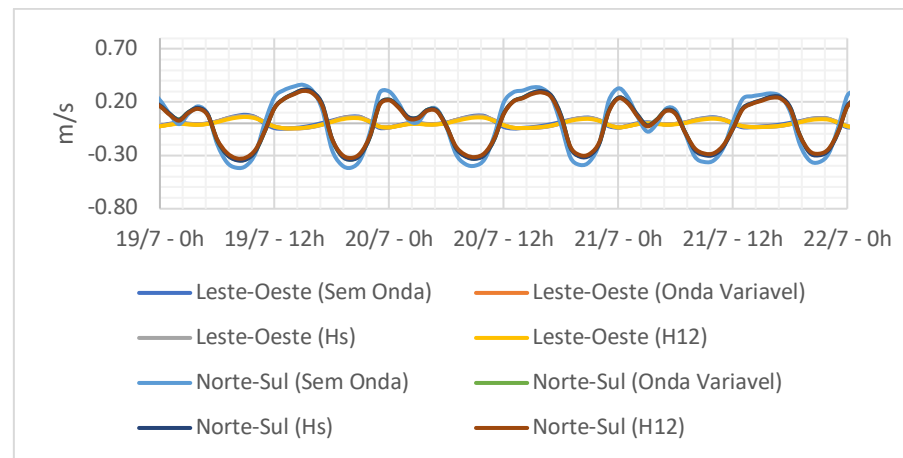


Figura EE. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Baía de Laranjeiras
Fonte: A autora (2021)

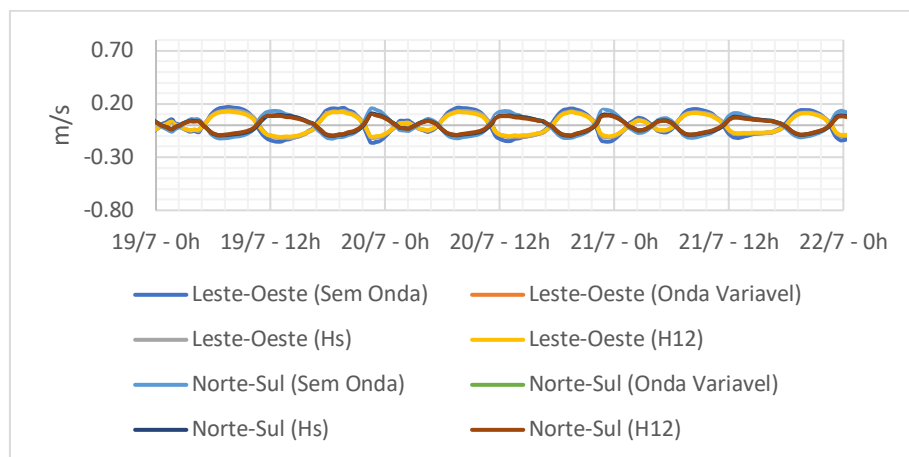


Figura FF. Velocidades da Circulação Hidrodinâmica para os Cenários 2, 6, 7 e 8 na estação Canal da Cotinga
Fonte: A autora (2021)