



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

**CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE
GERADAS PELO VENTO NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS (MA).**

Erllel Dairlane Vieira Santos

ORIENTADOR: Audalio Rebelo Torres Junior

São Luís - MA
2018



ERLLEN DAIRLANE VIEIRA SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE
GERADAS PELO VENTO NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS (MA).**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Linha de pesquisa: Dinâmica de Sistemas Costeiros e Oceânicos.

Área de Concentração: Oceanografia Física

ORIENTADOR: Audalio Rebelo Torres Junior

São Luís - MA
2018



Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Santos, Erllel Dairlane Vieira.

CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE GERADAS PELO VENTO NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS MA / Erllel Dairlane Vieira Santos. - 2018.
69 f.

Orientador(a): Audalio Rebelo Torres Junior.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Complexo Estuarino de São Marcos. 2. Ondas de gravidade. 3. SW_LHiCEAI. I. Torres Junior, Audalio Rebelo. II. Título.



SANTOS, Erlen Dairlane Vieira. Caracterização do padrão de ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento no Complexo Estuarino de São Marcos (MA). 2018. 69 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão.

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Linha de pesquisa: Dinâmica de Sistemas Costeiros e Oceânicos.

Área de Concentração: Oceanografia Física

Aprovada em 10 / 08 / 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Junior
Universidade Federal do Maranhão
ORIENTADOR

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez
Universidade Federal do Maranhão

São Luís
2018

À Deus, primeiramente,
e à minha família, pela paciência,
incentivo, e acima de tudo, pelo amor.



AGRADECIMENTOS

O capítulo mais importante dessa dissertação é, sem dúvidas, o de agradecimentos, pois é um espaço onde posso dizer, da maneira mais sincera possível, que não prospere somente pela minha força e capacidade. Eu nada teria alcançado sem as pessoas aqui mencionadas. Por isso, obrigada Deus, por me dar as pessoas que me consertam e direcionam.

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo, amor e por sempre me apoiarem e nunca desistirem de me ensinar que a educação é o caminho para alcançar meus sonhos.

Gostaria de registrar minha gratidão ao professor Dr. Audalio Rebelo Torres Junior, que generosamente me orientou e, acima de tudo, contribuiu imensamente para minha trajetória de formação e amadurecimento. Sem o seu apoio e seu voto de confiança este trabalho não se concretizaria.

No decorrer do mestrado ouvi muitas vezes que “Existem duas maneiras de aprender: a primeira é por repetição e a segunda é por trauma”. Baseada nisso, agradeço ao professor Dr. Francisco José da Silva Dias pelos traumas. Obrigada também por me receber no LHiCEAI e por me mostrar que tipo de profissional eu quero ser, não só com palavras, mas também com atitudes.

À toda equipe de pesquisa atual do LHiCEAI: Vinicius Maciel, Vanessa Aroucha de Assis, Laila Leite, Jefferson Horley, Hugo Lima, Igor Hamid, Vivian Salles, Romulo Soares. De modo especial, à Vivian Salles e Rômulo Soares, pela cumplicidade, apoio, caronas, mapas e dramas vividos durante esse período.

À Júlio Cesar Martins Ribeiro Junior, que também faz parte da equipe de pesquisa do LHiCEAI, pelas piadas sem graça, e por trabalhar incansavelmente para melhorar o desempenho do modelo utilizado neste trabalho.

À Anderson Alves Dias e Luan Carlos Prado, pelas noites de vinhos, conversas sobre a vida e dilemas existenciais. Vocês são fundamentais na minha vida e no meu crescimento pessoal.

À Willmara Braga por me defender e proteger até em momentos que eu não percebo que preciso ser protegida.



À Walterly Saraiva, Tércia Freitas e Luanda Alves pelas conversas, risos, carinho, respeito e também pela grande amizade durante esses anos na Universidade, além do grande incentivo para a finalização desse mestrado.

Aos meus amigos e também irmãos Marthony Lacerda, Jhonnylson Costa e Allan Martins pelo carinho e incentivo.

À Monielle Alencar, Silvino Jardim e Paulo Menezes que mesmo não estando tão presentes nessa parte da minha caminhada acadêmica, sempre estão torcendo pelo meu sucesso, e mesmo com a distância não permitem que nossa amizade diminua.

À Universidade Federal do Maranhão, que através do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia possibilitou o meu crescimento profissional.

Agradeço aos professores participantes da banca examinadora que dividiram comigo este momento tão importante e esperado.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Maranhão (FAPEMA) pelo auxílio financeiro através da bolsa de mestrado concedida a mim (Edital BM-02605/2016), pelos auxílios individuais (Edital InfraEstrutura 03894/15; Edital Universal - 00112/16) e institucionais (PRONEM – Processo: 00079/16). Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio individual (Edital Universal Processo: 471924/2013-0) concedidos à Francisco José da Silva Dias.

No mais, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.



“Há três formas de melhorarmos a nossa sabedoria: a primeira, por reflexão, que é a mais nobre; a segunda, por imitação, que é a mais fácil; a terceira, por experiência, que é a mais amarga.”

(Confúcio, sd)



SANTOS, Erlen Dairlane Vieira. Caracterização do padrão de ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento no Complexo Estuarino de São Marcos (MA). 2018. 69 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão.

Orientador: Audalio Rebelo Torres Junior

Linha de pesquisa: Dinâmica de Sistemas Costeiros e Oceânicos

RESUMO

O estudo do padrão das ondas superficiais tem se tornado muito relevante para muitos tipos de aplicações, devido a grande influência que elas têm na dinâmica de ambientes costeiros e em estruturas offshore, além de ser uma das mais relevantes formas de transporte de energia em ambientes litorâneos. Por se tratar de uma área de alta atividade portuária, o estudo do padrão de ondas no Complexo Estuarino de São Marcos é fundamental, visto que, o conhecimento dos possíveis impactos gerados pelas ondas reduziria eventuais gastos e contribuiria para um melhor planejamento do uso e ocupação da região costeira e portuária. O objetivo deste estudo é caracterizar o padrão de ondas de gravidade e superfície geradas pelos ventos no Complexo Estuarino de São Marcos. Através do uso de ADCP's foram realizadas medições das características das ondas. O modelo SW_LHiCEAI reproduziu o experimento de Berkhoff afim validar sua eficiência para propagação de onda. As maiores frequências dos dados observados apontaram uma maior incidência de ondas vindo das direções Noroeste, Norte e Nordeste. Porém, essa região tem ondas oriundas de todas as direções, que podem ser relacionadas à grande movimentação de navios que ocorre por causa da presença do complexo portuário existente no CESM. O Complexo Estuarino de São Marcos se apresentou bem dinâmico quanto ao comportamento das ondas. Isto ocorre devido a sua posição geográfica, presença de portos e configuração de fundo desta região que influenciam diretamente nas ondas.

Palavras chaves: Complexo Estuarino de São Marcos, SW_LHiCEAI, Ondas de gravidade.



SANTOS, E. D. V. Characterization of the surface wave pattern of gravity generated by the wind in the São Marcos Estuary Complex (MA). 69 f. Thesis (Master). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Federal University Maranhão, São Luís, Maranhão, Brazil, 2018.

Advisor: Dr. Audalio Rebelo Torres Junior

Line of research: Coastal and Oceanic Systems Dynamic.

ABSTRACT

The study of the behavior of surface waves has become very relevant for many types of applications due to their great influence on the dynamics of coastal environments and offshore structures, as well as being one of the most important forms of energy transport in coastal environments. Because it is an area of high port activity, the study of the wave pattern in the Estuarine Complex of São Marcos is fundamental, since the knowledge of the possible impacts generated by the waves would reduce possible expenses and contribute to a better planning of the use and occupation of the coastal and port region. The objective of this study is to characterize the surface and gravity waves generated by the winds in the São Marcos Estuarine Complex. Through the use of ADCP's measurements were made of wave characteristics. The SW_LHiCEAI model simulated the Berkhoff experiment in order to validate its efficiency for wave propagation. The higher frequencies of the observed data indicated a higher incidence of waves coming from the Northwest, North and Northeast directions. However, this region has waves coming from all directions, which can be related to the large movement of ships that occurs because of the presence of the existing port complex in the CESM. The estuarine complex of São Marcos presented a very dynamic behavior regarding the waves. This is due to its geographical position, port presence and background configuration of this region that directly influence the waves.

Keywords: Estuarine Complex of São Marcos, SW_LHiCEAI, Gravity waves.



LISTA DE SÍMBOLOS

a	<i>Amplitude</i>
C	<i>Velocidade de fase da onda</i>
C_g	<i>Velocidade de grupo da onda</i>
d	<i>Profundidade local</i>
f	<i>Frequência</i>
g	<i>gravidade</i>
H	<i>Altura da onda</i>
k	<i>Número de onda</i>
L	<i>Comprimento de onda</i>
t	<i>Tempo</i>
T	<i>Período de onda</i>
w	<i>Velocidade Vertical</i>
x	<i>Coordenada horizontal zonal</i>
y	<i>Coordenada horizontal meridional</i>
z	<i>Coordenada Vertical</i>
ϕ	<i>Potencial de velocidade</i>
η	<i>Elevação da superfície livre</i>
ρ	<i>Densidade da água</i>
θ	<i>Direção da componente espectral</i>
ω	<i>Frequência angular</i>
ε	<i>coeficiente horizontal de viscosidade</i>
U	<i>componente meridional de velocidades médias</i>
V	<i>componente zonal de velocidades médias</i>
f	<i>parâmetro de Coriolis</i>

Sumário

1. Introdução.....	12
2. Questão científica e objetivos.....	14
2.1. Objetivo geral	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. Ondas de gravidade de superfície.....	12
3.1. Definições	12
3.2. Ondas geradas por navios	14
3.3. Teoria linear de onda	14
3.4. Experimento Berkhoff.....	19
4. Área de estudo.	20
4.1. Complexo Estuarino de São Marcos.....	23
5. Métodos.....	25
5.1. Dados observados.....	25
5.2. O modelo SW_LHiCEAI.....	27
5.3. As equações governantes.....	27
5.4. Avaliação do desempenho do modelo	29
6. Resultados e discussão.....	30
6.1. Caso controle	30
6.2. Simulação do SW_LHiCEAI para ondas geradas pelo ferryboat	31
6.3. Dados observados de ondas na região	33
6.3.1. Grupo 1.....	33
6.3.2. Grupo 2.....	38
6.3.3. Grupo 3.....	48
7. Conclusões e recomendações.....	61
8. Bibliografia	62

1. Introdução

Existem diversos tipos de ondas no oceano, dentre elas, as ondas de gravidade e superfície geradas pelo vento, que são o assunto principal deste estudo. Este trabalho descreve as transformações sofridas por essas ondas ao se propagarem sobre a plataforma continental, em decorrência de diversos processos físicos, avaliando o padrão de ondas para o ano de 2012 a partir de dados observados e modelagem computacional.

O estudo do comportamento das ondas superficiais tem se tornado muito relevante para muitos tipos de aplicações, devido a grande influência que elas têm na dinâmica de ambientes costeiros e em estruturas offshore, além de ser uma das mais relevantes formas de transporte de energia em ambientes litorâneos (MEIRELLES, 2007).

Nos últimos 15 anos, houve um aumento significativo no monitoramento de ondas no litoral brasileiro devido a grande importância que elas exercem para a navegação, pesca, aplicações militares e engenharias naval e costeira. Vários autores estudaram o padrão de ondas ao longo da zona costeira do Brasil (INNOCENTINI et al. (2005), CARVALHO (2010), SEMEDO et al. (2011), ALMEIDA et al. (2014)) a fim de entender melhor o clima de ondas.

Desde a geração até a dissipação, as ondas sofrem várias transformações quando se propagam em águas rasas. Durante a sua propagação pela plataforma continental, as ondas sofrem uma série de efeitos que modificam significativamente alguns de seus parâmetros em águas profundas (MEIRELLES, 2007), dentre esses efeitos podem ser citados empinamento, refração, difração, reflexão, fricção junto ao fundo, interação onda-onda, entre outros.

Esta área de estudo foi escolhida devido à disponibilidade de medições de ondas, inéditas na região, feitas a partir de ADCP's (*Acoustic Doppler Current Profiler*) instalados próximos ao complexo portuário de São Luís, porém, tem como motivação principal o estudo do padrão de ondas de gravidade e superfície geradas pelo vento no Complexo Estuarino de São Marcos.

No capítulo 2 há uma breve discussão sobre ondas de gravidade de superfície. Os objetivos gerais e específicos são abordados no capítulo 3. No capítulo 4 descrito os métodos adotados no trabalho, os dados observados, o modelo numérico utilizado



para reproduzir as ondas geradas pelo *ferryboat* e o método utilizado para avaliar o modelo utilizando o experimento de Berkhoff.

No capítulo 5 é descrito os resultados e discussões dos dados observados na região interior do Complexo Estuarino de São Marcos, próximas às estruturas portuárias e de tráfico de embarcação; a avaliação do modelo e a reprodução realizada a partir da aplicação do modelo na área de estudo. A conclusão do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros estão descritas nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

2. Questão científica e objetivos

Ondas de gravidade de superfície concentram a maior parte da energia oriundas do oceano. O monitoramento de ondas tem grande importância pois elas têm grande influência na navegação, pesca, aplicações militares e engenharias naval e costeira.

O estudo e aplicação de métodos de geração de energia alternativa a partir das ondas está em expansão tanto no Brasil quanto no mundo e projetos voltados para essa área só é possível através do estudo do padrão das ondas oceânicas para determinação de regiões que têm um maior potencial energético.

Além disso, a partir do estudo do padrão das ondas é possível saber como as ondas estão interagindo com as estruturas de engenharias naval e costeira, e analisar a dinâmica litorânea.

2.1. Objetivo geral

Caracterização do padrão de ondas de gravidade de superfície na região do Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) para o ano de 2012.

2.2. Objetivos específicos

- Realização de um levantamento de dados de ondas observados para a região;
- Classificação das ondas de acordo com a altura significativa, período de pico e direção;
- Análise do padrão das ondas de gravidade de superfície na área de estudo;
- Avaliação do modelo SW_LHiCEAI utilizando o experimento de Berkhoff;
- Utilização do modelo SW_LHiCEAI para modelar ondas geradas pelo *ferryboat*.

3. Ondas de gravidade de superfície

Para interpretar os dados e resultados do modelo é necessário compreender como as ondas são geradas e se propagam. Deste modo, neste capítulo são definidas as características das ondas oceânicas; ondas geradas por navios; a teoria linear de ondas; e o experimento Berkhoff, utilizado para avaliar o modelo SW_LHiCEAI.

3.1. Definições

Ondas superficiais de gravidade no oceano podem ser definidas como uma perturbação periódica que se propaga na superfície livre de um fluido e são resultado de forças agindo no fluido. As forças naturais geradoras e restauradoras são a pressão ou tensão da atmosfera, terremotos, gravidade da terra e de corpos celestes, tensão superficial e força de Coriolis (WMO, 1998).

Na Figura 1 estão representadas alguns das definições mais importantes das ondas aquáticas.

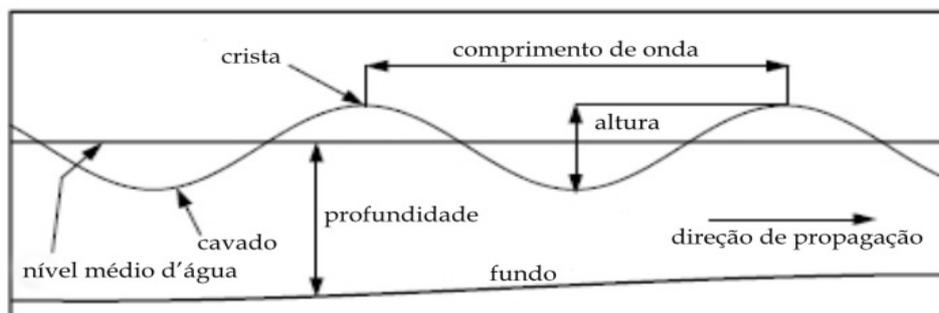


Figura 1. Características do trem de ondas. [Fonte: MEIRELLES, 2007].

A crista e o cavado são o deslocamento máximo da superfície livre acima e abaixo do nível do médio, respectivamente. A altura da onda (H) é a distância vertical entre a crista e o cavado, a amplitude da onda (a) equivale a metade da altura e o comprimento da onda (L) é distância horizontal entre duas cristas ou dois cavados sucessivos.

O conceito de altura significativa de onda (H_s), foi originalmente definido como sendo a média da terça parte das ondas com maior altura registrada durante o tempo considerado. Este conceito foi elaborado como forma de traduzir matematicamente esse importante parâmetro da onda (Munk, 1944).

A superfície da água do mar é irregular, e pode ser decomposta em vários números de componente sinusoidais simples com diferentes frequências, diferentes

direções de propagação e diferentes amplitudes, onde a distribuição de energia de ondas entre esses componentes é chamada de espectro de onda. A altura significativa de onda é determinada a partir deste espectro de onda.

O período de onda (T) é o intervalo de tempo (segundos) entre a passagem duas cristas sucessivas por um ponto fixo e a frequência (f) é o número de cristas que passam um ponto fixo em um determinado intervalo de tempo (*Hertz* ou segundos) e pode ser expresso como:

$$f = 1/T \tag{I}$$

Desse modo, quanto maior o período de onda menor será a sua frequência.

As características das ondas dependem das forças geradoras e restauradoras. Conhecendo essas forças é possível classificar o padrão das ondas (comprimento, período, altura significativa). Na figura 2, a seguir, é representada a classificação das ondas de superfície de acordo com o seu período.

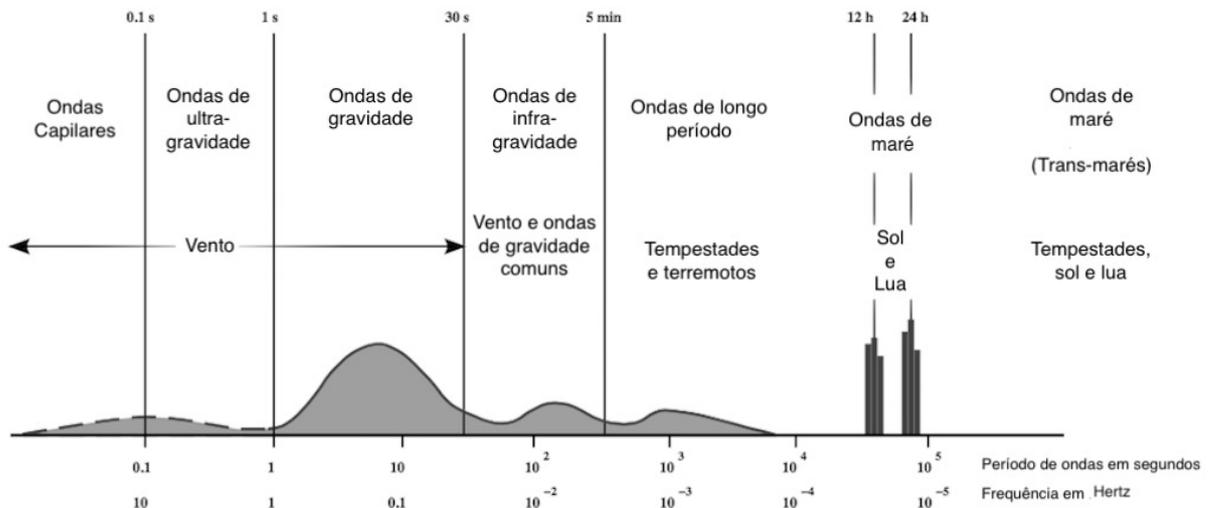


Figura 2. Classificação das ondas do oceano por período de onda [Fonte: adaptado de Munk, 1951].

As ondas de superfície são classificadas em ondas capilares, ondas de ultra gravidade, ondas de gravidade, ondas de maré e ondas planetárias. As ondas capilares têm períodos (<0,1 segundos) e dimensões curtas, alta frequência, são geradas pelo vento e sua força restauradora é a tensão superficial. Ondas de ultra-gravidade são a transição entre as ondas capilares e as ondas de gravidade, tendo como forças restauradoras a gravidade e tensão superficial (períodos de 0,1 a 1 segundo). Ondas de gravidade, onde se concentra a maior parte da energia das ondas, têm períodos mais longos, são geradas pelo vento e sua força restauradora é

a gravidade. Ondas de infra-gravidade são geradas por ventos e ondas de gravidade (interação onda-onda, ondas aprisionadas) e têm períodos mais longos. Ondas de maré são ligadas à atração gravitacional do Sol e da Lua, com períodos muito longos (12 a 24 horas).

3.2. Ondas geradas por navios

Ondas geradas por navios são classificadas como ondas de Kelvin, têm características e comportamentos bem distintos quando comparadas com ondas geradas por ventos. Suas direções de propagação, altura significativa e período de pico (2,2 a 5 segundos, aproximadamente) variam de acordo com a orientação, distância percorrida, velocidade e tamanho da embarcação e a sua duração é limitada, além de haver múltiplos picos de energia em sua composição (CHWANG, 2003).

Em uma região onde há grande movimentação de navios de forma aleatória (varias embarcações viajando em direções e velocidades variadas), formam um forte sistema de ondas independentes e irregulares que podem atingir até 1,5 metros de altura em relação ao nível médio do mar, devido à sobreposição das ondas (CHWANG, 2003).

3.3. Teoria linear de onda

A teoria linear de ondas é amplamente utilizada para descrever o comportamento das ondas de gravidade de superfície, pois considera que os componentes das ondas são harmônicos e independentes, portanto as ondas são lineares e harmônicas.

A teoria linear das ondas superficiais de gravidade foi desenvolvida inicialmente por Airy em 1841. Airy desconsiderou qualquer forçante que pudesse atuar no caso mais elementar da propagação do campo de ondas. Apesar das simplificações impostas, a teoria linear de ondas tem uma extensa gama de aplicações.

A teoria considera que:

- O fluido é homogêneo, incompressível e irrotacional, deste modo, é permitida a existência do potencial de velocidade;
- A tensão superficial do fluido é desprezada;
- O fluido é invíscido;
- A pressão na superfície livre é uniforme e constante, deste modo,

podemos afirmar que não existe variações do campo de pressão na interface ar-água;

- A forma da onda não varia no tempo nem no espaço (forma sinusoidal);
- A amplitude da onda é constante e pequena em relação ao comprimento e à profundidade;
- As ondas se propagam em uma direção no plano bidimensional x (coordenada horizontal), z (coordenada vertical).
- O fundo é um limite plano, fixo, horizontal e impermeável, o que indica que a velocidade vertical junto ao fundo é nula.

A partir dessas características, a formulação da teoria linear de ondas pode ser escrita a partir da equação II, que representa a equação de continuidade escrita em função do potencial de velocidade (Equação de Laplace).

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (\text{II})$$

Onde $\phi(x, z, t)$ representa o potencial de velocidade, x é a coordenada horizontal, z é a coordenada vertical e t é o tempo.

Para condição de contorno dinâmica tem-se a equação de Bernoulli na forma linearizada, que também é expressa em termos do potencial de velocidade.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad \text{para } z = 0, \quad \text{onde } 0 \text{ é a superfície.} \quad (\text{III})$$

Isto pode ser aplicado pois a pressão na superfície livre foi considerada constante e nula. Na equação (III), g (m/s) equivale a gravidade, η (m/s) é a elevação da superfície livre e t (s) é o tempo. Já a condição de contorno cinemática garante que não há transporte do fluido através da superfície livre, assim a velocidade vertical do fluido é igual a velocidade vertical da superfície livre e é representada por:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad \text{para } z = 0, \quad \text{onde } 0 \text{ é a superfície.} \quad (\text{IV})$$

Como a teoria linear assume que a velocidade vertical junto ao fundo é nula, ou seja, não tem fluxo na interface água-substrato, a condição de contorno cinemática no fundo pode ser descrita como:

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad \text{para } z = -d, \quad \text{onde } -d \text{ é o fundo.} \quad (\text{V})$$

Onde w (m/s) representa a velocidade vertical (direção vertical).

As condições de contorno espacial baseiam-se na periodicidade temporal e espacial e na propagação da onda no eixo x e é escrita como:

$$\phi(x, t) = \phi(x + L, t) \tag{VI}$$

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T) \tag{VII}$$

Onde L (m) é o comprimento de onda e T (s) é o período de pico.

A figura 3 representa, em resumo, a formulação da teoria linear com todas as condições de contorno. Na adaptação de Dean e Dalrymple, a equação de Bernoulli aparecem os termos p (N/m²) e ρ (kg/m³) que representam a pressão e a densidade da água, respectivamente.

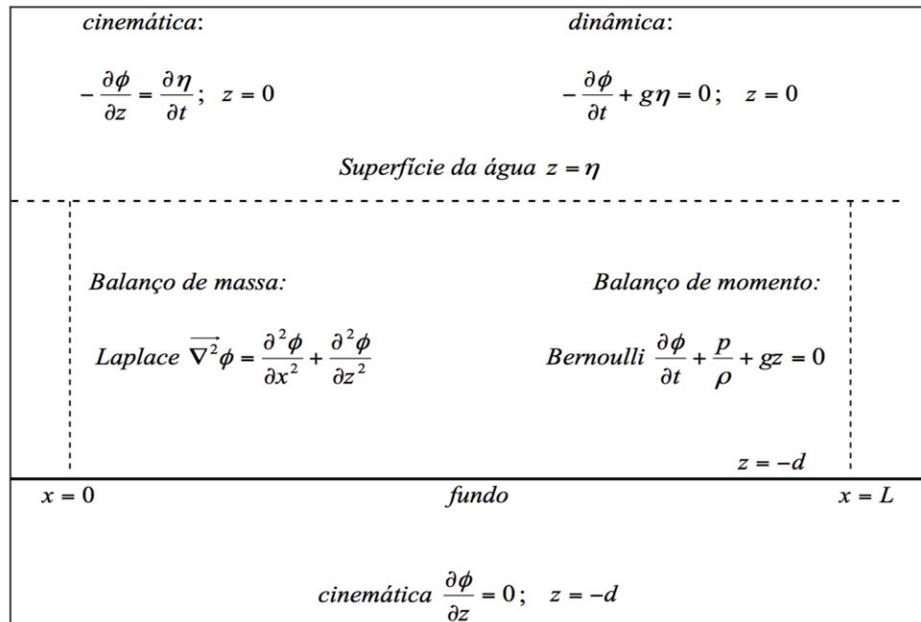


Figura 3. Princípios da teoria linear com as condições de contorno cinética, dinâmica e lateral e suas formulações. [Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple, 1984].

Através da solução das equações acima é possível obter a expressão que representa o potencial de velocidade:

$$\phi(x, z, t) = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t), \tag{VIII}$$

Onde:

$a = H/2$ a (m) é amplitude e H é a altura da onda

$\omega = 2\pi/T$ ω (s⁻¹) é a frequência angular e T é o período

$k = 2\pi/L$ Número de ondas (m⁻¹)

$d(m)$ Profundidade local

A relação entre o número de ondas (k), profundidade local (d) e a frequência angular (ω) é chamada de relação de dispersão e pode ser expressa como:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \tag{IX}$$

A elevação da superfície livre é dada por:

$$\eta = a \sin(kx - \omega t) \quad (\text{X})$$

Utilizando as formulações anteriores é possível escrever a celeridade (*m/s*) de fase da onda como:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (\text{XI})$$

também pode ser expressa como

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd) \quad (\text{XII})$$

A celeridade (*m/s*) de cada onda individual é chamada de velocidade de fase e um conjunto de ondas se deslocando é denominada como velocidade de grupo que é expressa como:

$$C_g = \frac{1}{2} \left[\frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] C \quad (\text{XIII})$$

O oceano é composto em sua maioria por ondas dispersivas, ou seja, tem velocidade de fase e velocidade de grupo diferentes e independentes umas das outras, aparentando uma superfície caótica, com sobreposição de um número infinito de trens de ondas senoidais com diferentes características (altura, direção de propagação, velocidade...). A figura 4 ilustra a superfície do mar obtida pela soma de várias ondas senoidais.

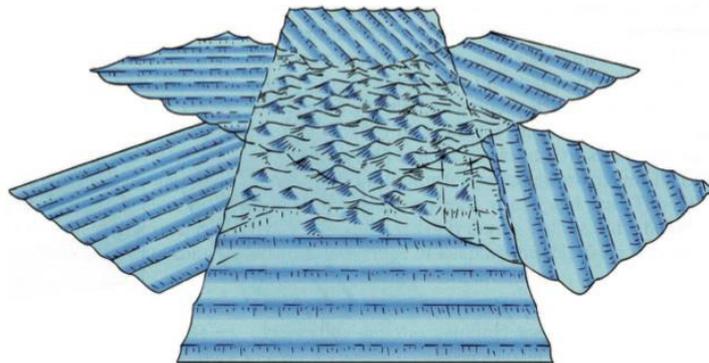


Figura 4. Superfície do mar resultante da sobreposição das ondas. [Fonte: Carmo, 2016].

Já em águas rasas, o comportamento das ondas muda. O pacote de ondas tem velocidade de fase e a velocidade de grupo das ondas são iguais, ou seja, as ondas não são dispersivas. Isso acontece porque quando as ondas chegam em águas rasas elas sofrem transformações devido à interação das ondas com o fundo, com correntes, pedras, recifes, entre outros obstáculos (WMO, 1998). Essas transformações têm mais influências sobre o fluido que os ventos locais, e são denominadas como refração, difração, reflexão e empinamento.

Essas transformações são definidas como se segue:

- Refração: mudança da velocidade da onda devido a variação no meio de propagação da mesma. Os principais fatores que causam a refração são as correntes e a influencia do fundo no fluido. A figura 5 ilustra alguns tipos de refração devido a influencia do fundo.

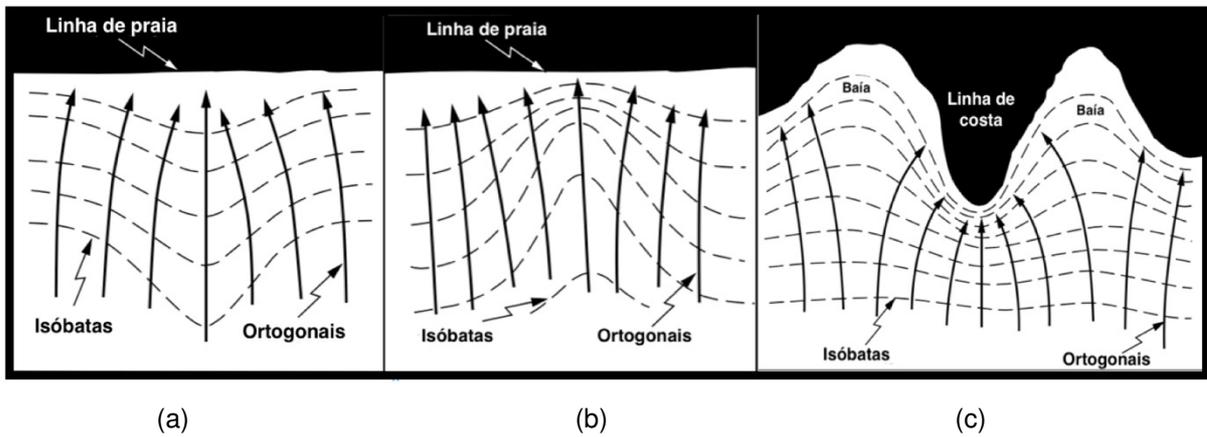


Figura 5. (a) Refração devido a uma crista submarina, (b) Refração devido a um canyon submarino, (c) Refração ao longo de uma linha de costa irregular. [Fonte: WMO, 1998].

- Difração: mudança da direção de propagação da onda e ocorre quando a onda encontra um obstáculo ou pela diferença de altura ao longo de uma mesma crista que faz com que a energia da onda seja distribuída lateralmente através da onda e por esse motivo se desloca perpendicular à direção de propagação dominante (GODOI, 2009). A figura 6 ilustra alguns tipos de difração que podem ocorrer.

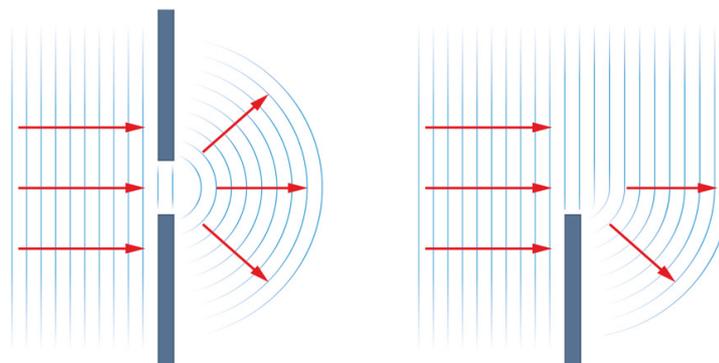


Figura 6. (a) difração de ondas encontrando com uma barreira com uma abertura estreita, (b) difração de ondas contornando o obstáculo [Fonte: <<http://physics.taskermilward.org.uk>>].

- Reflexão: Ocorre quando a ondas incidem sobre um obstáculo ou sobre a costa e nem toda a energia da onda é dissipada e a mesma retorna ao meio

de propagação. A figura 7 ilustra diferentes tipos de reflexão que podem ocorrer com as ondas oceânicas.

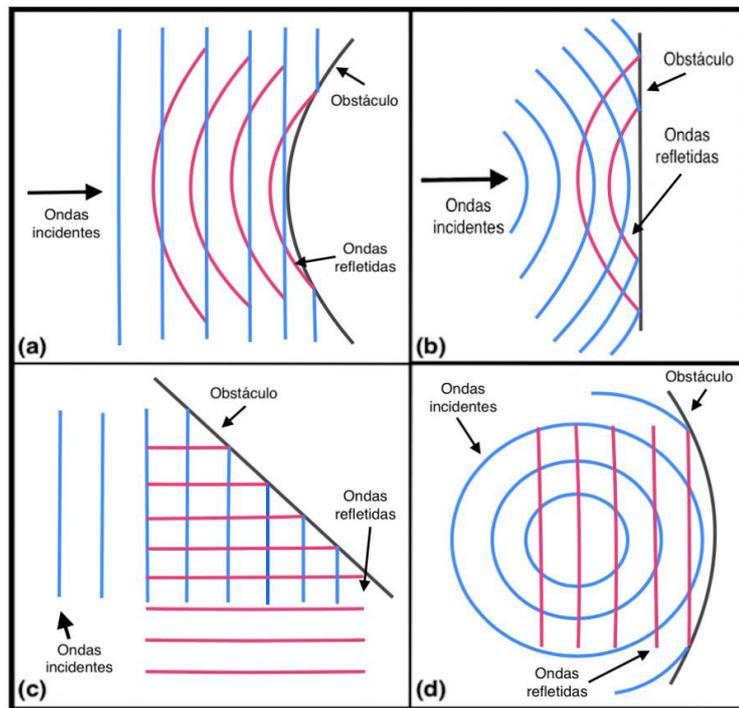


Figura 7. (a) reflexão de ondas “planas” de uma barreira convexa, (b) reflexão de ondas circulares em uma barreira plana, (c) reflexão de ondas paralelas a costa e (d) Reflexão de ondas circulares em uma barreira côncava. [Fonte: adaptado de <<http://www.schoolphysics.co.uk/>>].

- Empinamento: pode ser considerado um tipo de refração especial, pois ocorre devido a diminuição gradual da velocidade de propagação das ondas. É o encurtamento do comprimento da onda que gera um pequeno aumento na altura da onda (WMO, 1998). A figura 8 ilustra o efeito de empinamento das ondas.



Figura 8. Efeito do empinamento das ondas ocorrendo devido a profundidade do ambiente. [Fonte: adaptado de <<https://magicseaweed.com/Shoaling-and-Refraction-Article/325/>>].

3.4. Experimento Berkhoff

Berkhoff (1982) realizou um experimento, como parte de um projeto do programa de pesquisa do departamento de obras públicas do governo holandês, no

Waterloopkundig Laboratoriuim Delft Hydraulics Laboratory sobre pesquisas costeiras, com o objetivo de reproduzir, de forma esquemática, uma área costeira existente, que tem um fundo plano inclinado com a presença de uma ou duas calotas elípticas.

O experimento realizado por Berkhoff foi um modelo hidráulico em escala reduzida, de domínio tridimensional, com topografia plano-inclinada de gradiente 1:50, que vai se elevando a partir de uma topografia constante de 0.45m. Tinha um batedor de ondas de um lado, e do lado oposto, um banco de cascalho, representando uma praia, com o objetivo de absorver as ondas geradas. A figura 9 representa as características do tanque utilizado no experimento, ilustrando a área total do tanque, a área de coleta das medidas, o gerador de ondas e o banco de cascalho.

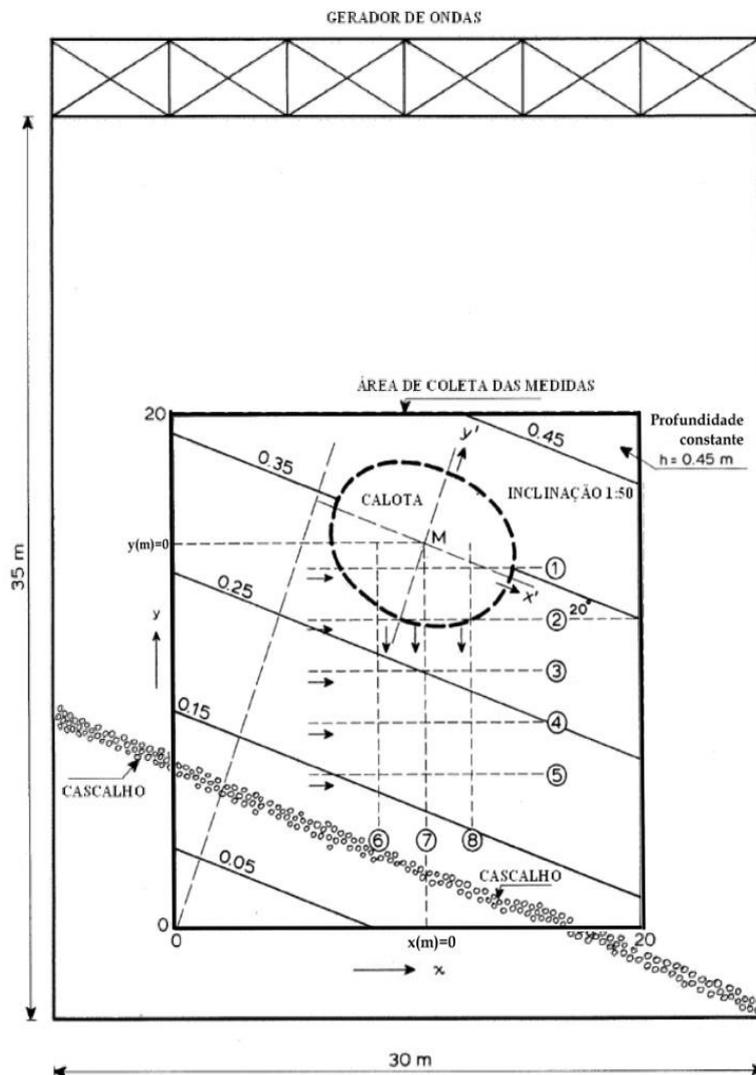


Figura 9. Tanque de medidas de Berkhoff [Fonte: adaptado de Berkhoff, 1982].

O objetivo do experimento foi observar o comportamento das ondas diante da presença da calota de poliéster (Figura 10) e da mudança de profundidade. Pôde-se analisar os fenômenos difração, refração e deformação da onda devido ao

empinamento.

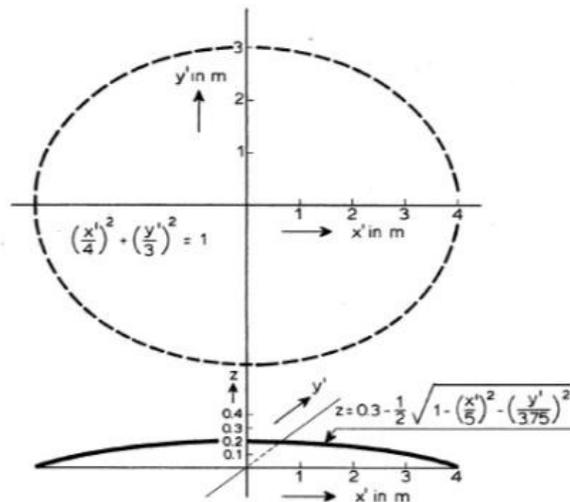


Figura 10. Características da calota de poliéster utilizada no experimento de Berkhoff. [Fonte: adaptado de Berkhoff, 1982].

Os dados do experimento eram rigorosamente controlados e analisados a partir de oito seções (ver Figura 9), onde cada uma dessas seções apresentava um padrão a ser observado:

- Na seção 1 notou-se os efeitos iniciais ligados ao ressalto hidráulico;
- As seções 2 e 3 eram as regiões de maior concentração de energia e a 3 também tinha as maiores amplitudes de ondas;
- As seções 4 e 5 são os locais onde a difração é mais importante e é onde a calota tem menos influencia;
- Na seção 6 notou-se um rápido decaimento na altura das ondas;
- Nas seções 7 e 8 foi possível notar que estas regiões se comportam focalizando energia e ocorre uma súbita elevação das ondas.

Os modelos computacionais utilizados neste experimento foram:

- Método de refração-difração completo, formulado por Berkhoff (1972, 1973, 1976);
- O método de aproximação parabólica da equação de refração-difração desenvolvido por Radder (1978, 1979);
- A aproximação de refração, negligenciando todos os efeitos de reflexão e difração.

O sistema de medidas utilizadas no experimento para medir a altura das ondas consistiu em uma fileira móvel com sensores que eram capazes de medir a altura das ondas, deste modo, registraram o movimento da superfície livre geradas pelo batedor

de ondas. Foram realizados seis testes com diferentes configurações. A tabela 1 descreve um resumo das características dos testes realizados.

Tabela 1. Características dos testes realizados durante o experimento de Berkhoff [Adaptado de Berkhoff, 1982]

	Configuração do modelo	Ondas	Profundidade da água na parte mais profunda do tanque	Altura significativa da onda na parte mais profunda do tanque	Período de pico da onda
T1	Somente inclinado	Regular	0,45 m	0,0474 m	1,00 s
T2	Somente inclinado	Irregular	0,45 m	0,0698 m	1,00 s
T3	Inclinado com 1 calota	Irregular	0,45 m	0,0462 m	1,00 s
T4	Inclinado com 1 calota	Regular	0,45 m	0,0464 m	1,00 s
T5	Inclinado com 2 calota	Regular	0,45 m	0,0485 m	1,00 s
T6	Inclinado com 2 calota	Irregular	0,45 m	0,0464 m	1,00 s

Os testes com características de ondas irregulares foram de pouca relevância pois os modelos computacionais utilizados são baseados em ondas harmônicas regulares. Porém os mesmos forneceram indicações sobre a influência da irregularidade das ondas na deformação da onda devido a configuração do fundo.

Foi dada uma atenção especial para o teste T4 (inclinação com uma calota), pois foi nessa configuração que os métodos computacionais foram aplicados, porque nesta a influência do fundo já é significativa. O T1 foi realizado no intuito de adquirir informações sobre os fenômenos de refração pura, porém a absorção de energia pelo banco de cascalho não foi totalmente eficiente, resultando em uma reflexão de 5% das alturas das ondas. Por causa dessa reflexão e erro nas medições (1%), o padrão da altura das ondas não foi identificado com tanta precisão quanto a direção de propagação das mesmas. O teste T5 mostrou pouca diferença em comparação com o campo de onda gerado no T4, deste modo, não ofereceram informações adicionais para o experimento. Os modelos aplicados no experimento apresentaram bons resultados quando comparados com as medidas realizadas.

4. Área de estudo

Neste capítulo é descrita a área de estudo, com o breve resumo da climatologia da região e suas particularidades.

4.1. Complexo Estuarino de São Marcos

A área do Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) faz parte de um conjunto de estuários e reentrâncias com aproximadamente 5.414 km² de manguezais (SOUZA FILHO, 2005). O CESM tem aproximadamente 3.000 km² de área, compreendendo desde a divisão do Rio Mearim pela Ilha dos Caranguejos até sua saída para a plataforma continental. A profundidade média da região é de 10 metros, podendo variar até profundidades maiores que 50 metros (SOARES, 2015).

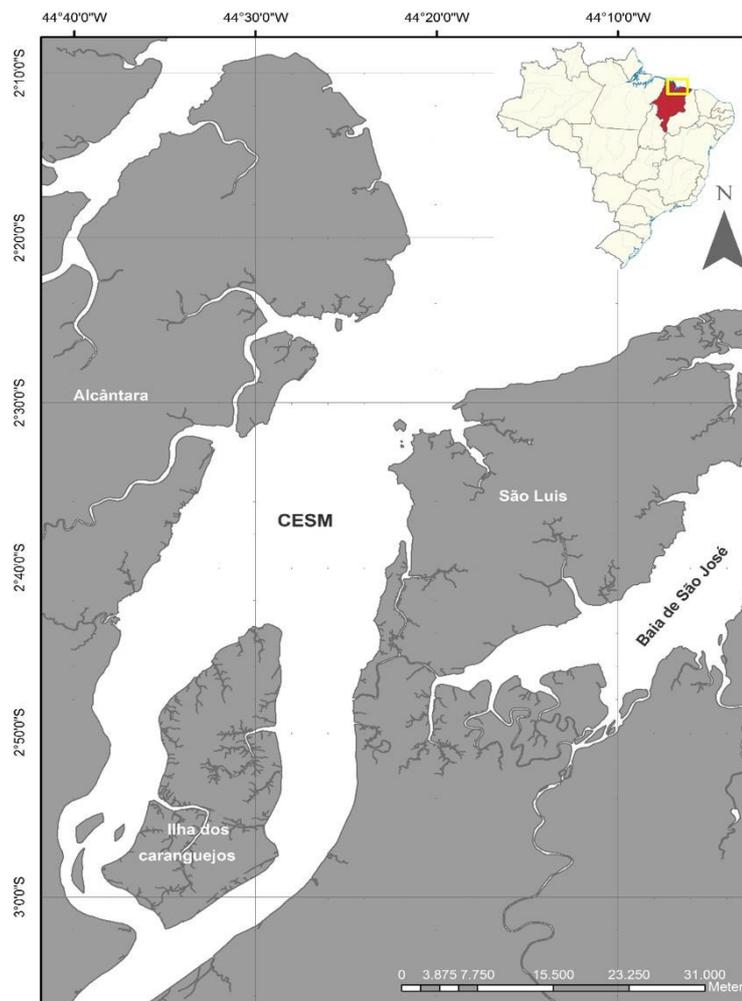


Figura 11. Complexo Estuarino de São Marcos.

O CESM tem uma região portuária com um dos maiores setores de exportação do mundo em termos de movimentação de carga (AMARAL et al., 2010). O complexo abrange três importantes estruturas de portos que são o Terminal Marítimo da Ponta

da Madeira (TPPM) que pertence a companhia VALE, O Porto do Itaqui da Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) e o Terminal Portuário privado da Alumar.

Além disso, a EMAP conta com um serviço de ferryboat, que é um barco de transporte regular (ocorre movimentação do ferryboat no terminal da Ponta da Madeira em um tempo estimado de meia hora - atracagem e desatracagem), destinado a travessia curta (Ponta da Madeira ao Porto do Cujupe), de passageiros e veículos.

Quanto aos aspectos meteorológicos, em condições normais, os ventos dessa região consistem nos alísios do Nordeste que convergem com os alísios de sudeste na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e seguem para oeste (Figura 12). A ZCIT migra meridionalmente ao longo do ano (cerca de 20°S a 25°N), ficando posicionada predominantemente no Hemisfério Norte nos meses de julho a dezembro e nos meses de janeiro a junho varia de Hemisfério de acordo com a região do globo, Para a região estudada, a posição da ZCIT varia de 5°S a 10°N (GRUBER, 1971).

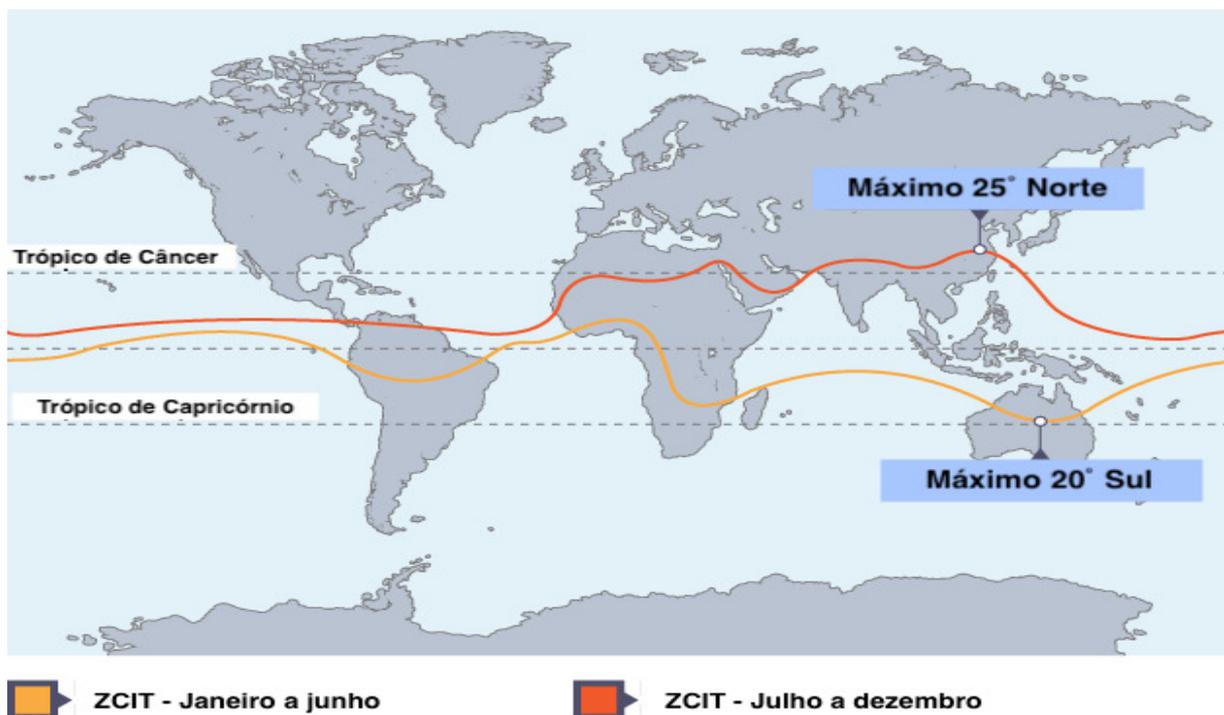


Figura 12. Posição da ZCIT durante o ano [Fonte: adaptado de < <http://www.bitsofscience.org>>].

A estação chuvosa na região corresponde aos meses de janeiro a junho, com máximo pluviométrico no mês de abril e a estação de estiagem ocorre nos meses de julho a dezembro com outubro o mês mais seco (Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, 2015). A regularidade da maré é semi-diurna, com maré alta máxima, na

região do Porto do Itaqui, de 6,5m e amplitude média de 2,9m (DILLENBURG et al., 2009).

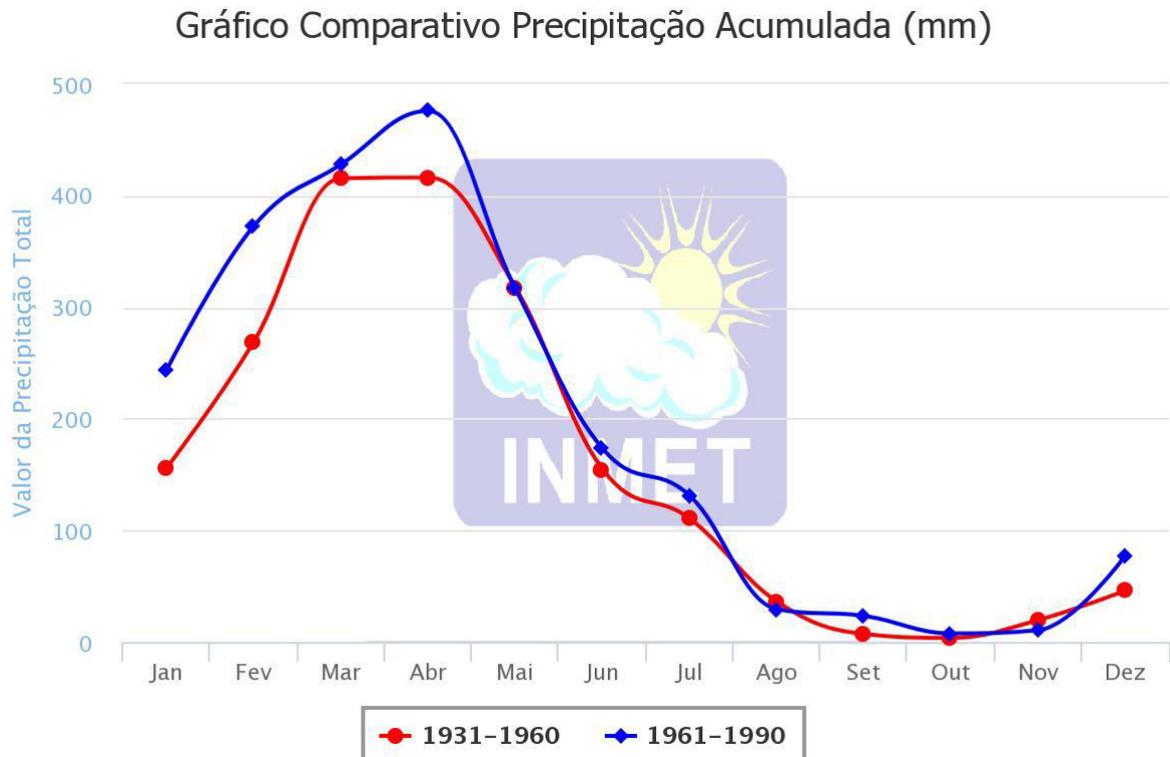


Figura 13. Precipitação acumulada da região de São Luís do Maranhão dos anos 1931 a 1990 [Fonte: <http://www.inmet.gov.br/porta1>].

5. Métodos

Neste capítulo são descritos os dados observados, detalhamento e avaliação do desempenho do modelo SW_LHiCEAI.

5.1. Dados observados

Os dados observados de ondas, utilizados neste trabalho, são de alguns pontos do CESH, do ano de 2012 e foram cedidos pela Empresa VALE S.A. e são oriundos de sete ADCP's (*Acoustic Doppler Current Profiler*). A posição dos equipamentos pode ser visualizada na figura 14. O espaçamento amostral dos dados observados é de 15 minutos e pudemos identificar a altura significativa, período de pico e direção de propagação de ondas.

Na fase de processamento, foi utilizado um software de interpretação de dados para tratamento dos mesmos, a fim de facilitar sua a explanação.

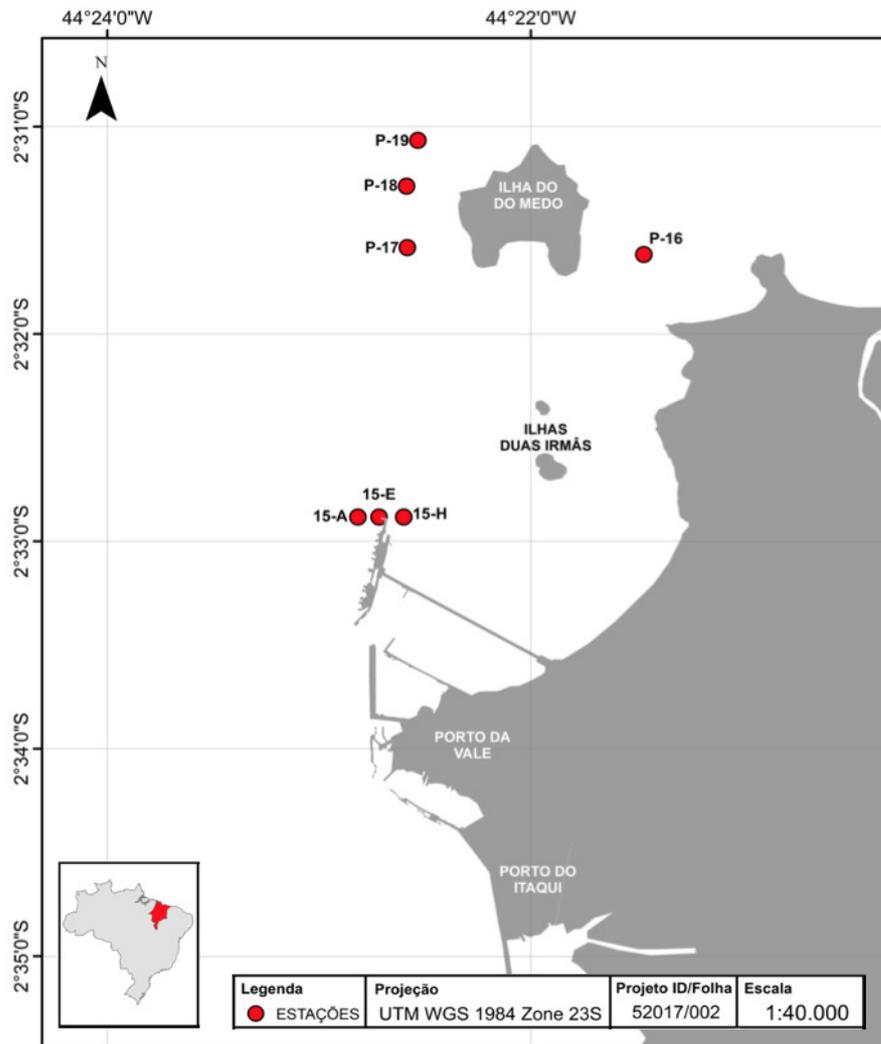


Figura 14. Localização dos pontos de coleta dos dados de onda observados.

Na tabela 2 estão descritos o período amostrado em cada ponto e suas respectivas coordenadas.

Tabela 2. Período amostrado dos dados de ondas por pontos com suas respectivas coordenadas.

PONTOS	PERÍODO AMOSTRADO – ANO 2012	COORDENADAS – UTM 23 SUL
15A	Setembro e outubro	9718531 N / 568893 L
15E	Abril e maio	9718531 N / 569093 L
15H	De fevereiro a dezembro	9718531 N / 569293 L
P16	Fevereiro, março, novembro e dezembro	9720688,40 N / 571385 L
P17	Fevereiro, março, novembro e dezembro	9720736,95N / 579326,70 L
P18	De janeiro a dezembro	9721285 N / 569320 L
P19	Fevereiro, março, novembro e dezembro	9721702,46 N / 569423,80 L

5.2. O modelo SW_LHiCEAI

O modelo hidrodinâmico foi desenvolvido pela a equipe de pesquisa do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI/UFMA), da Universidade Federal do Maranhão, e baseia-se, originalmente, na formulação proposta por Casulli e Cheng (1992).

O SW_LHiCEAI é um modelo barotrópico, bidimensional, de águas rasas com topografia variável e fricção de fundo e no topo. Que pode ser utilizado na modelagem do padrão de ondas quanto à sua propagação, refração, reflexão e dissipação na área do Complexo Estuarino de São Marcos.

A discretização foi realizada em diferenças finitas com Euler avançado no tempo e centrado no espaço. Para os termos advectivos utilizamos os esquemas de Leonard (1979), e um filtro de Asselin (1972) para soluções no tempo.

5.3. As equações governantes

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (\text{XVI})$$

As equações XVI a XVIII fornecem três equações diferenciais parciais em três variáveis $U(x,y,t)$, $V(x,y,t)$ e $\eta(x,y,t)$.

Equação da velocidade zonal:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \gamma_{\tau} \frac{(Ua-U)}{H} - g \frac{\sqrt{U^2+V^2}}{Cz^2H} U + fV \quad (\text{XVII})$$

Equação da velocidade meridional:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \gamma_{\tau} \frac{(Va-V)}{H} - g \frac{\sqrt{U^2+V^2}}{Cz^2H} V - fU \quad (\text{XVIII})$$

onde \mathbf{U} e \mathbf{V} são as componentes meridional e zonal de velocidades médias, respectivamente, em relação à profundidade, η é a elevação da superfície livre do fluido, g é a constante gravitacional, t é o tempo, ε é o coeficiente horizontal de viscosidade, H é a coluna d'água representada por $H = \eta + h$ (h é a profundidade), e f é o parâmetro de Coriolis. Deste modo temos:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{(\eta+h)\partial(U)}{\partial x} + \frac{U\partial(\eta)}{\partial x} + \frac{U\partial(h)}{\partial x} + \frac{(\eta+h)\partial(V)}{\partial y} + \frac{V\partial(\eta)}{\partial y} + \frac{V\partial(h)}{\partial y} = 0 \quad (\text{XIX})$$

Para a simplificação das equações de águas rasas primitivas em três direções é necessário assumir que a coluna d'água seja bem misturada e com uma razão de aspecto baixa (Casulli e Cheng,1992).

A integração vertical da coluna d'água requer a representação das condições de superfície e fundo para substituir a variação vertical da velocidade do fluido no termo de viscosidade difusiva. Para tal, é necessário um coeficiente de cisalhamento do vento (γ_T), e velocidades meridionais e zonais do vento (Ua , Va). Assim a condição de fricção na superfície é definida como:

$$v \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_T (Ua - U), \quad (XX)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma_T (Va - V) \quad (XXI)$$

A condição de fricção de fundo é dada de acordo com a fórmula de Manning-Chezy (Casulli e Cheng,1992; Casulli, 1999):

$$v \frac{\partial u}{\partial z} = g \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{Cz^2 H} U, \quad (XXII)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial z} = g \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{Cz^2 H} V \quad (XXIII)$$

Cz representa o coeficiente de Chezy, v é o coeficiente de velocidade cinemática e z é a representação da direção vertical. No modelo SW_LHiCEAI, os termos de velocidade e elevação da superfície livre são representados de forma explícita e a representação do termo gravitacional nas equações de momentum e na divergência de velocidades na equação de continuidade são tratados de forma semi-implícitas.

A condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que define o passo de tempo a ser utilizado na simulação (leva em consideração a velocidade do eixo ortogonal de referencia, o tempo e a direção do fluxo), foi utilizada no fluxo das equações governantes para duração do passo de tempo do modelo afim de evitar erros de amostragem (Casulli, 1990; Casulli, e Cattani, 1994; Casulli e Cheng, 1992) tanto na a direção meridional quanto na direção zonal. Deste modo, temos:

$$CFL_x = U \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad CFL \leq 1 \quad (XXIV)$$

$$CFL_y = V \frac{\Delta t}{\Delta y}, \quad CFL \leq 1 \quad (XXV)$$

Para discretização das equações governantes do modelo SW_LHiCEAI foi utilizado o esquema de Euler avançado tempo e centrado no espaço obtido através da expansão da serie de Taylor, estimando as derivadas de primeira e segunda ordem, obtendo desta maneira as equações governantes descritas pelo método de diferenças finitas.

O esquema de Leonard foi utilizado para solução de mais alta ordem numérica dos termos de transporte advectivo nas equações de Navier-Stokes. Para as soluções no tempo, utilizamos um filtro gaussiano proposto por Asselin (1972), pois se trata de um excelente amortecedor para os modos computacionais que surgem nas integrações de tempo semi-implícitas centradas e implícitas centradas. A aplicação do filtro requer de pouquíssimo tempo de computação e é dado por:

$$\overline{\varphi_{i,j}^n} = \varphi_{i,j}^n + 0.5\nu[\varphi_{i,j}^{n-1} - 2\varphi_{i,j}^n + \varphi_{i,j}^{n+1}] \quad (\text{XXVI})$$

5.4. Avaliação do desempenho do modelo

Neste estudo, primeiramente, o modelo SW_LHiCEAI reproduziu o experimento de Berkhoff (1982) afim avaliar seu desempenho para propagação de onda em águas rasas. A avaliação do modelo consistiu na comparação dos resultados obtidos pelo modelo SW_LHiCEAI com os resultados obtidos por Berkhoff.

Na reprodução do experimento de Berkhoff, o modelo foi configurado para reproduzir a geometria do tanque, incluindo os detalhes do assoalho do mesmo. Utilizando o modelo SW_LHiCEAI, geramos um pulso de onda, que se propagou por toda a área, demonstrando os efeitos de difração e refração que ocorre como resposta do meio em que a onda estar se propagando.

6. Resultados e discussão

6.1. Caso controle

O caso controle foi proposto para avaliar o desempenho do modelo SW_LHiCEAI, a partir dos resultados das medições conduzidas por Berkhoff (1982), que vem sendo utilizado extensivamente para testar a exatidão de diversos modelos.

As ondas geradas por Berkhoff possuíam apenas uma direção, um período e uma altura. Para representar bem esse comportamento, na aplicação do modelo SW_LHiCEAI, optou-se por utilizar apenas um pulso de onda com as mesmas características do experimento delineado por Berkhoff.

Para avaliar o efeito de empinamento e refração, propagou-se a onda pela batimetria plano inclinada de gradiente 1:50, com 45° de inclinação em relação as linhas isobatimétricas.

Os resultados obtidos com o modelo mostram como a onda varia a sua altura em virtude da diminuição da profundidade como representado na figura 15. Para este cenário, o modelo teve um comportamento de propagação similar de ao experimento delineado por Berkhoff.

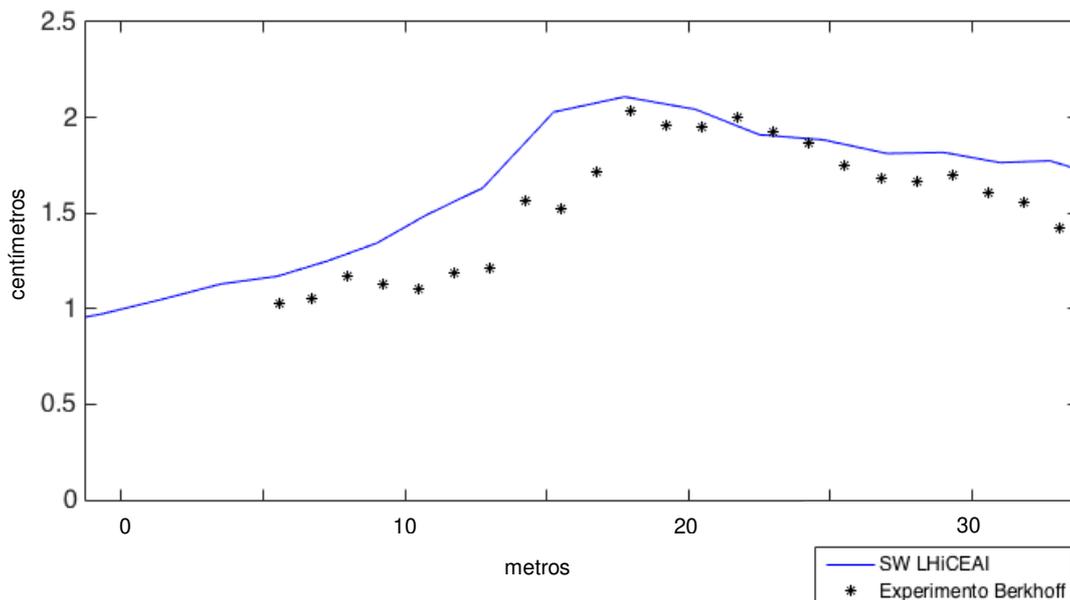


Figura 15. Dados experimentais obtidos por Berkhoff et al. (1982) comparados com os resultados computados com o modelo SW_LHiCEAI.

Na região onde a energia é focalizada (centro da calota), os resultados previstos pelo modelo SW_LHiCEAI (Figura 15) representou de maneira satisfatória o rápido crescimento da altura das ondas na região próxima à calota e a diminuição da altura a medida que a onda se aproxima de profundidades menores.

6.2. Simulação do SW_LHiCEAI para ondas geradas pelo *ferryboat*

Para a simulação das ondas geradas pelo *ferryboat*, utilizando o modelo SW_LHiCEAI, foi considerada uma balsa com aproximadamente 65m x 20m (medida aproximada dos *ferryboat* que trafegam na região do Complexo Estuarino de São Marcos – figura 16).

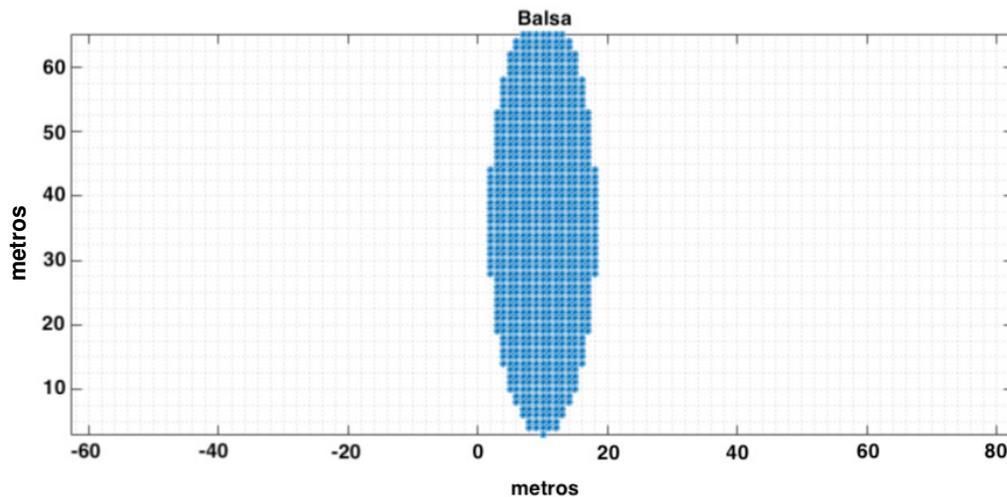


Figura 16. Representação esquemática do *ferryboat* utilizado no modelo.

Considerou-se uma corrente lateral composta de 1,2 m/s na direção U e 0,5 m/s na direção V, com o passo de tempo de 0,05 segundos e discretização de 1m x 1m, com profundidade média de 15 metros.

O modelo foi capaz de reproduzir de maneira satisfatória as características das ondas (direção de propagação, altura e período de pico) que são geradas por navios (*ferryboat*). A perturbação gerada segue o movimento do navio sem mudar a sua forma, confinada em uma região atrás do mesmo, e sempre tem uma forma em “V” (Figura 17).

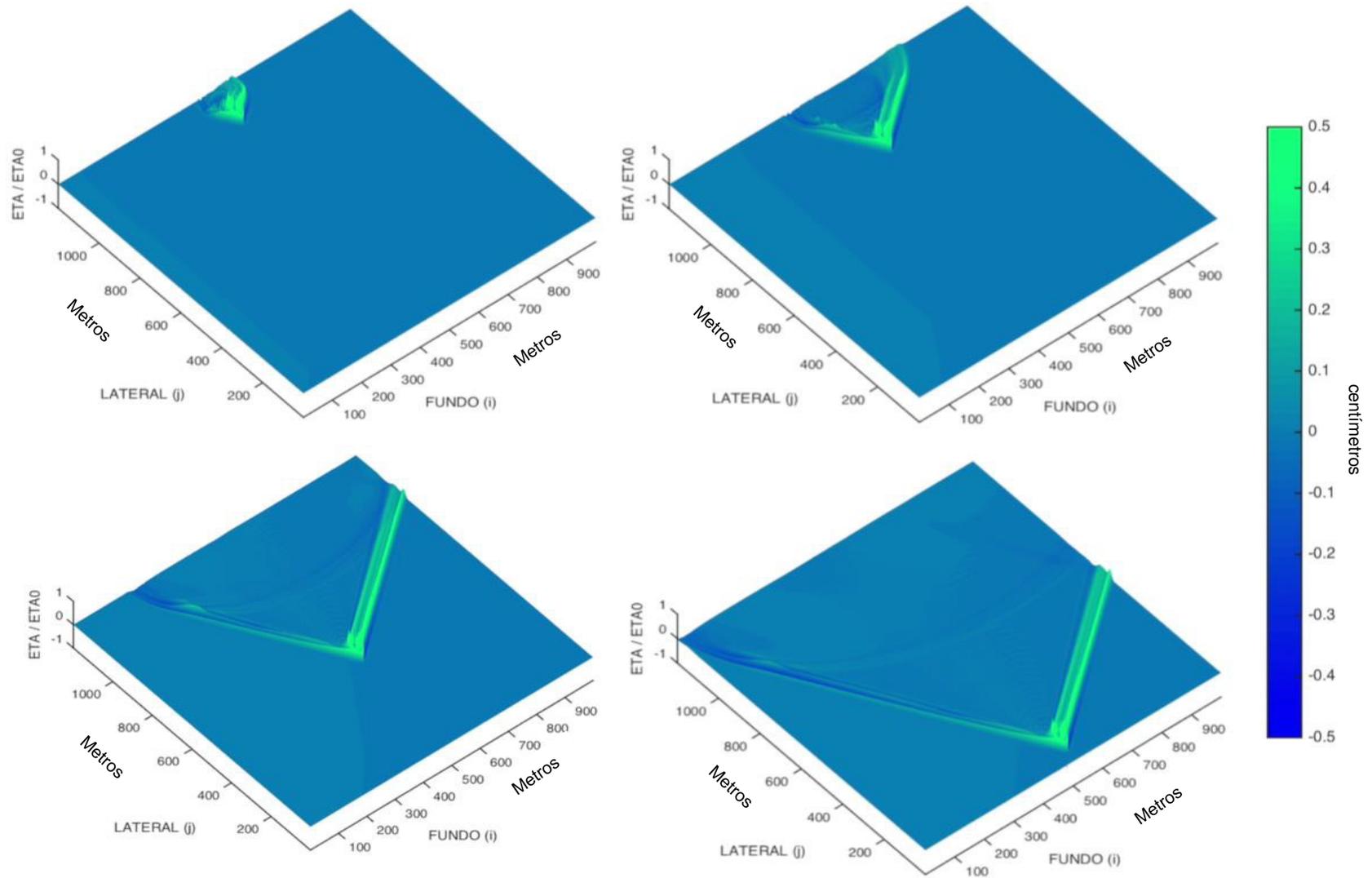


Figura 17. Padrão de onda do ferryboat geradas pelo modelo SW_LHiCEAI.

6.3. Dados observados de ondas na região

Os gráficos das figuras 18 a 42 destinam-se a fornecer uma visão geral do conjunto de dados obtidos durante todo o período amostrado pelos ADCP's. Para entender o conjunto de dados de forma mais eficaz optou-se por analisar os dados de ondas em três grupos distintos:

- **Grupo 1:** 15A, 15E e 15H - pois estão mais próximos da região portuária;
- **Grupo 2:** P16, P17, P18 e P19 - pois estão mais afastados da região portuária;
- **Grupo 3:** 15H e P18 – o conjunto mais completo de dados do ano de 2012.

6.3.1. Grupo 1

Como não dispomos de dados de ondas do ano todo dos pontos 15A e 15E, comparamos os mesmos com os dados do ponto 15H (banco de dados de fevereiro a dezembro) para período equivalente do ano.

As maiores frequências (Figura 18) dos dados observados apontaram uma maior incidência de ondas vindo das direções Noroeste, Norte e Nordeste (300° a 360° e de 0° a 50°). Porém essa região tem ondas oriundas de todas as direções, que podem ser relacionadas à grande movimentação de navios que ocorre por causa da presença do complexo portuário existente no CESM.

Os períodos de pico nesta região, em sua maioria, não foram superiores a 10 segundos (Figura 19) e as alturas significativas (H_s) das ondas (Figura 20), com maiores frequências menores que 0,5 metros. Deste modo, podemos supor que as ondas do CESM são geradas por ventos locais. Ondas que apresentaram um período de pico maior que 10 segundos e H_s maiores que 1m (um metro) podem ocorrer em função das interações onda-onda.

A figura 21 foi elaborada com o intuito de relacionar o período de pico e a direção das ondas. A mesma mostra, de forma mais clara, o comportamento das ondas no CESM e evidencia que a maior parte das ondas que tem um período de pico maior que 10 segundos são oriundas das regiões Sul e Sudeste e as mesmas podem ser relacionadas com a movimentação de navios.

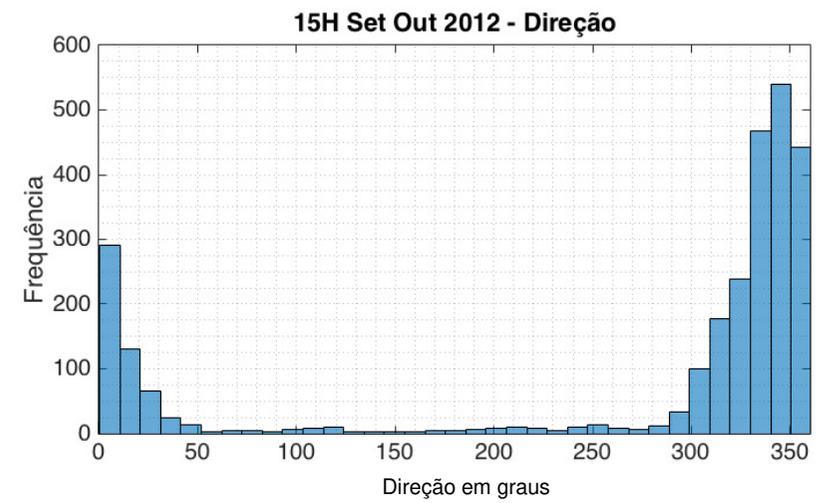
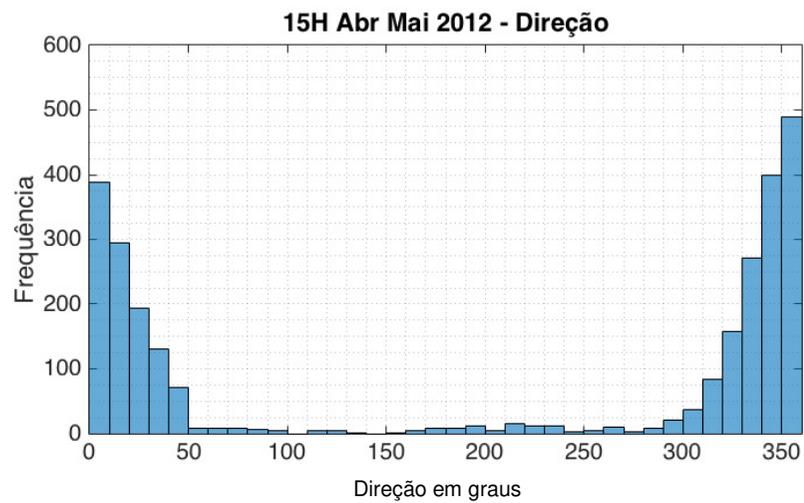
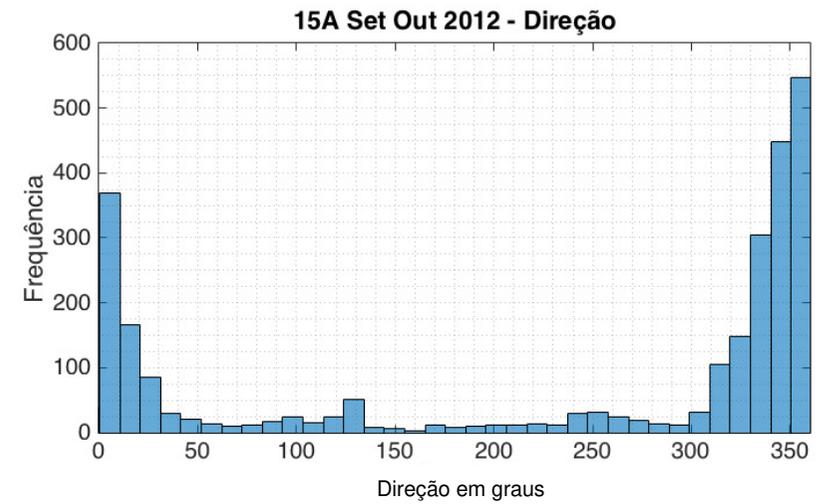
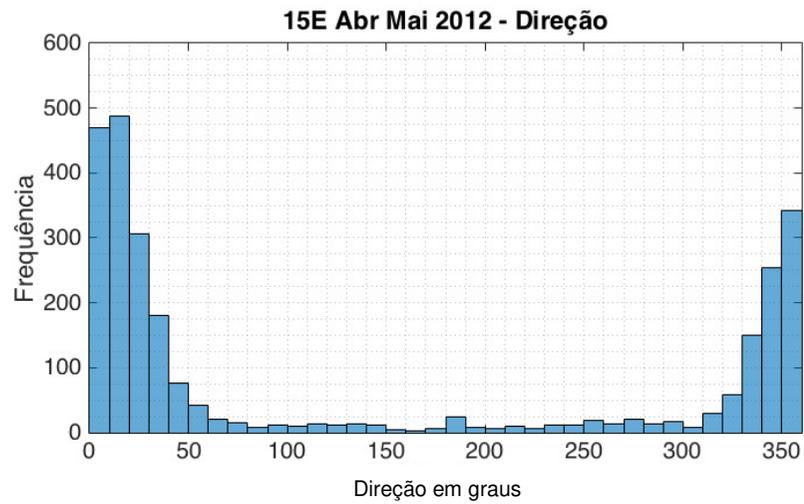


Figura 18. Direção das ondas nos pontos 15E (abril e maio de 2012), 15A (setembro e outubro de 2012) e 15H (abril, maio, setembro e outubro de 2012)

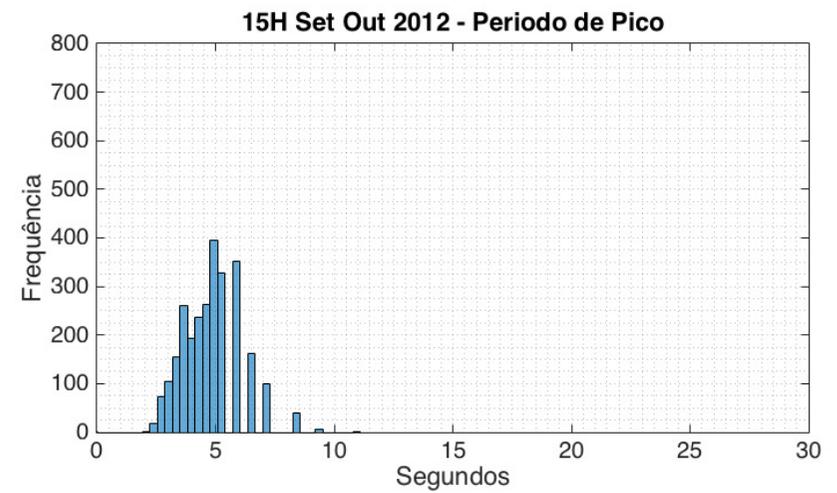
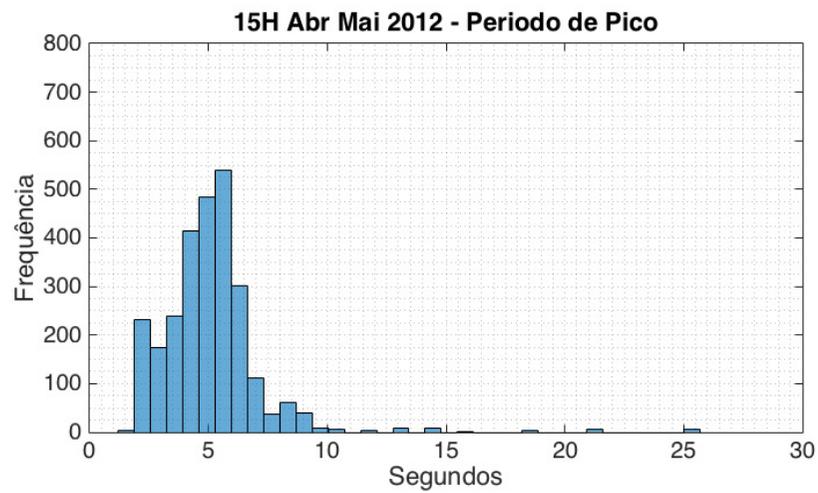
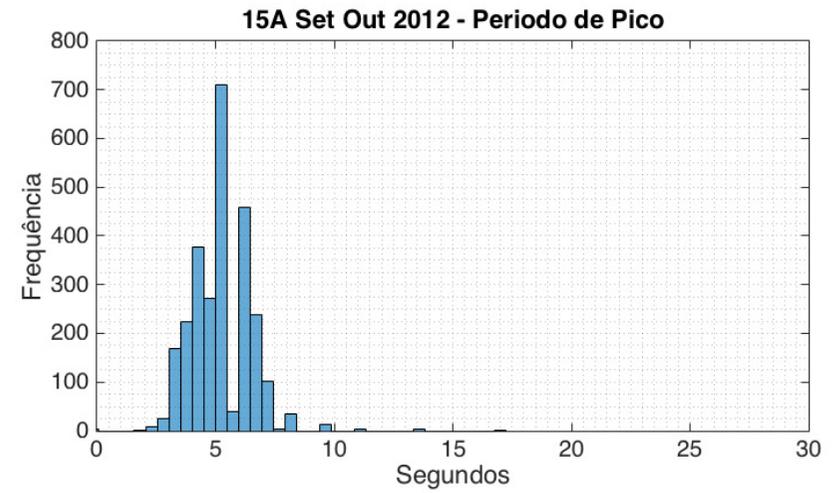
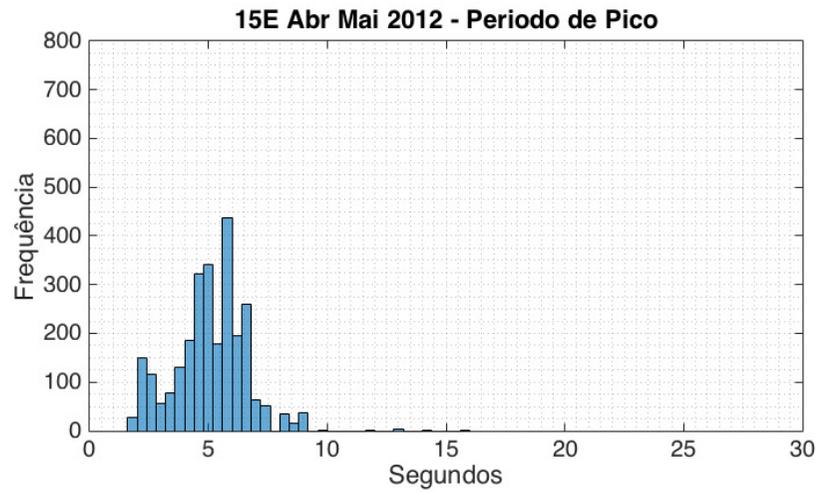


Figura 19. Período de pico das ondas nos pontos 15E (abril e maio de 2012), 15A (setembro e outubro de 2012) e 15H (abril, maio, setembro e outubro de 2012).

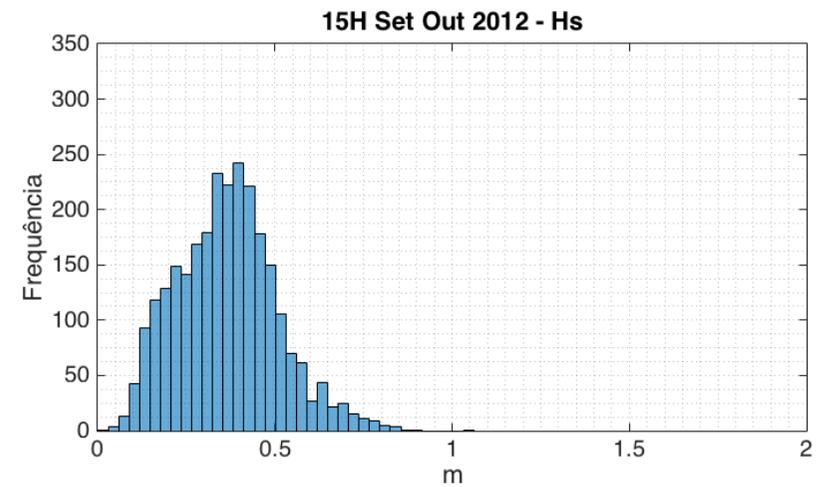
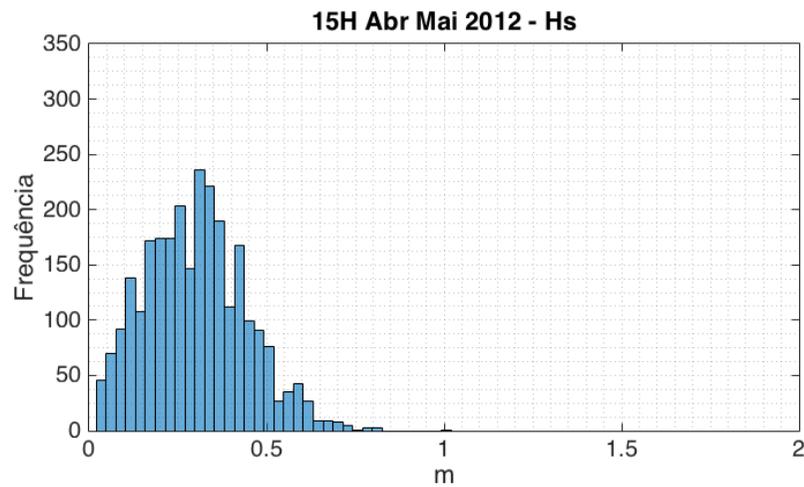
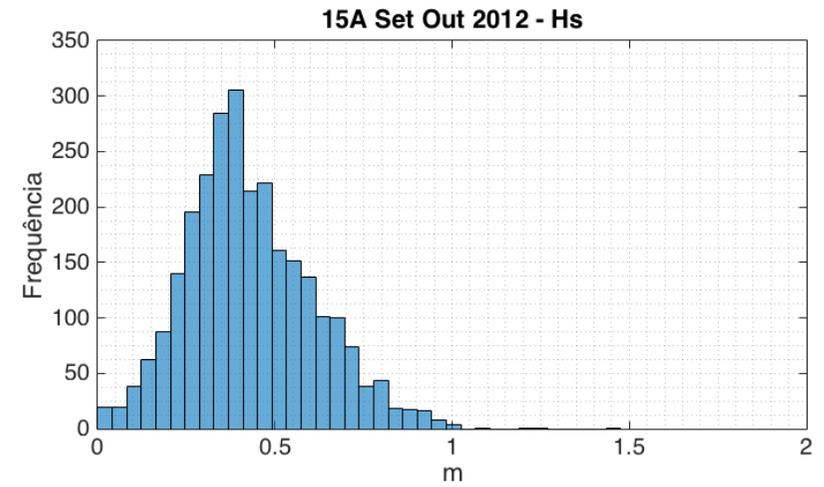
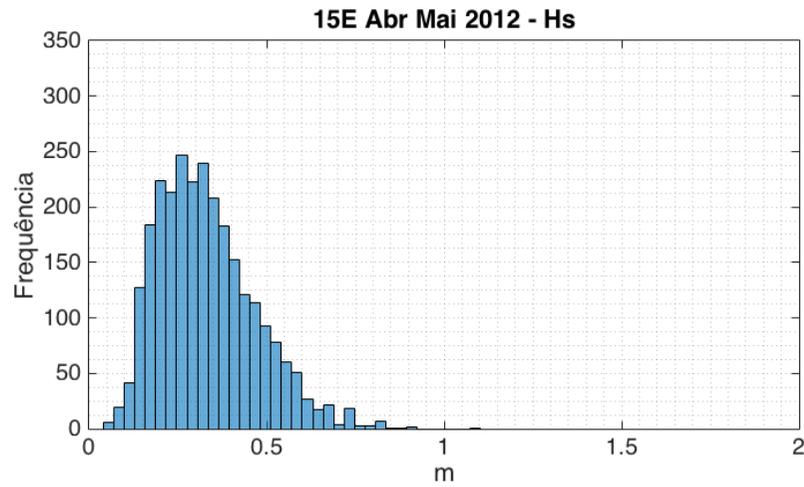


Figura 20. Altura significativa das ondas nos pontos 15E (abril e maio de 2012), 15A (setembro e outubro de 2012) e 15H (abril, maio, setembro e outubro de 2012)

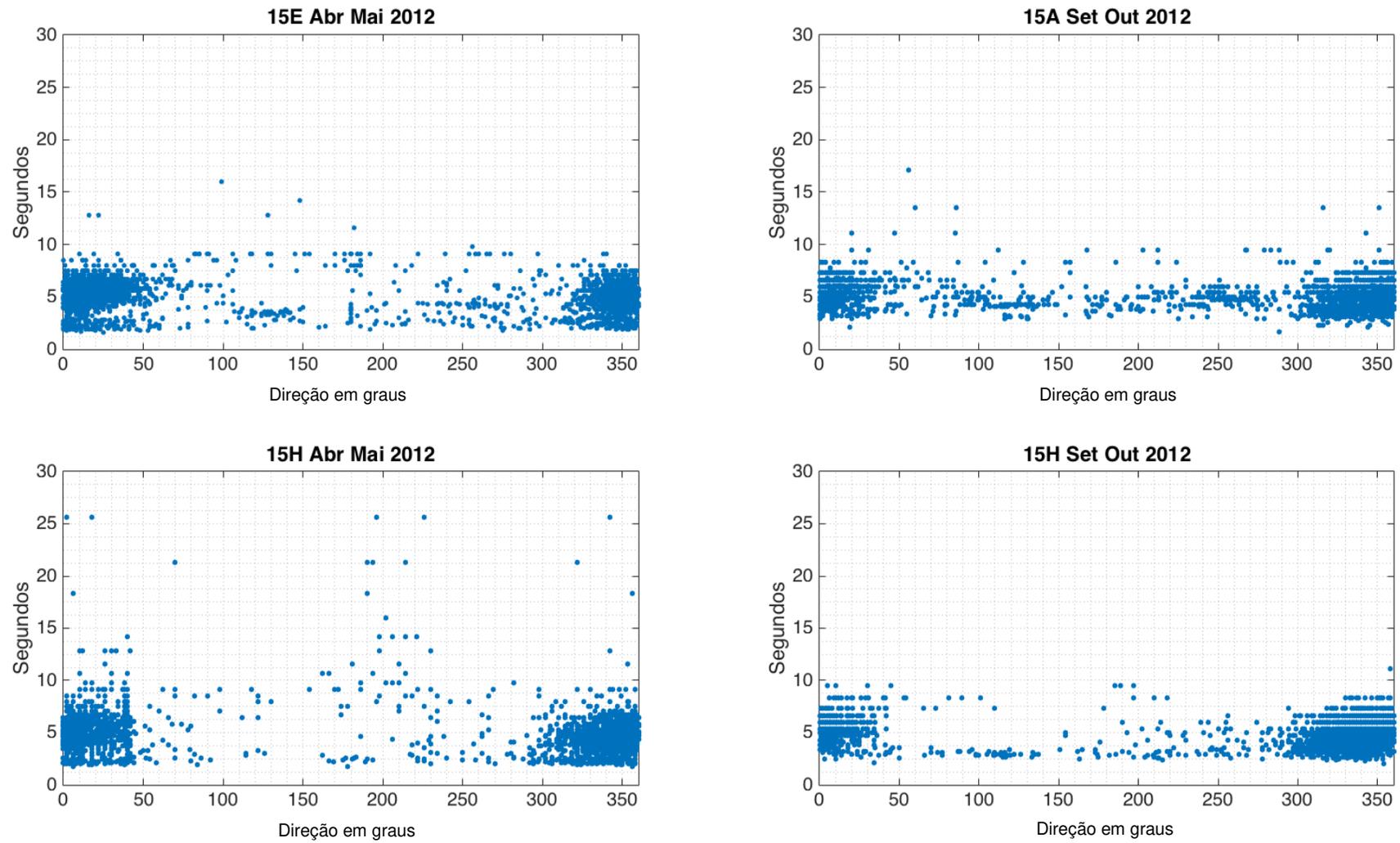


Figura 21. Direção e período de pico nos pontos 15E (abril e maio de 2012), 15A (setembro e outubro de 2012) e 15H (abril, maio, setembro e outubro de 2012)

6.3.2. Grupo 2

O segundo grupo compreende dados de fevereiro/março (período chuvoso) e novembro/dezembro (período de estiagem) dos pontos P16, P17, P18 e P19. Foi feita a análise desses dados em relação a climatologia da região, onde o primeiro período corresponde a época de chuva e o segundo período corresponde a época de seca.

As maiores frequências no primeiro período do ano (fevereiro e março) (Figura 23) dos dados observados podem ser relacionadas aos ventos locais, dessa maneira, os resultados encontrados apontaram uma maior incidência de ondas vindo das direções Noroeste, Norte e Nordeste (300° a 360° e de 0° a 50°). Porém os dados observados também têm ondas vindas de sul que podem ser relacionados à movimentação de *ferryboats* (figura 22).

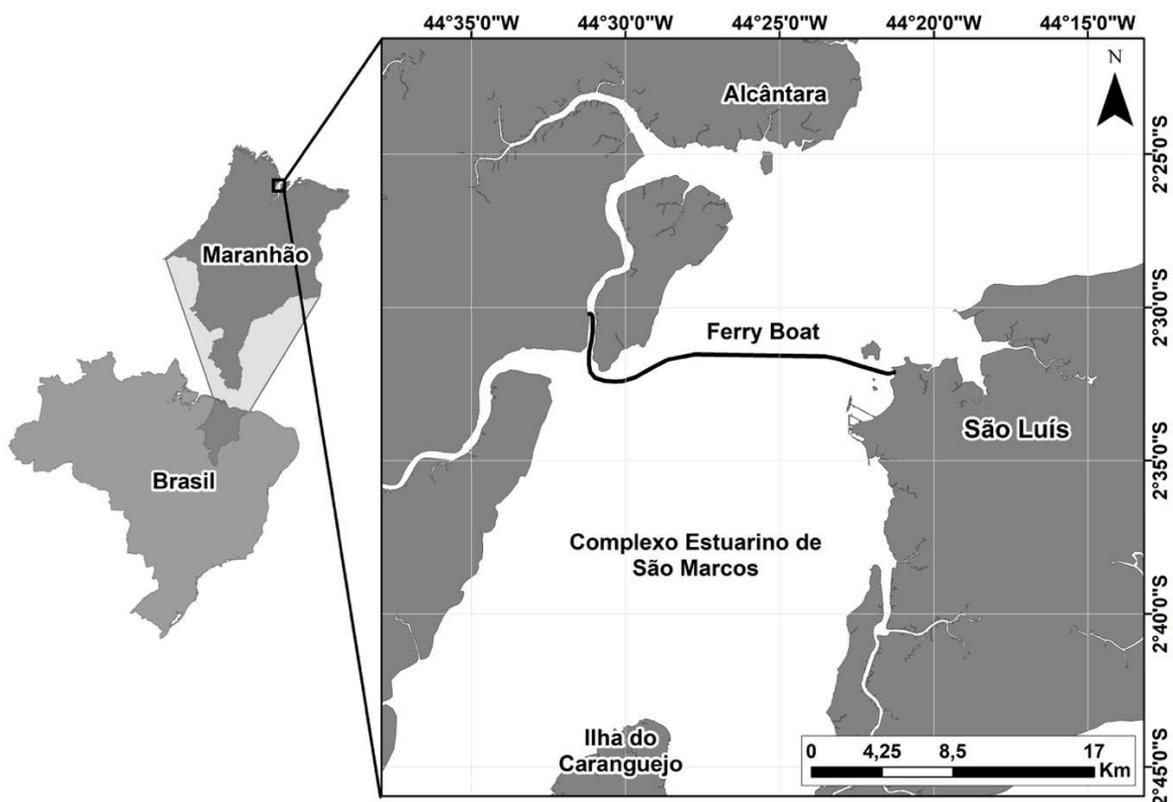


Figura 22. Rota do ferryboat no CESM

Nota-se que as ondas, nos pontos P16 e P19 são, em sua maioria, são das direções Norte e Nordeste (0° a 50°), tanto no primeiro período quanto no segundo período, porém os pontos P17 e P18 tem direção de onda principalmente da direção Noroeste e Norte (300° a 360° e de 0° a 10°). Isso pode estar relacionada a topografia

de fundo desta região do CESM que faz com que as ondas sofram refração para a esquerda.

As direções de ondas em novembro e dezembro (Figura 24) são atípicas quando comparadas com o padrão observado nos outros pontos, com uma alta frequência de ondas oriundas de 150° a 250° (Sul). No ponto P16 há uma maior frequência de ondas vindo de Sul, isso pode ocorrer por se tratar de uma região relativamente abrigada, além da batimetria que pode está causando refração das ondas e fazendo elas se convergirem. A predominância da direção das ondas em P16 e P19 são de Norte e Nordeste (0° a 50°), enquanto nos pontos P17 e P18 são das vindas de Noroeste, Norte e Nordeste (300° a 360° e de 0° a 50°). Essa variação da direção das ondas pode está relacionadas batimetria local que pode estar causando refração de ondas para a esquerda.

Os períodos de pico em ambos os períodos estudados (Figura 25 e 26), não ultrapassam 10 segundos, o que é um indicio que essas ondas são geradas por ventos locais. Períodos de pico maiores 10 segundos podem ser relacionados com interações onda-onda.

As alturas significativas no primeiro período amostrado são menores que um metro, com suas maiores frequências em entre 0,3 a 0,8 metros, aproximadamente (Figura 27). No segundo período amostrado ocorre uma mudança expressiva na altura significativa das ondas com suas maiores frequências entre 0,5 a 0,9 metros (Figura 28), com exceção do ponto P19, que apresenta ondas maiores que um metro. Essas variações da altura significativa podem ser relacionadas a mudança da posição da ZCIT. Como a posição da ZCIT no segundo período do ano é cerca de 10° N, nessa região, a pista para geração de ondas de gravidade é maior que no início do ano (ZCIT posicionada, aproximadamente, a 5° S).

As figuras 29 e 30 foram elaboradas para relacionar o período de pico e a direção das ondas, deste modo, evidenciam as direções das ondas que tem o período de pico maiores que 10 segundos.

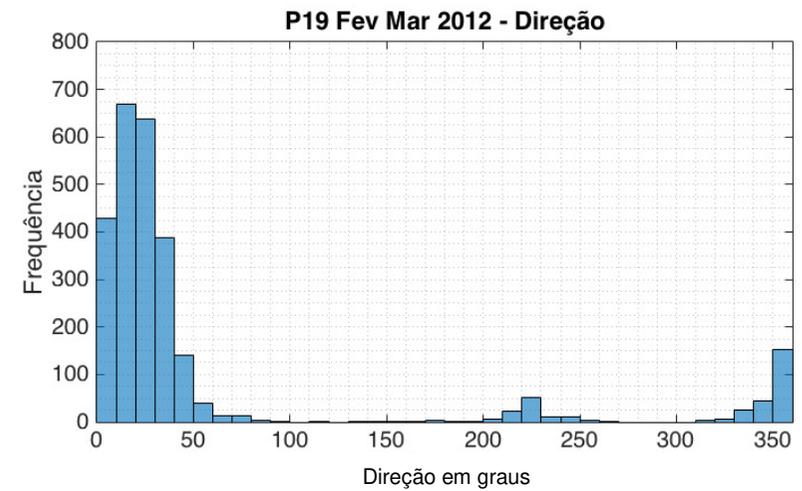
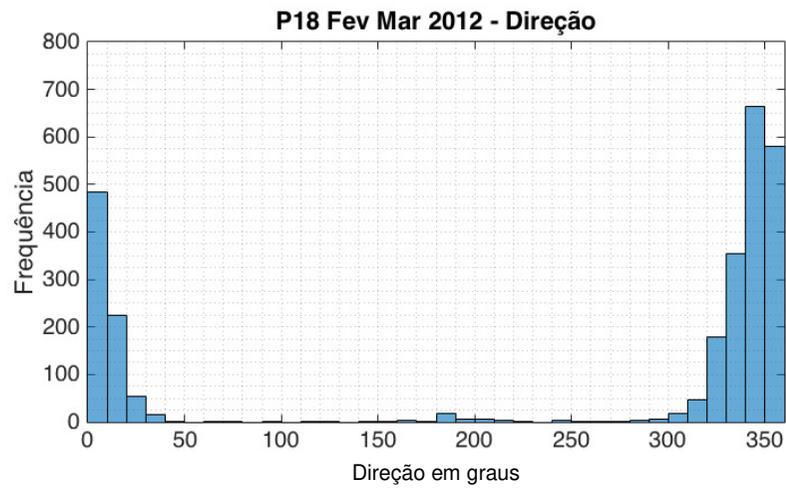
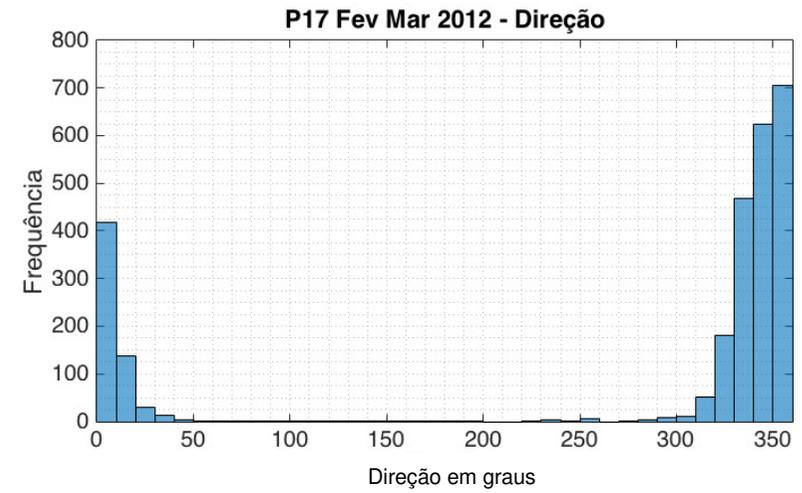
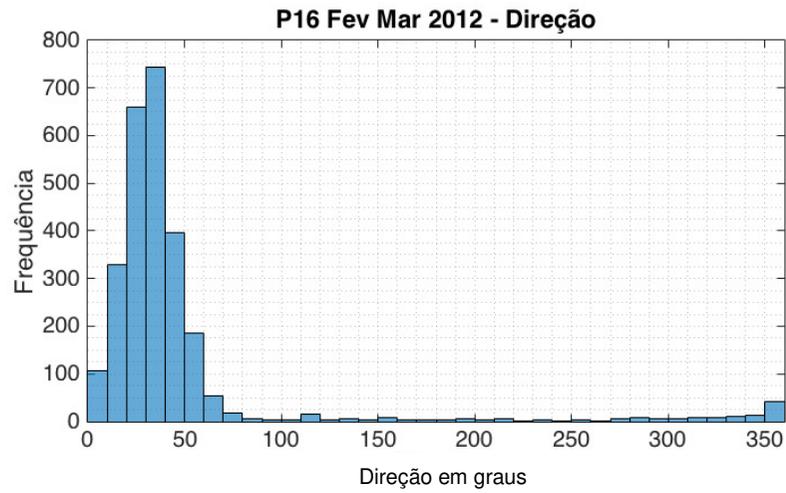


Figura 23. Direção das ondas nos pontos P16, P17, P18 e P19 nos meses de fevereiro e março de 2012.

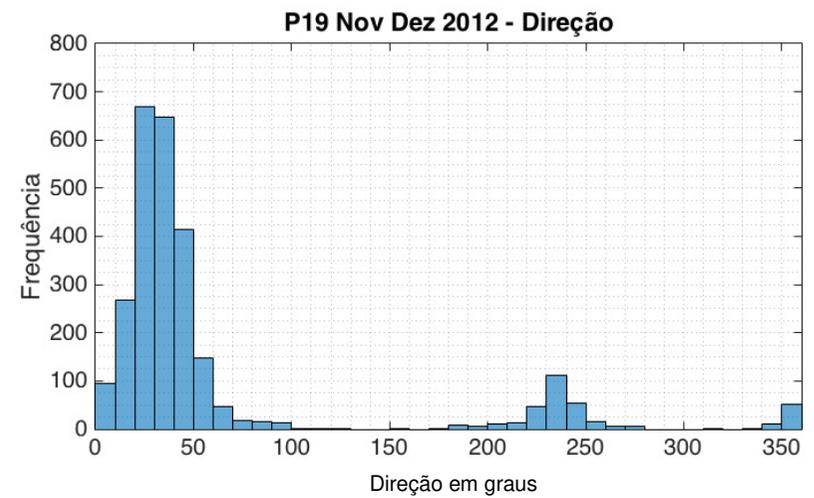
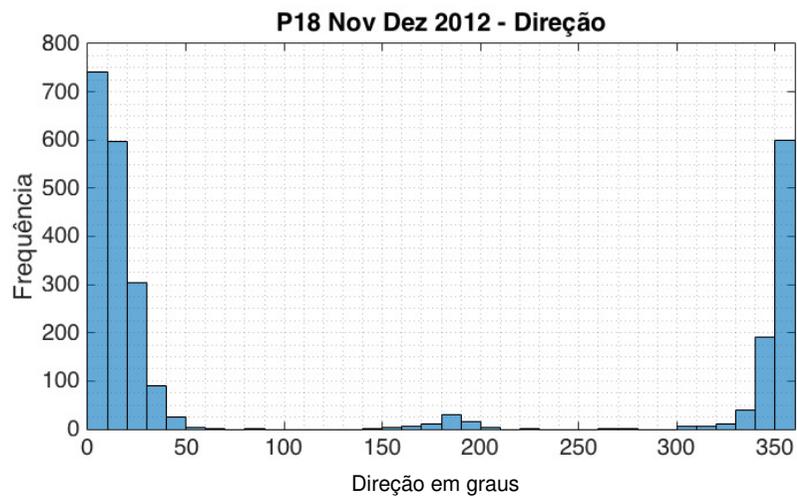
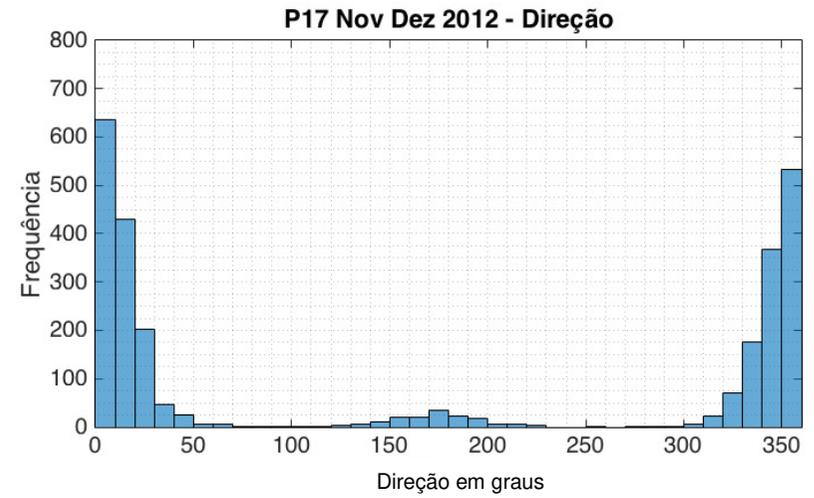
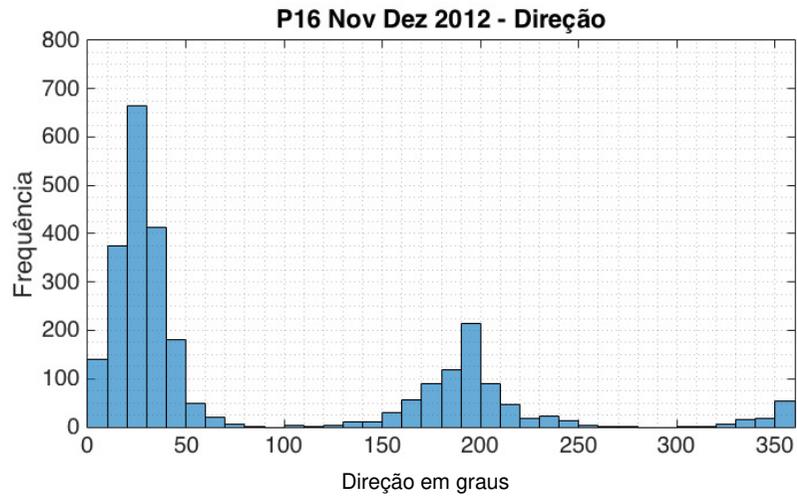


Figura 24. Direção das ondas nos pontos P16, P17, P18 e P19 nos meses de novembro e dezembro de 2012.

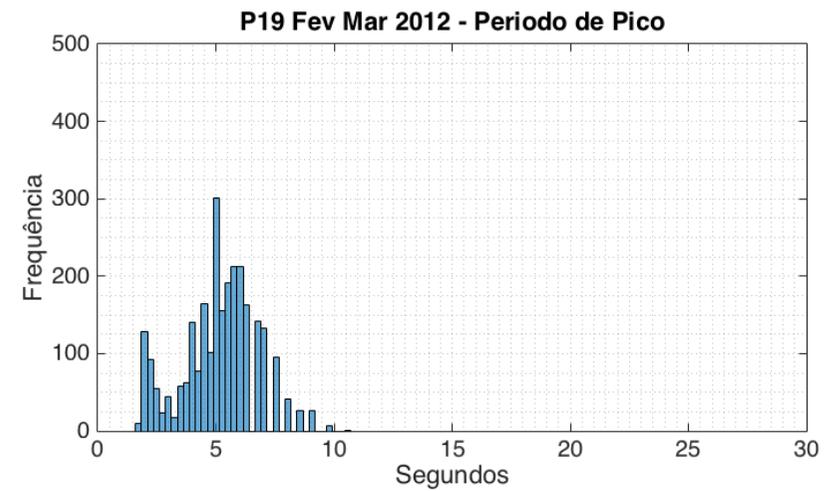
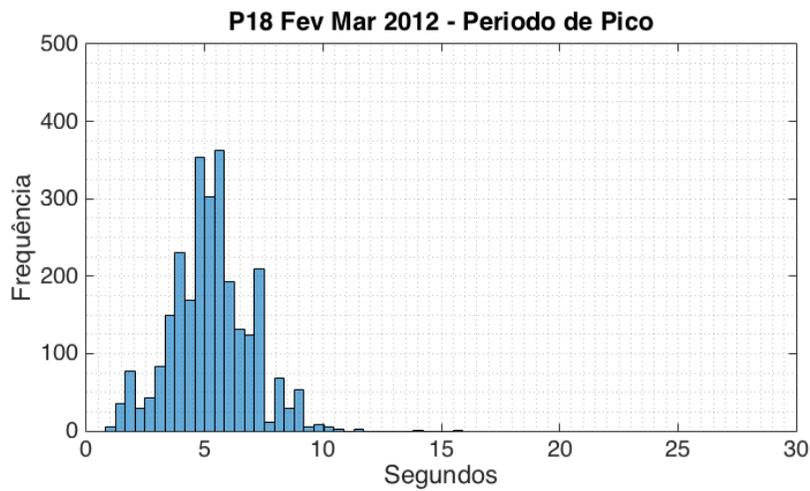
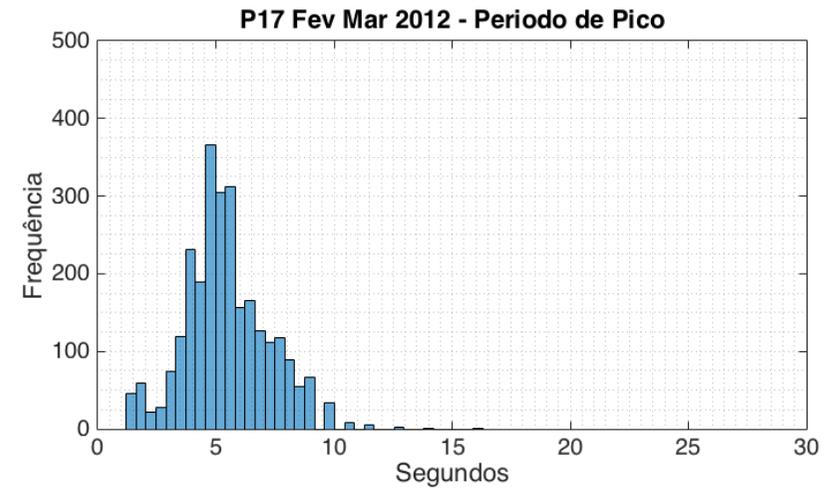
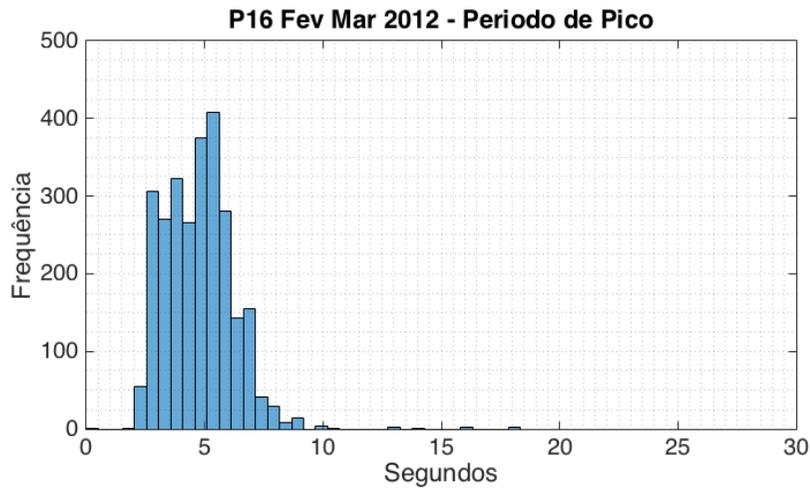


Figura 25. Período de pico das ondas nos pontos P16, P17, P18 e P19 nos meses de fevereiro e março de 2012.

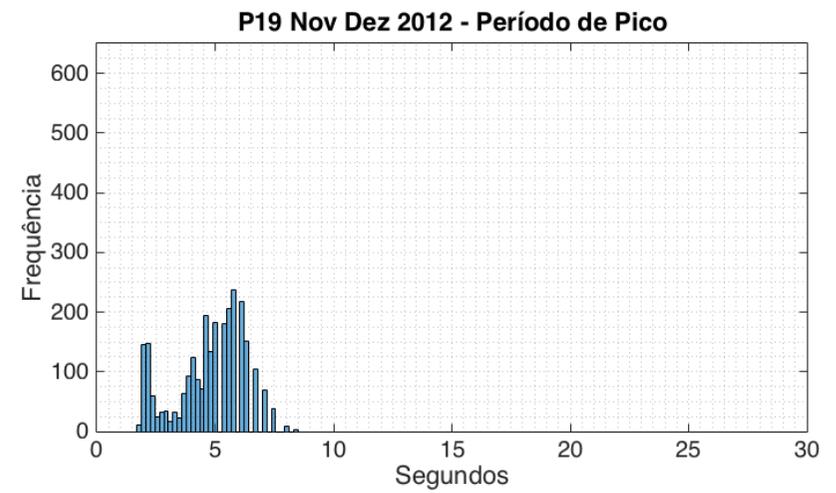
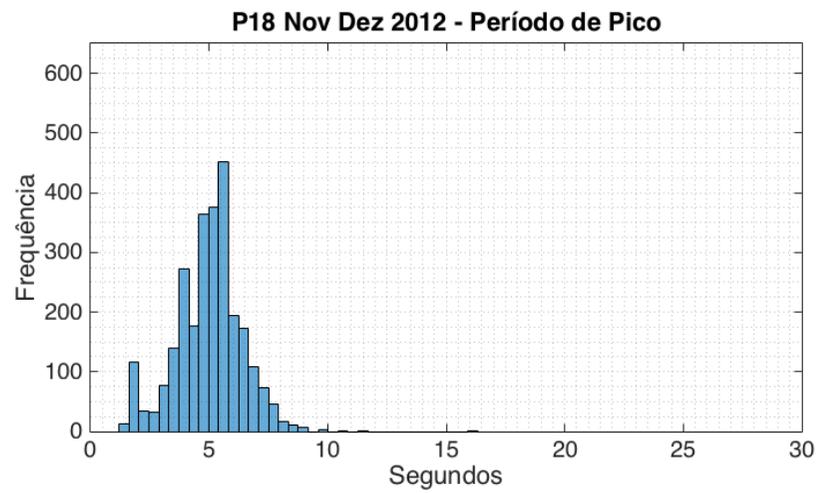
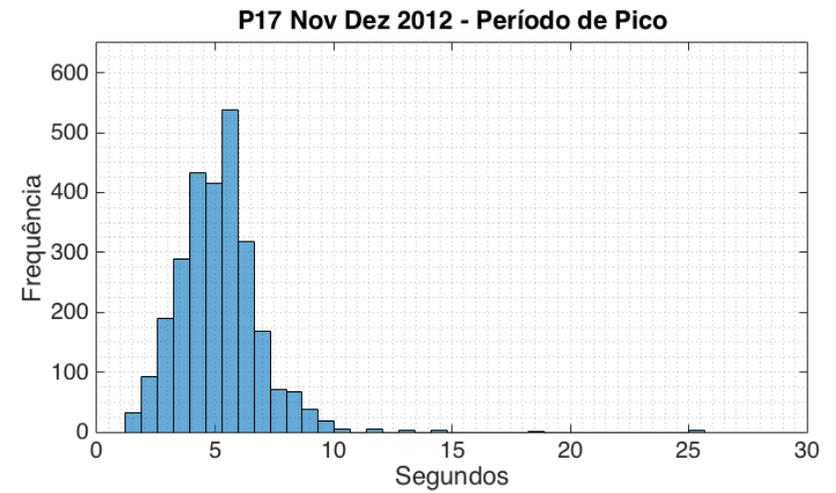
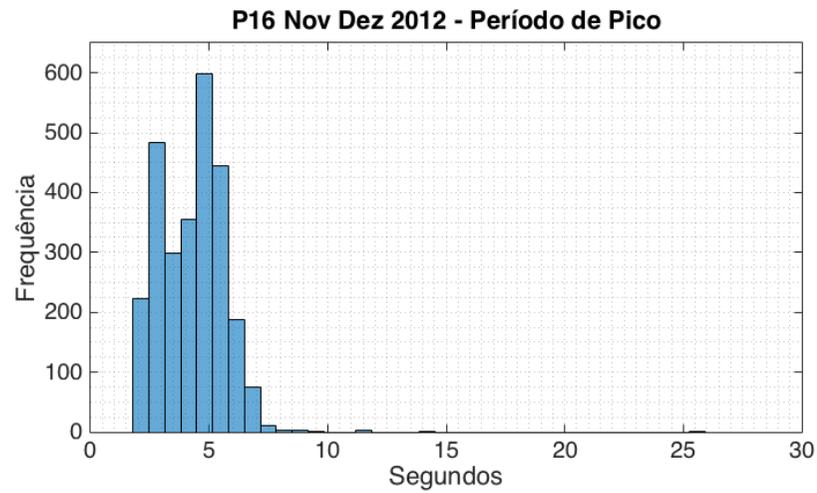


Figura 26. Período de pico das ondas nos pontos P16, P17, P18 e P19 nos meses de novembro e dezembro de 2012.

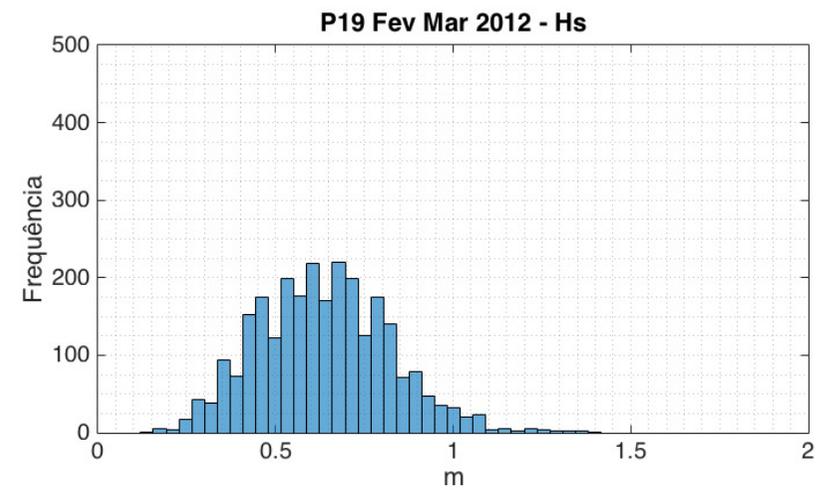
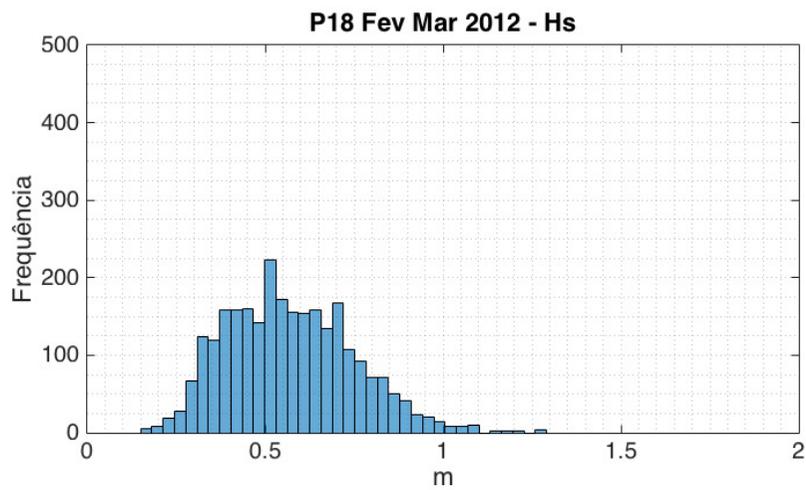
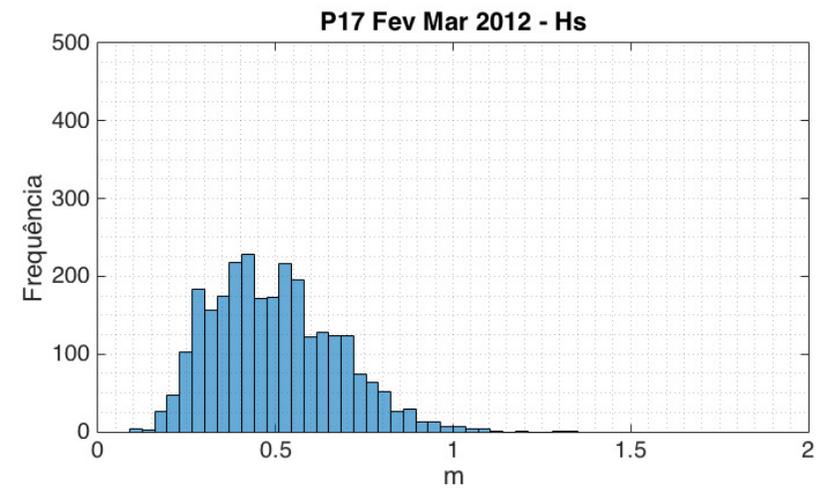
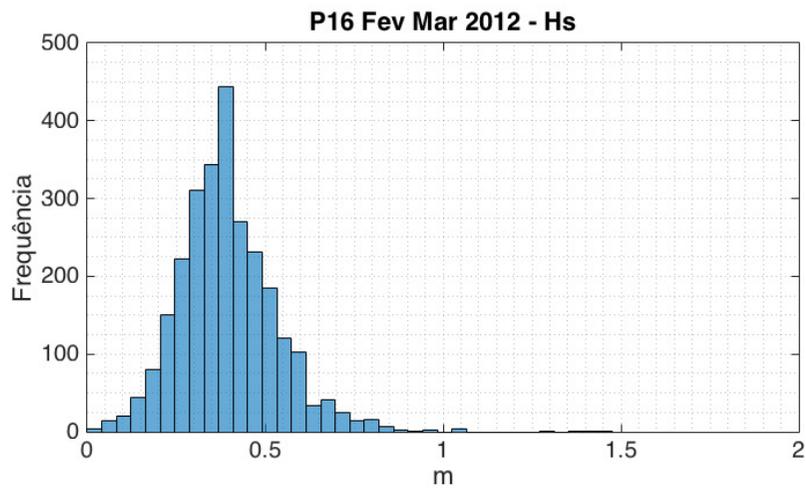


Figura 27. Altura significativa das ondas nos pontos P16, P17, P18 e P19 nos meses de fevereiro e março de 2012.

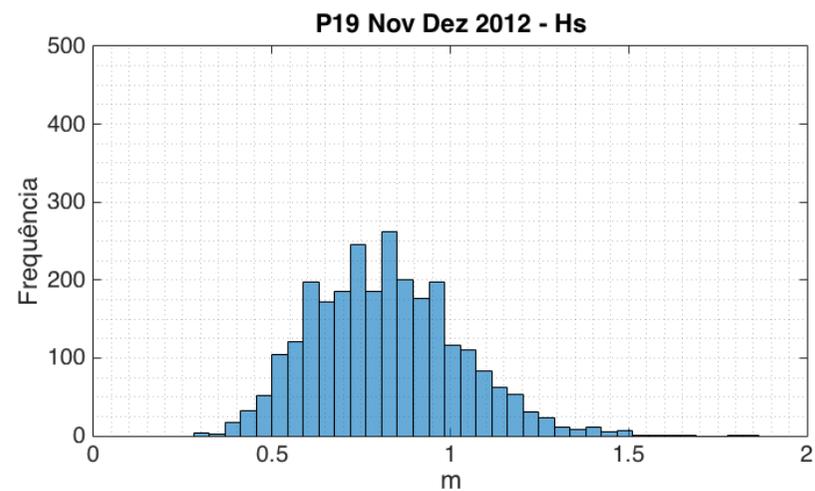
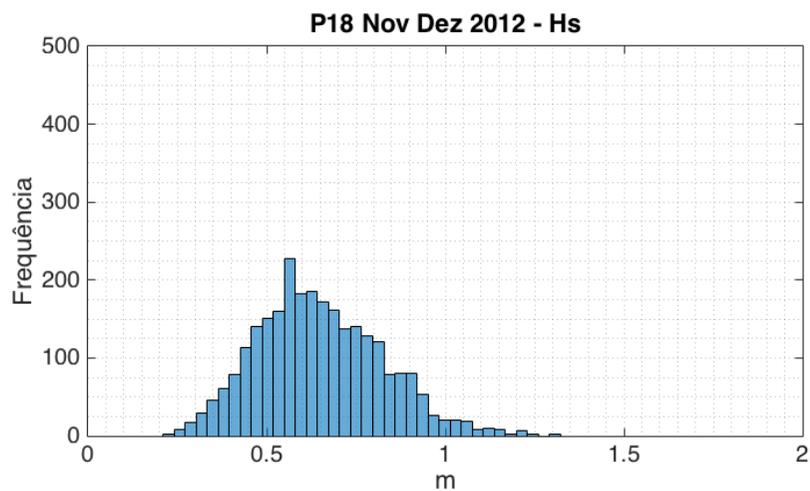
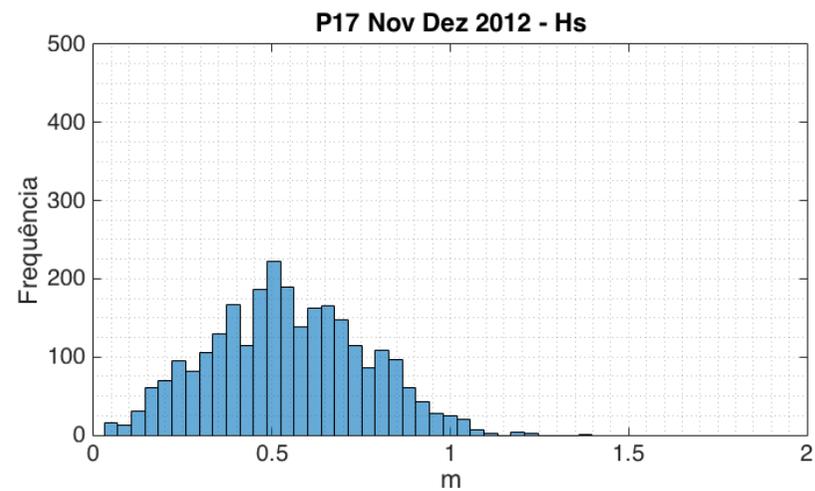
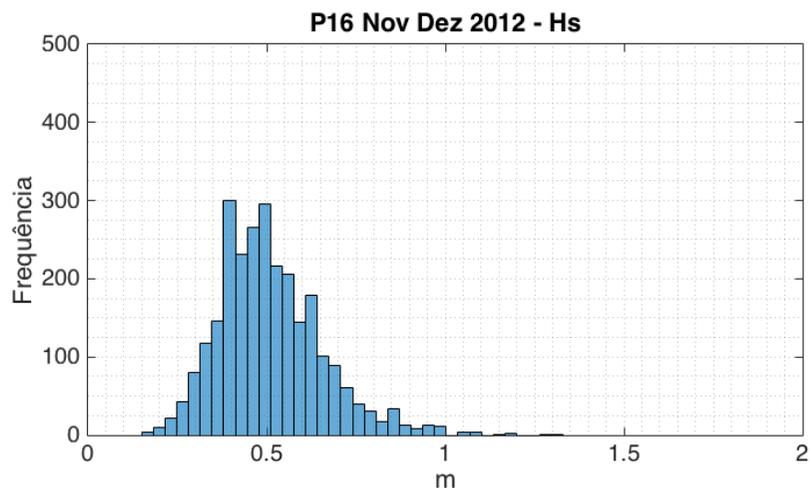


Figura 28. Altura significativa das ondas nos pontos P16, P17, P18 e P19 nos meses de novembro e dezembro de 2012.

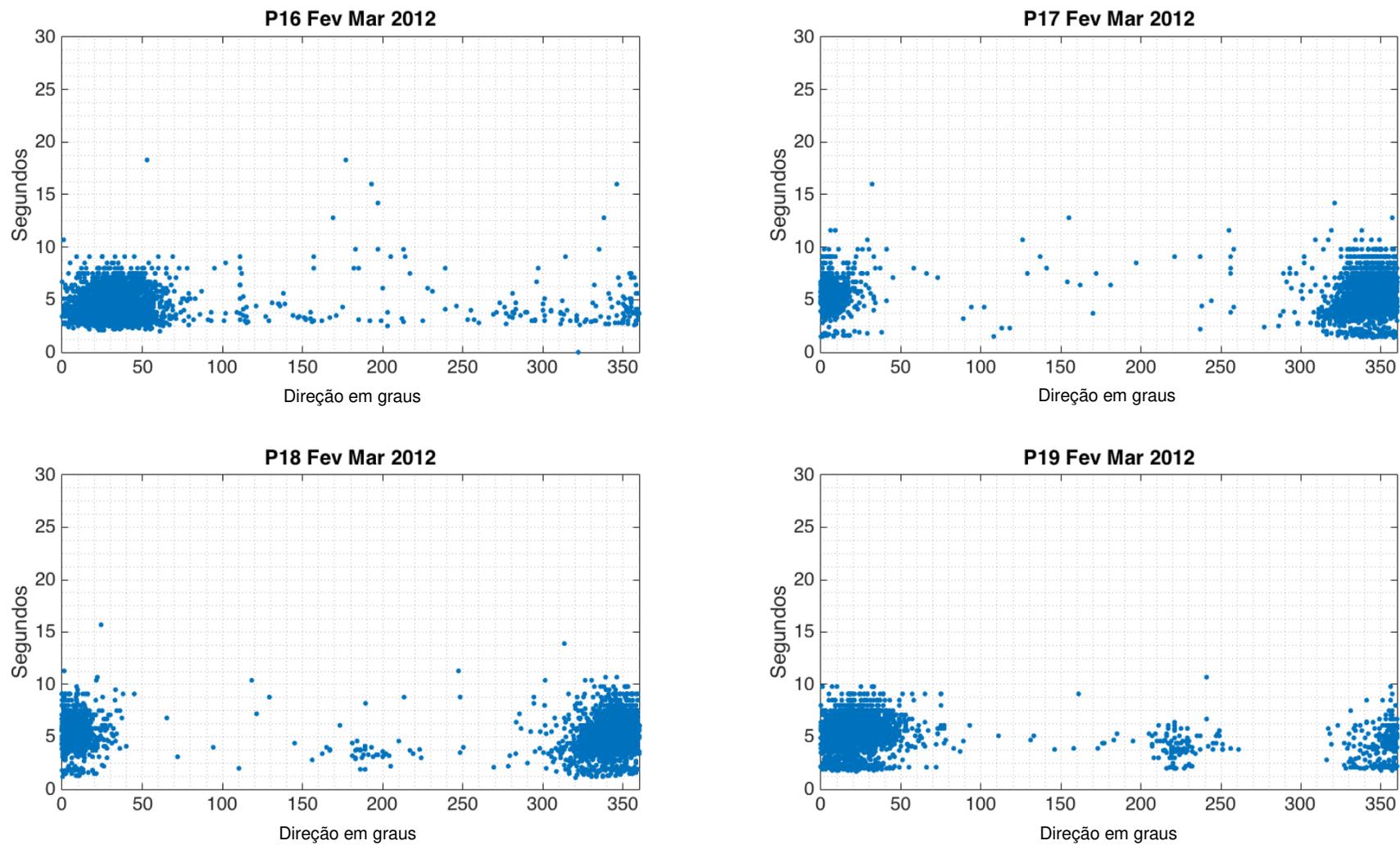


Figura 29. Direção e período de pico nos pontos P16, P17, P18 e P19 nos meses de fevereiro e março de 2012.

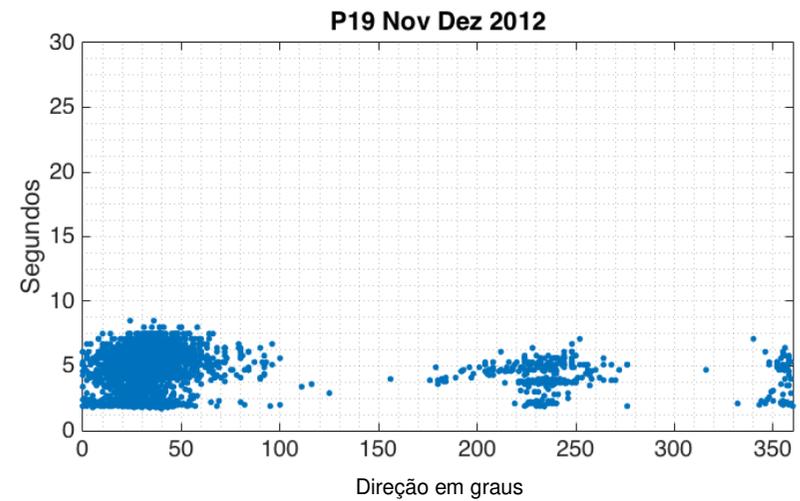
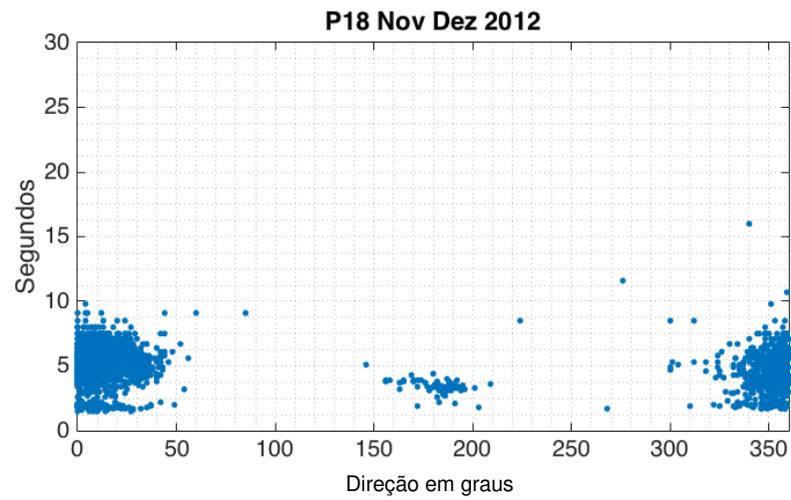
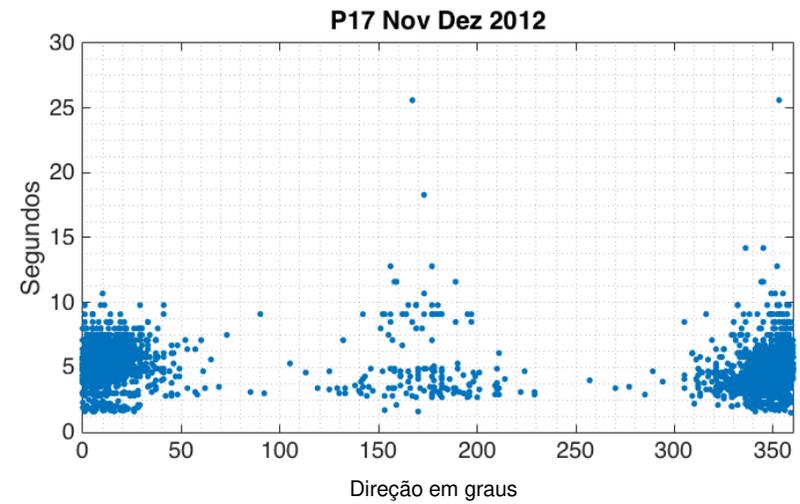
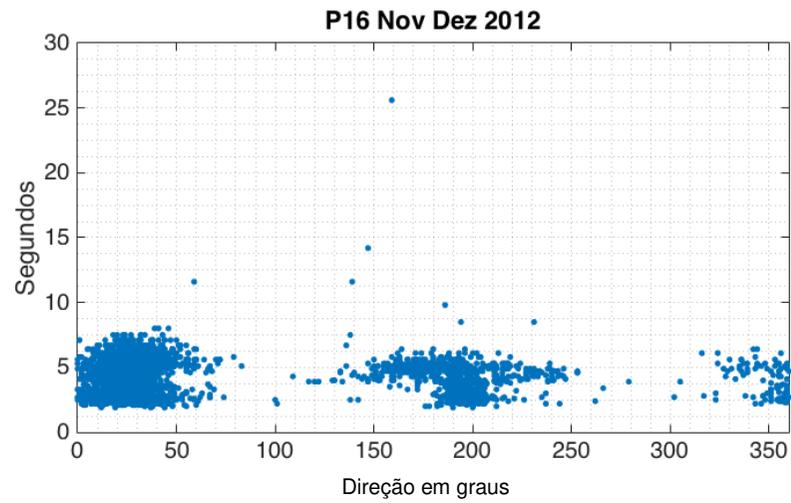


Figura 30. Direção e período de pico nos pontos P16, P17, P18 e P19 nos meses novembro e dezembro de 2012.

6.3.3. Grupo 3

O terceiro grupo estudado abrange dados de fevereiro a dezembro de 2012 do ponto 15H, que fica próximo ao Complexo Portuário e de janeiro a dezembro do ponto P18, que se localiza longe da influência da movimentação dos navios e são ilustrados nas figuras de 31 a 42. Vale ressaltar que os meses de junho e outubro possuem poucos dados observados em ambos os pontos.

No ponto 15H as direções são, principalmente, de Noroeste, Norte e Nordeste (300° a 360° e de 0° a 50°) durante todo o ano, porém existe ondas em baixas frequências de ondas oriundas de todas as direções que podem ser relacionadas à movimentação de navios que ocorre próximo ao ponto (figura 31 e 32).

No ponto P18 pôde-se notar que as maiores frequências de ondas (figuras 33 e 34) também são das direções Noroeste, Norte e Nordeste (320° a 360° e de 0° a 50°) durante o ano todo, porém a frequência de ondas de outras direções é bem menor se comparadas com o ponto 15H.

Com relação a altura significativa das ondas, no ponto 15H (figuras 35 e 36) as ondas têm, principalmente, menos de um metro de altura, porém as maiores frequências são menores que 0,5 metros e tem características de ondas formadas por ventos locais.

Já no ponto P18 (figuras 37 e 38) existem várias ocorrências de ondas com altura maiores que um metro se comparada com o ponto 15H, e as suas maiores frequências estão acima de 0,5 metros principalmente no segundo semestre do ano que corresponde ou período menores índices pluviométricas, quando a ZCIT está posicionada a, aproximadamente, 10° N, o que possibilita a geração de ondas com uma altura significativa mais elevada, pois a pista de geração das ondas mais extensa.

A interação onda-onda pode está sendo responsável pelas ondas que possuem período de pico maiores que 10 segundos (figuras 39 a 42), tanto no 15H e P18, porém no P18 a frequência de ondas com período de pico superiores a 10 segundos é menor se comparadas com o 15H.

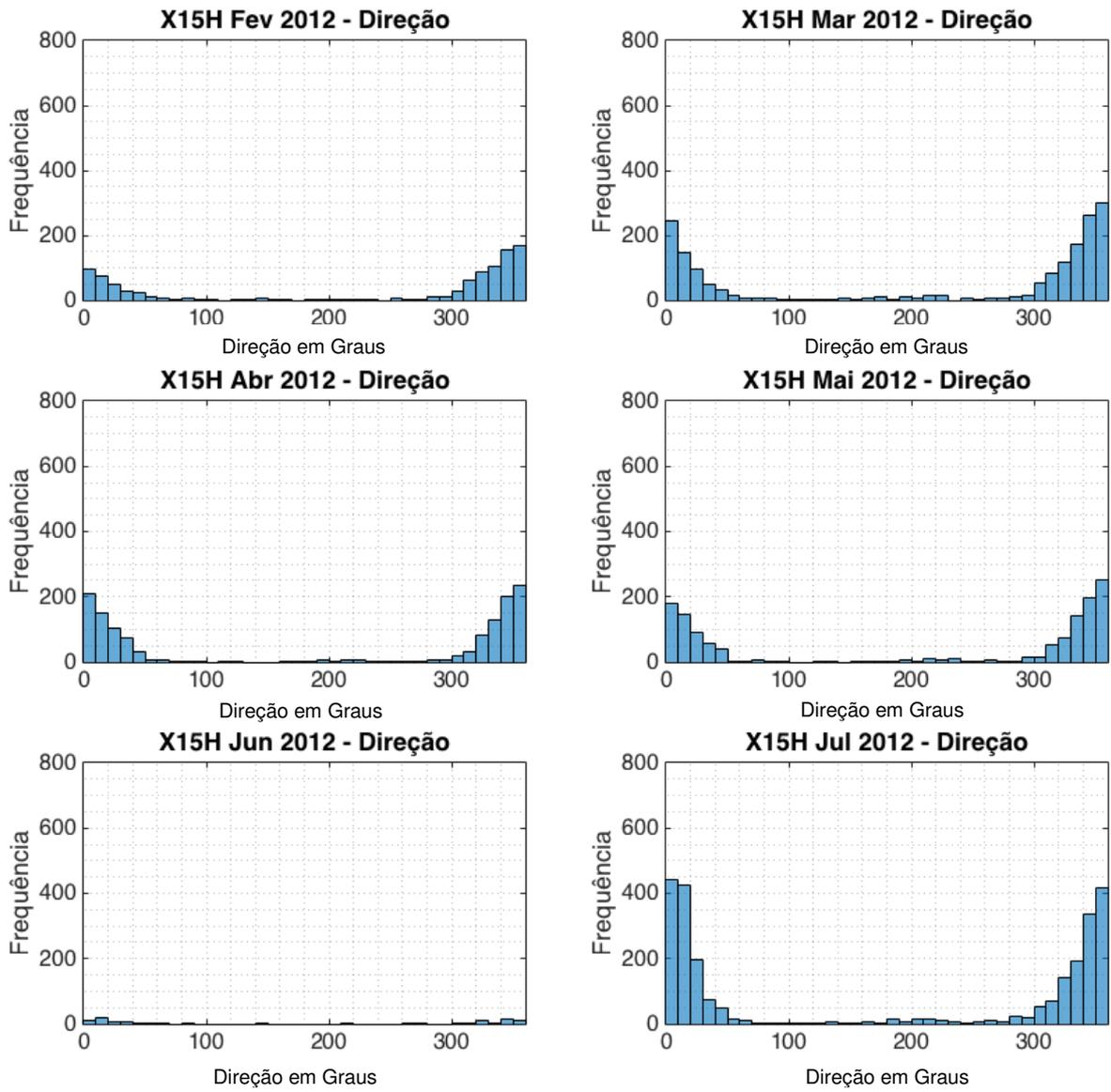


Figura 31. Direção das ondas no ponto 15H nos meses de fevereiro a julho.

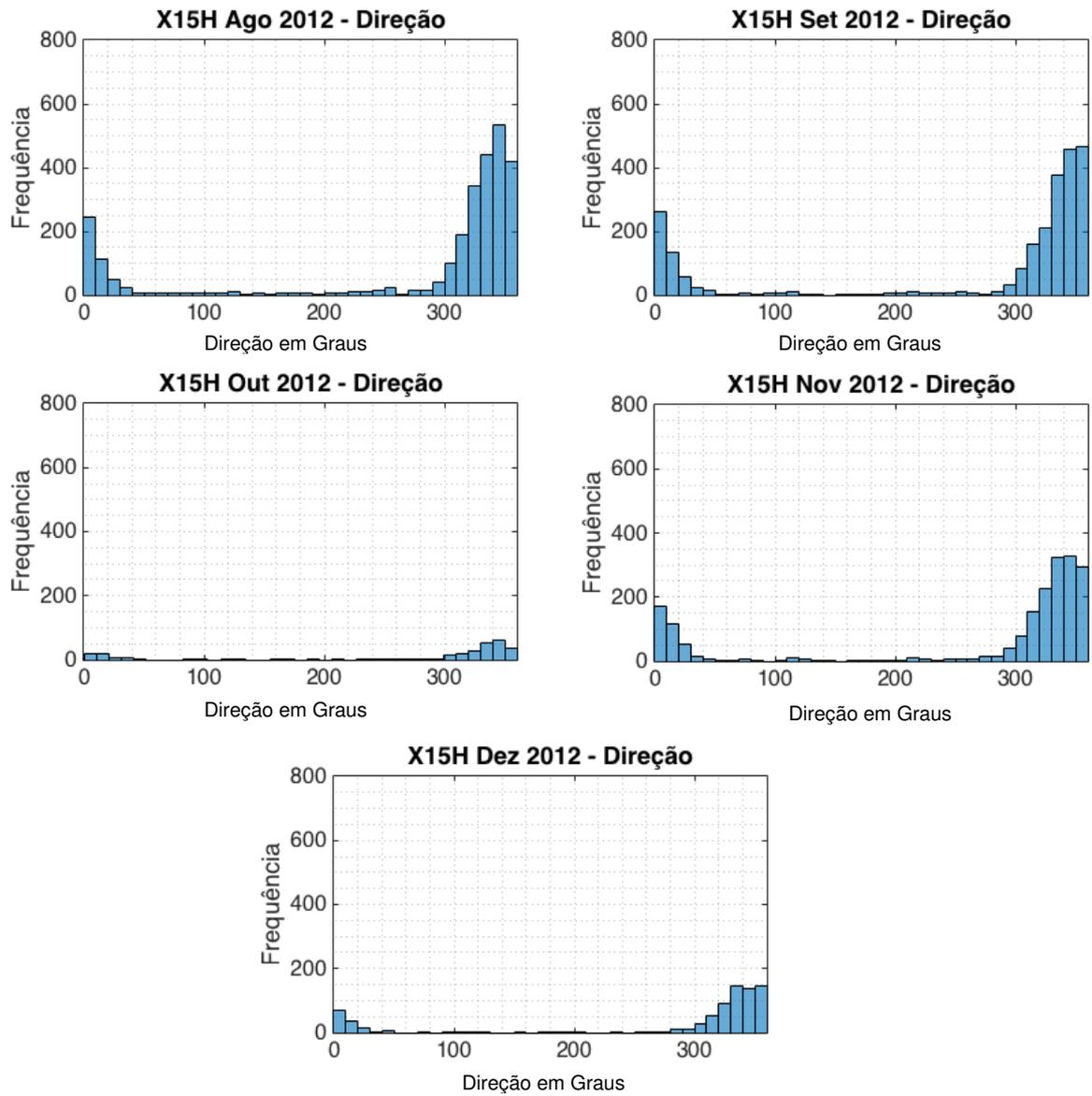


Figura 32. Direção das ondas no ponto 15H nos meses de agosto a dezembro.

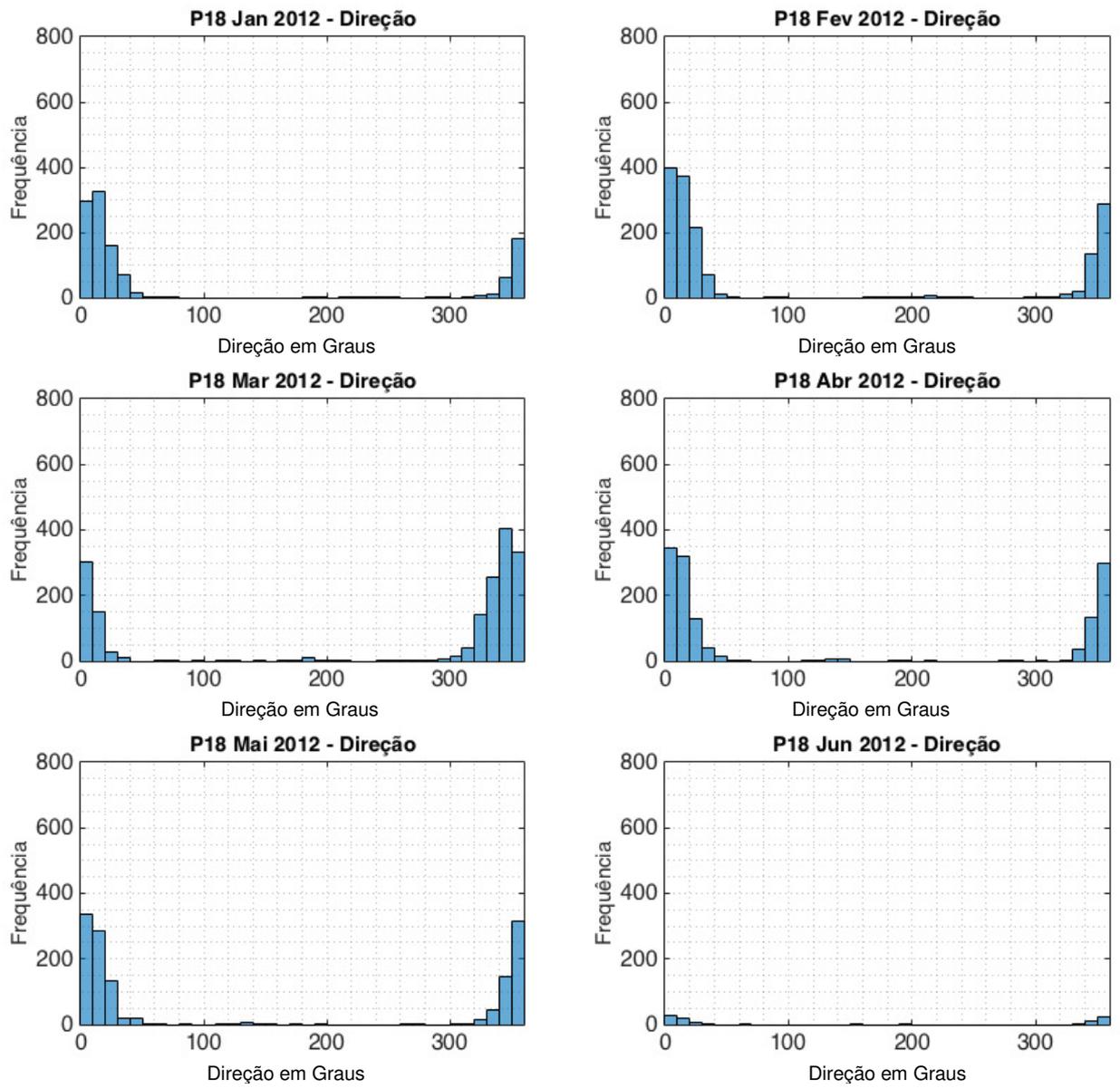


Figura 33. Direção das ondas no ponto P18 nos meses de janeiro a junho.

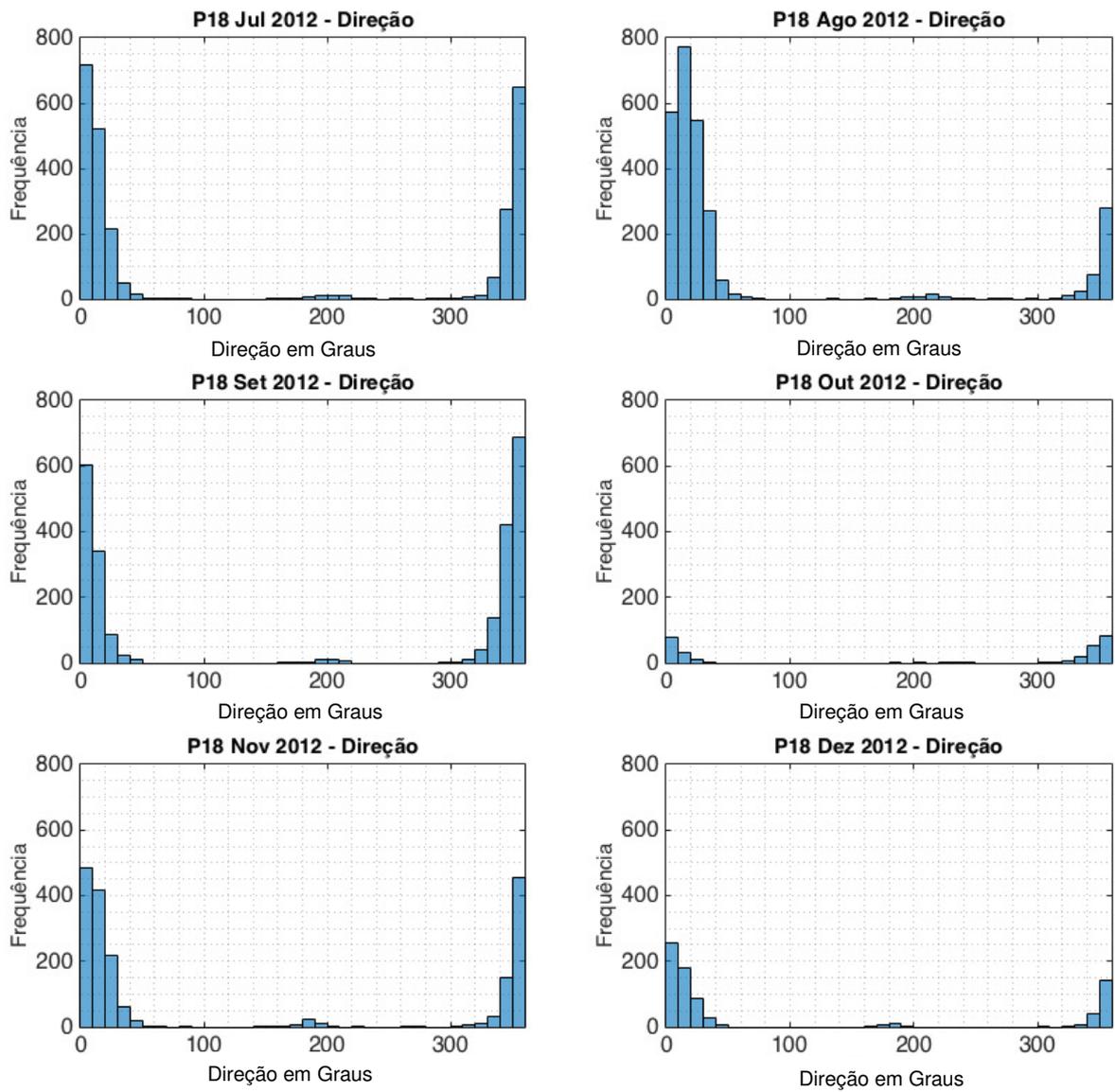


Figura 34. Direção das ondas no ponto P18 nos meses de julho a dezembro.

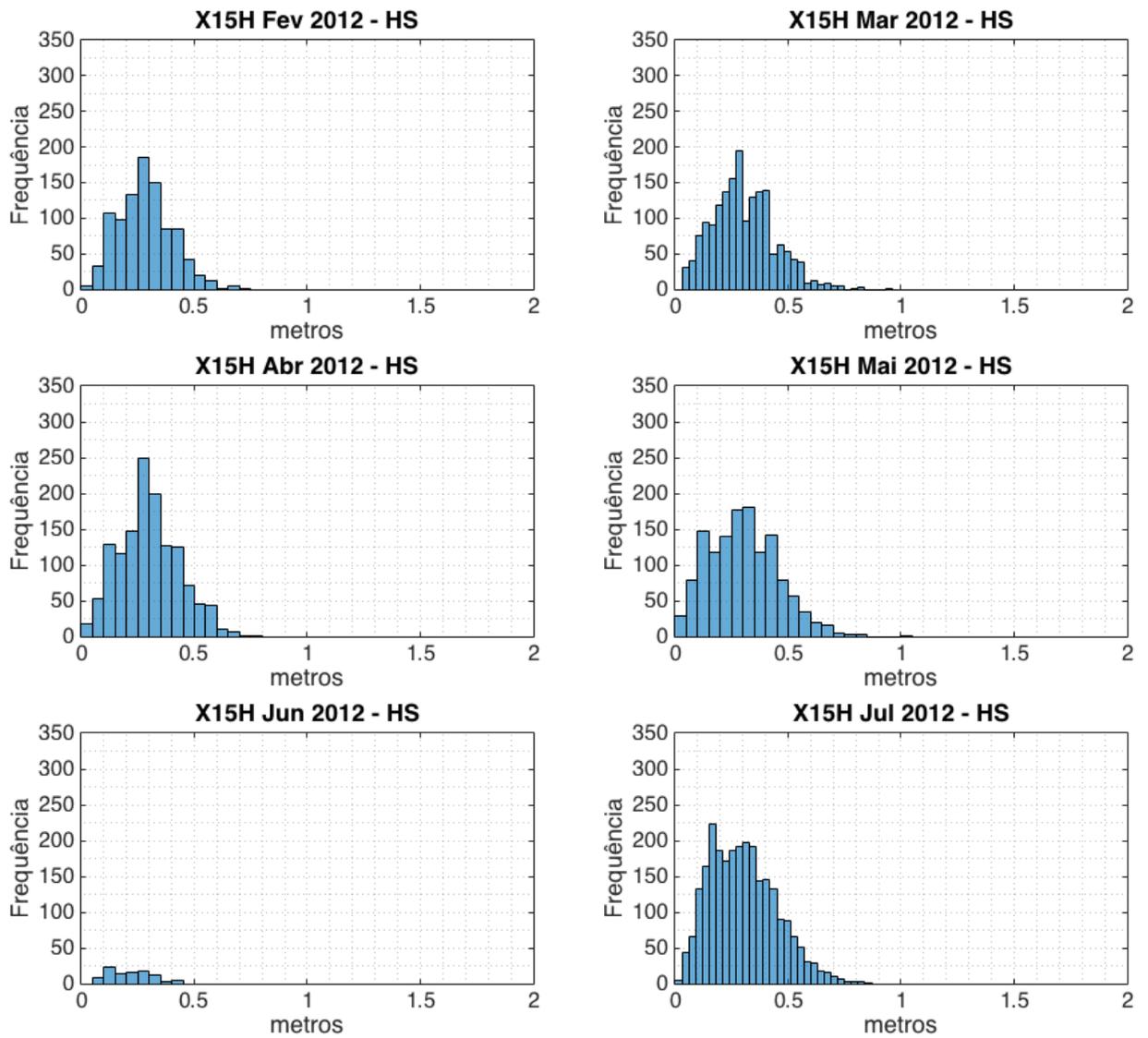


Figura 35. Altura significativa das ondas no ponto 15H nos meses de fevereiro a julho.

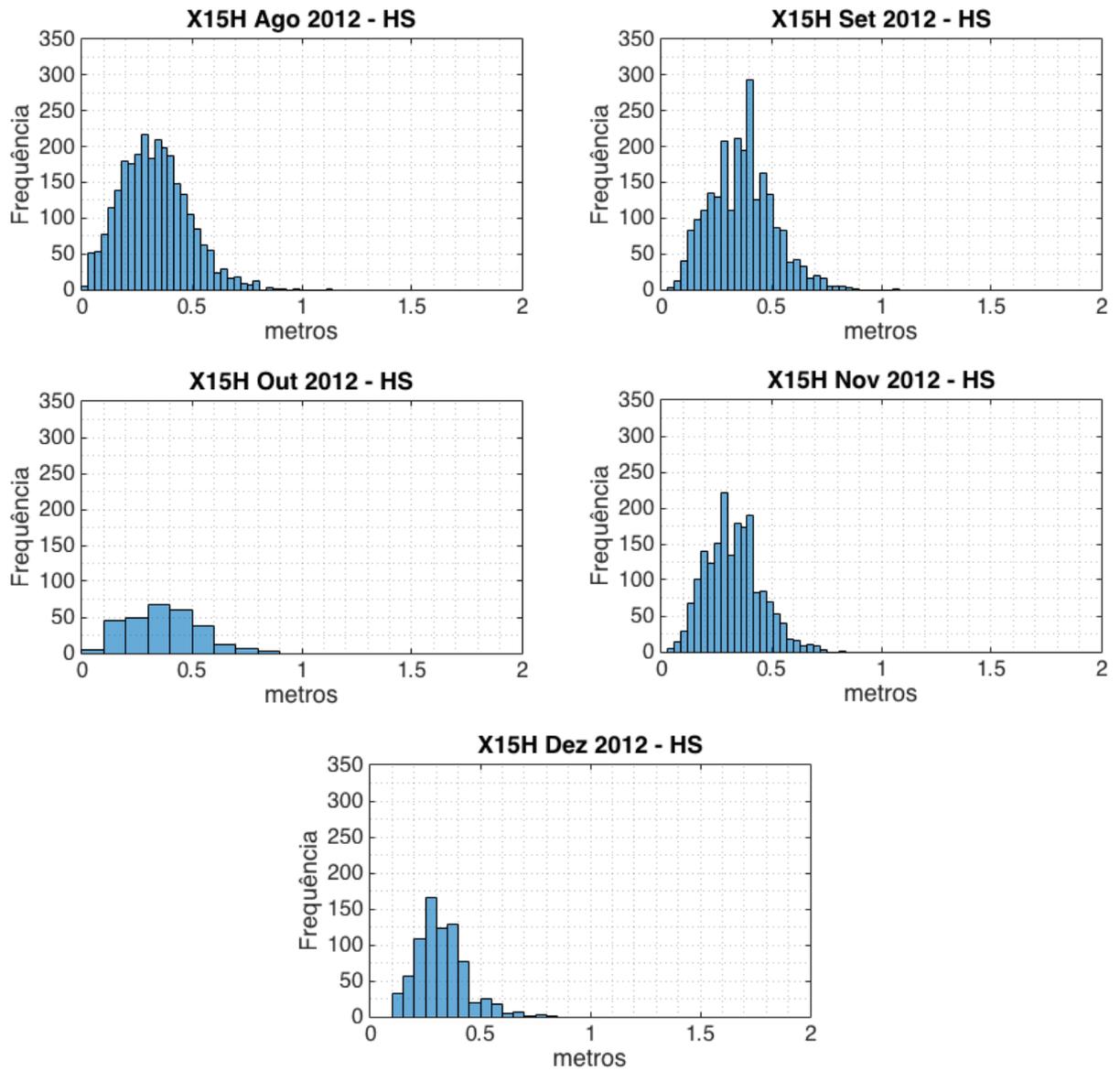


Figura 36. Altura significativa das ondas no ponto 15H nos meses de agosto a dezembro.

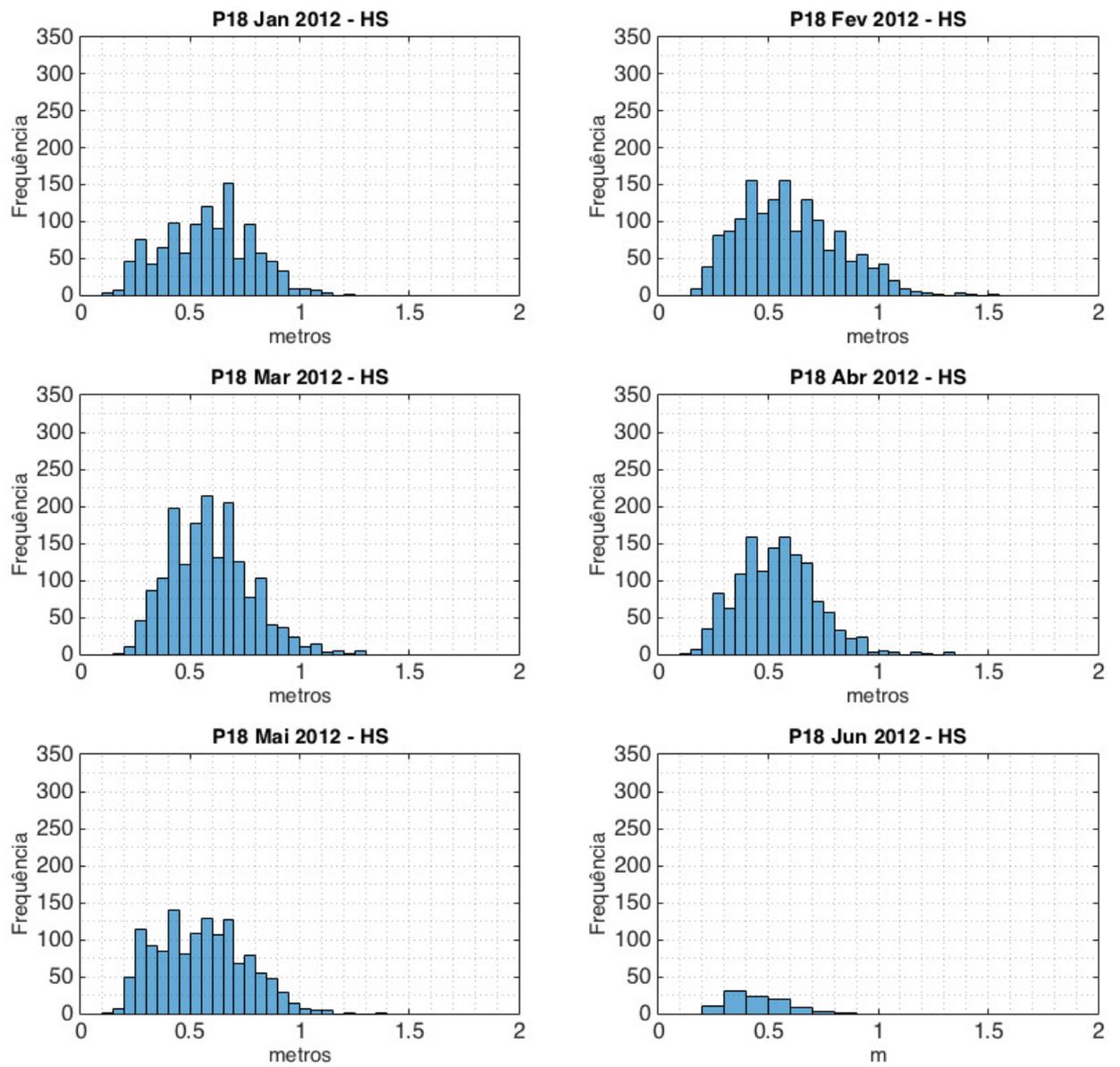


Figura 37. Altura significativa das ondas no ponto P18 nos meses de janeiro a junho.

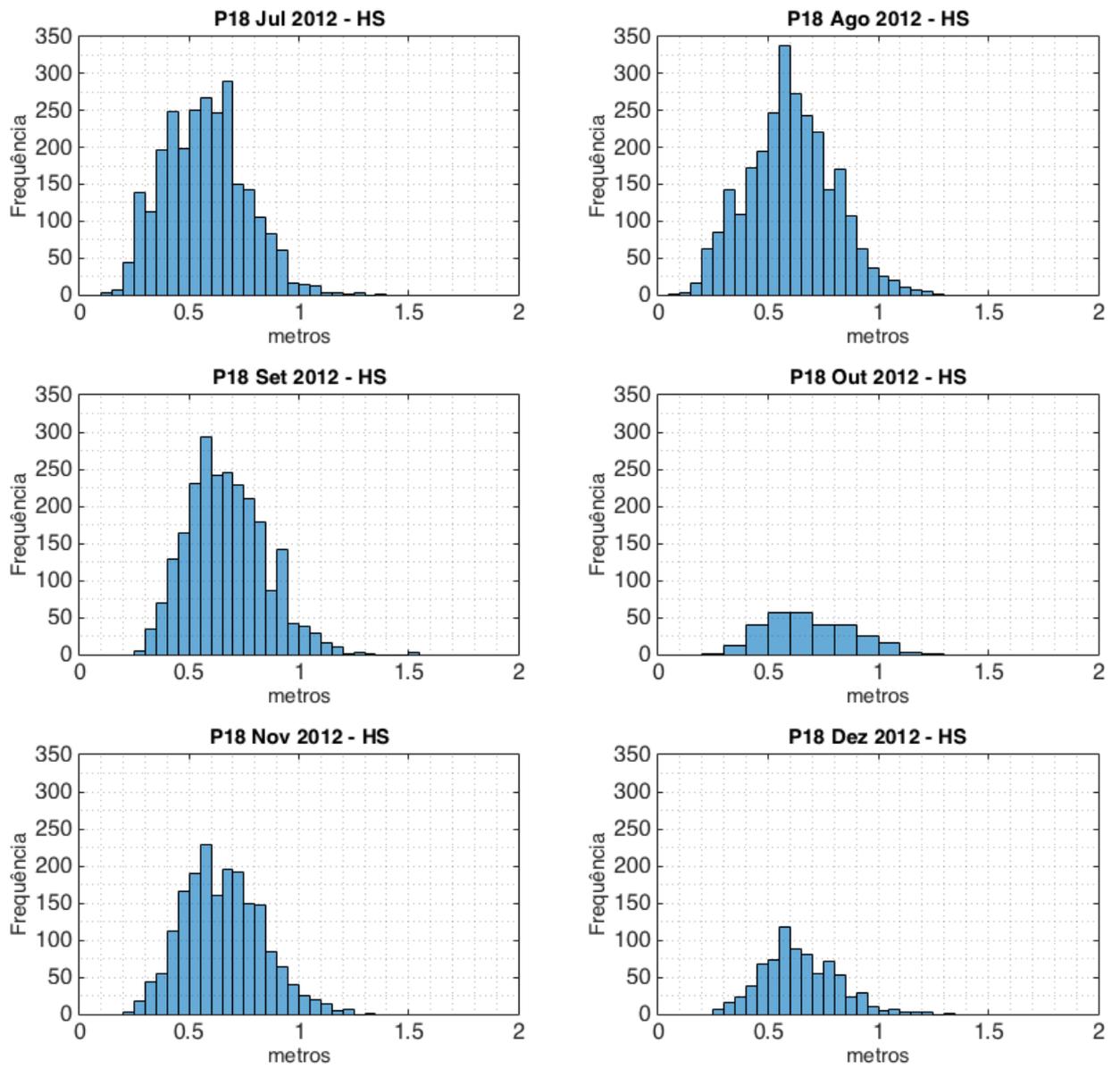


Figura 38. Altura significativa das ondas no ponto P18 nos meses de julho a dezembro.

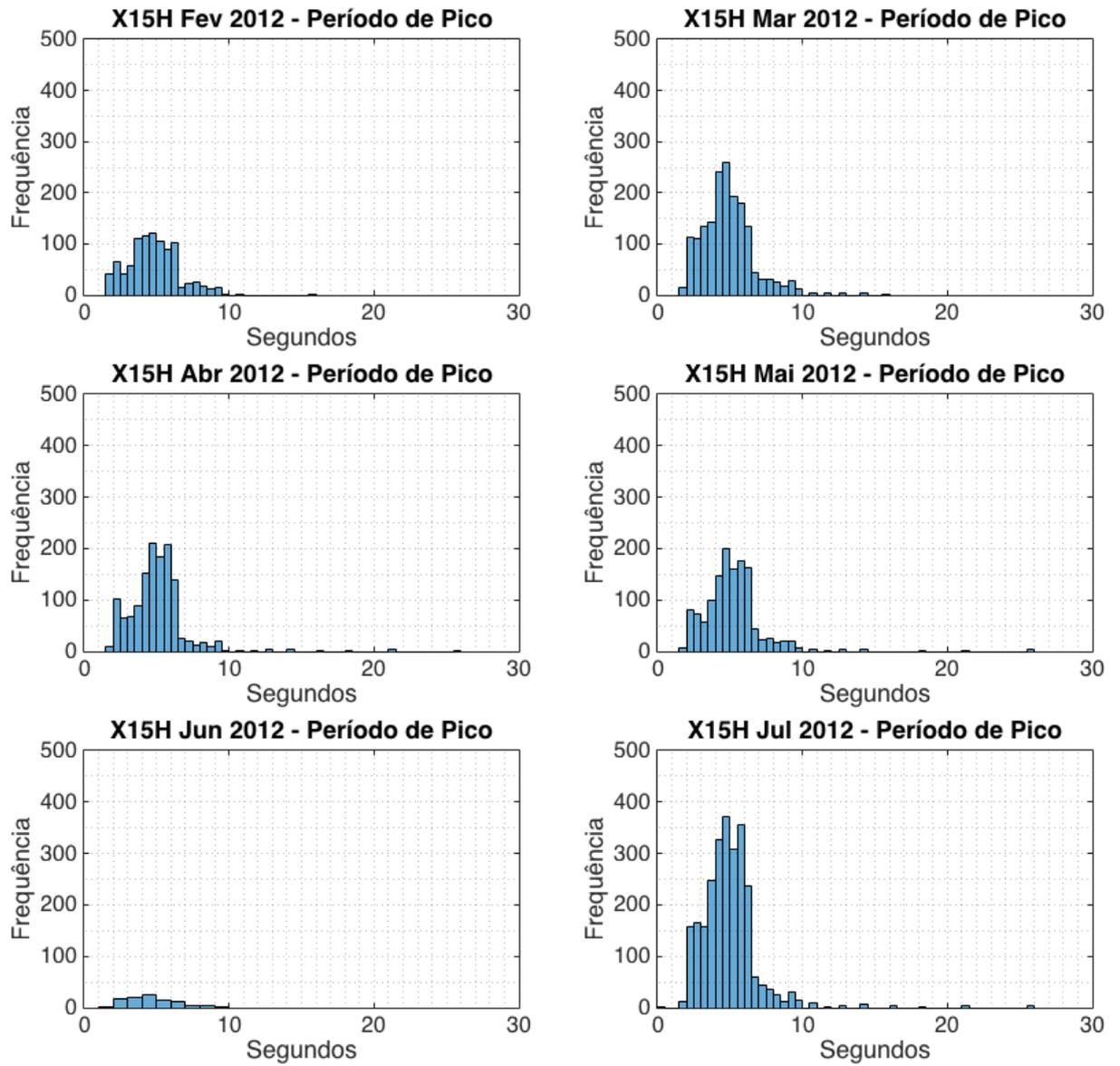


Figura 39. Período de pico das ondas no ponto 15H nos meses de fevereiro a julho.

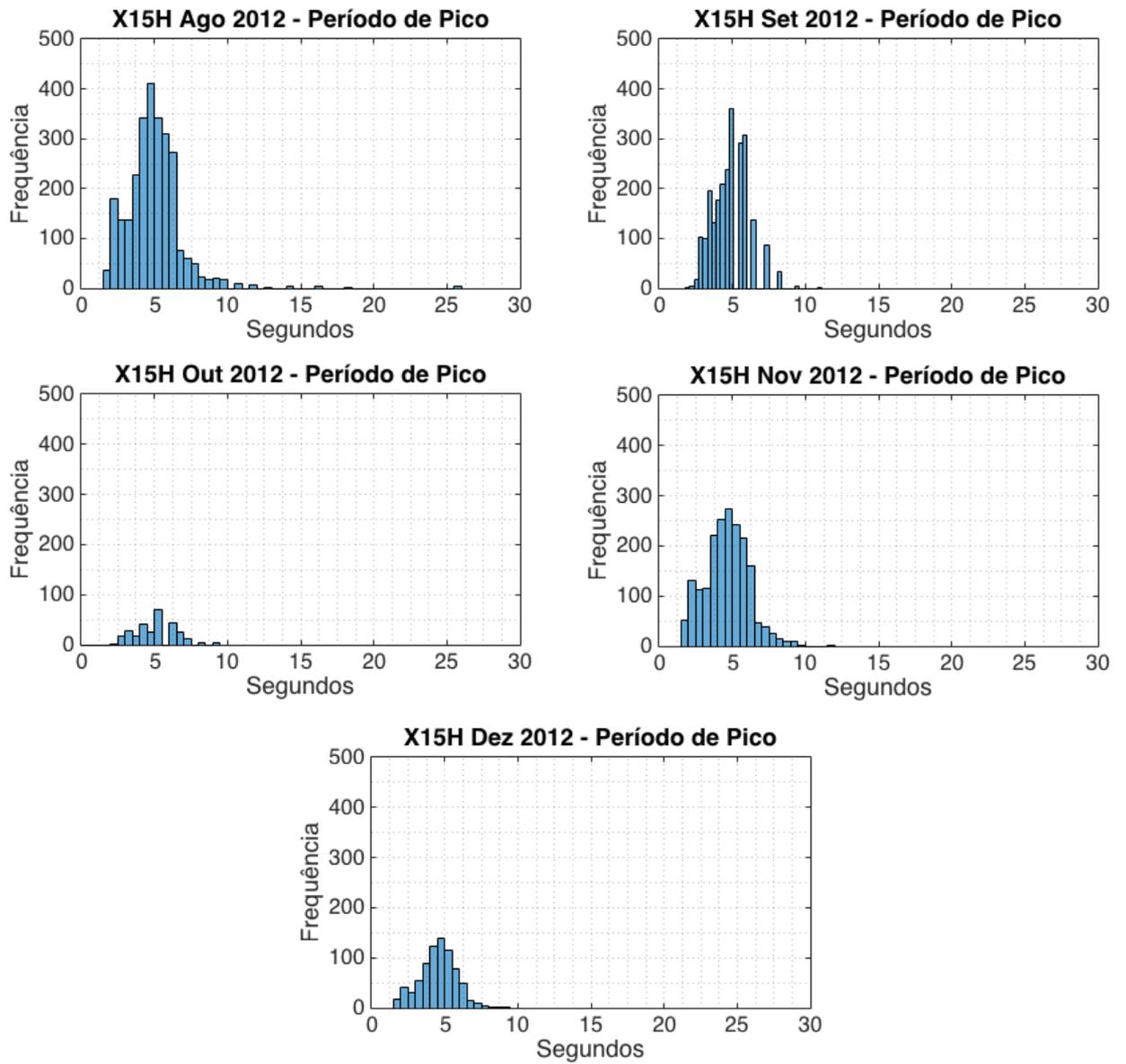


Figura 40. Período de pico das ondas no ponto 15H nos meses de agosto a dezembro.

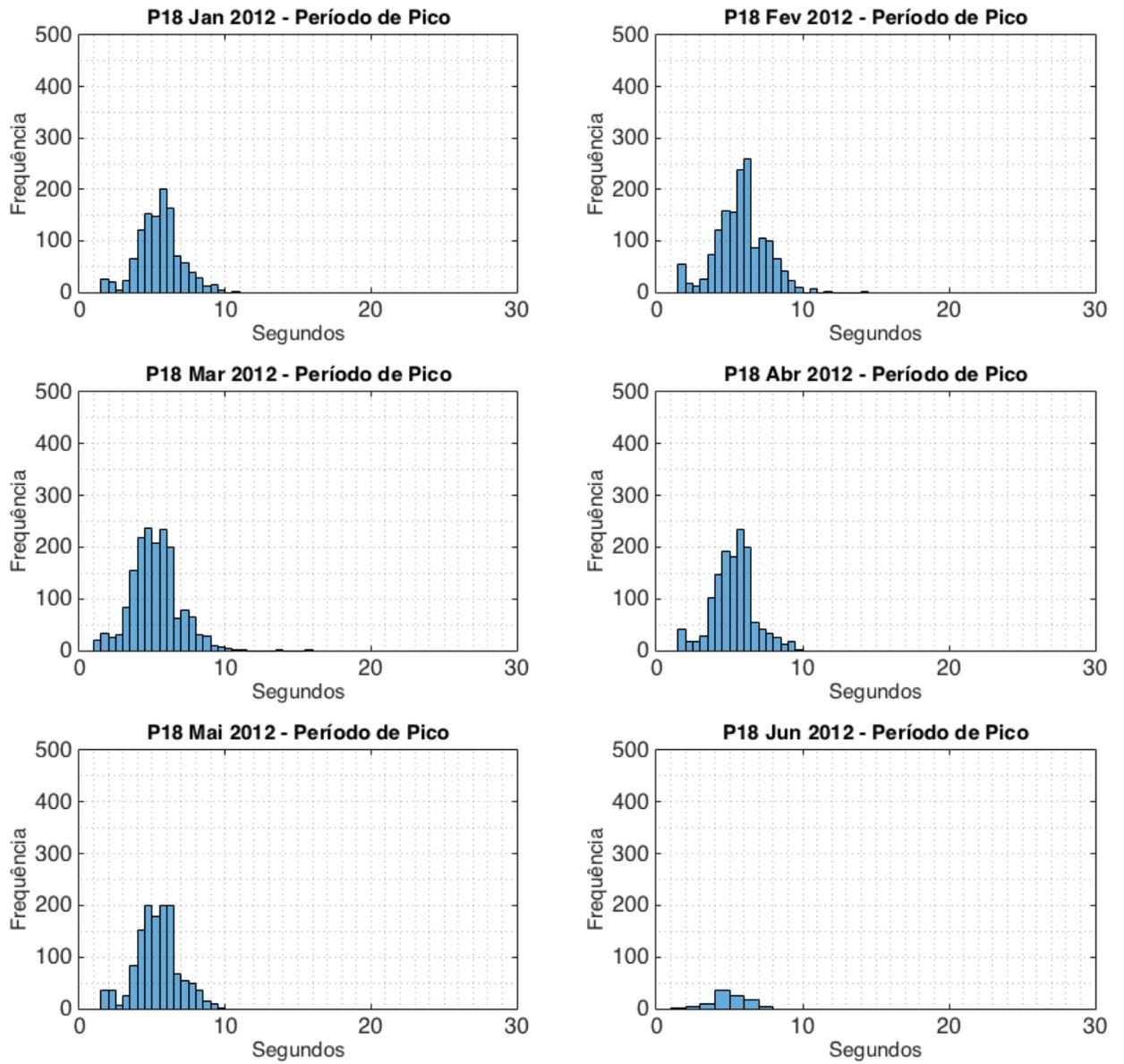


Figura 41. Período de pico das ondas no ponto P18 nos meses de janeiro a junho.

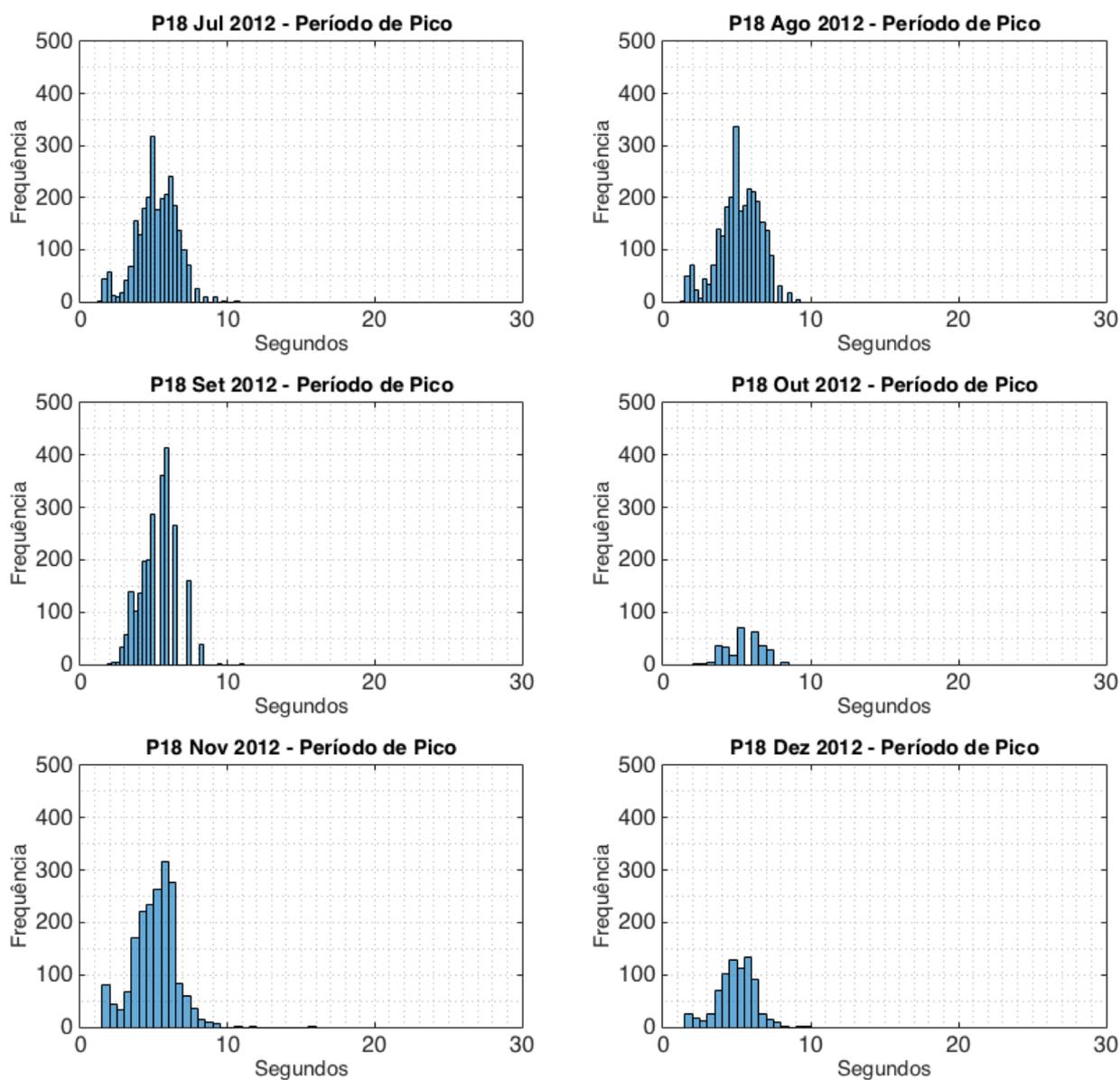


Figura 42. Período de pico das ondas no ponto P18 nos meses de julho a dezembro.

7. Conclusões e recomendações

Durante o estudo, ao analisar os dados observados, percebeu-se que as ondas que se propagam pelo Complexo Estuarino de São Marcos não são geradas somente por vento. Também existem ondas geradas pela movimentação de navios na região, tornando-a muito mais dinâmica, pois a predição de ondas geradas por navios é muito mais complexa que a predição de ondas gerados por vento.

O modelo SW_LHiCEAI foi capaz de simular, de maneira satisfatória, os efeitos de refração e empinamento sofridos pelas ondas no experimento de Berkhoff. Os resultados do modelo quando aplicado para ondas geradas pelo *ferryboat* foram adequados, mostrando o comportamento esperado para esse tipo de onda, tanto em relação a direção de propagação (crista das ondas geradas em forma de V), quanto altura significativa e o período de pico.

As direções predominantes das ondas, em todos os pontos analisados, são de Norte, Nordeste e Noroeste. Deste modo, podem ser relacionadas com os alísios de nordeste. Ondas oriundas de outras direções foram relacionadas com a movimentação de navios na região (tanto do *ferryboat* como dos navios de carga que atacam no Complexo Portuário local).

As ondas que dominam a região do Complexo Estuarino de São Marcos são geradas por ventos locais e o seu comportamento pode ser relacionado com a posição da ZCIT. Notou-se que a frequência e a altura significativa das ondas aumentam de acordo com a época do ano. Na época de seca (segundo semestre do ano), onde a pista de geração de ondas é maior devido ao deslocamento da ZCIT para o Hemisfério Norte, as ondas têm altura significativa e período de pico maiores, se comparadas com o período chuvoso (primeiro semestre do ano).

Para complementar o estudo, futuramente, o modelo SW_LHiCEAI poderá ser aplicado na área do CESM e deste modo, a predição de ondas poderá ser realizada em condições normais e em eventos extremos.

8. Bibliografia

AIRY, G. B., 1841. "**Tides and waves**". In Hugh James Rose, et al. Encyclopædia Metropolitana. Mixed Sciences. 3 (published 1817–1845). Also: "Trigonometry, On the Figure of the Earth, Tides and Waves", 396 pp.

ALMEIDA, L. R.; AMARO, V. E.; MARCELINO, A. M. T.; SCUDELARI, A. C. 2014. **Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira**. Revista da Gestão Costeira Integrada, v. 15, p. 135-151.,

AMARAL, R.F.; ALFREDINI, P. 2010. **Modelação hidrossedimentológica no Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 15, p. 5-14.

ASSELIN, R. 1972. **Frequency Filter for time integrations**. MWR. 100, N 6, 486-490.

BERKHOFF, J. C. W., 1972: "**Computation of Combined Refraction-Diffraction**", Proc. 13 th International Conference on Coastal Engineering, Vancouver.

BERKHOFF, J. C. W., 1973. **Wave Diffraction and Refraction of Water Wave; Derivation and method of solution the two-dimensional Refraction-Diffraction Equation, report on Mathematical Investigation**. Delft Hydraulics Laboratory, Report W 154 – I.

BERKHOFF, J. C. W., 1976. **Mathematical models for simple harmonic linear water waves; Wave Diffraction and refraction**. Delft Hydraulics Laboratory, Publication n° 163.

BERKHOFF, J. C. W., 1982: "**Report on Mathematical Investigation**, Delft Hydraulics Laboratory, Report W 154 part VIII."

CARVALHO, J. T., 2010. **Simulação da distribuição de energia de ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, S.J. Campos

CASULLI, V., 1990. **Semi-implicit finite difference methods for the two-dimensional shallow water equations**. Journal of Computational Physics, Vol. 86, No 1, pp. 56-74.

CASULLI, V., 1999. **A semi-implicit finite-difference method for non-hydrostatic free-surface flows**. Int. J. Numer Methods Fluids, 30, 425-440.

CASULLI, V.; CATTANI, E., 1994. **Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow flow**. Computers & Mathematics with Applications, Vol. 27, No 4, pp. 99-112.

CASULLI, V.; CHENG, R.T., 1992. **Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow**. International Journal for Numerical Methods in Fluids 15, 629–648.

CHWANG, A. T.; CHEN, Y., 2003. **Field measurement of ship waves in Victoria Harbor**. Journal of Engineering Mechanics, 129 (10): 1138-1148.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A., 1984: **“Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists”**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632. ISBN 0-13-940638-1.

DILLENBURG, S. R.; HESP, P. A. 2009. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. 1. ed. Heidelberg: Springer, 2009. v. 107. 380p.

DO CARMO, J. S. A., 2016. **Processos físicos e modelos computacionais em engenharia costeira**. Coimbra: 452 p. ISBN 978-989-26-1152-5. 2016

GODOI, V. A., 2009. **Comparação entre os modelos POM e REF/DIF 1 V 2.5 na estimação do Parâmetro de Elevação da Superfície Livre a partir da Simulação do Experimento de Berkhoff (1982)**. Monografia (Graduação em Meteorologia) – UFRJ, Rio de Janeiro.

GRUBER, A., 1971. **Fluctuations in the Position of the ITCZ in the Atlantic and Pacific Oceans**. National Environmental Satellite Service, NOAA, Washington.

Bits of Science. Em (<http://www.bitsofscience.org/climate-change-amazon-congolese-rainforests-africa-7585/>). Acesso em 20 de junho de 2018.

INNOCENTINI, V.; ARANTES, F. O.; FERREIRA, R. J.; MICHELETO, R. G., 2005. **A Agitação Marítima no Litoral Nordestino do Brasil Associada aos Distúrbios Africanos de Leste**. Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, Brasil.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, Precipitações e Intensidade**

dos Ventos históricos (1961 – 1990) para Ilha de São Luis. Em: (<http://www.inmet.gov.br>). Acesso em 10 de abril de 2017.

LEONARD, B. P. 1979. **A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation.** Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 19, 59-98.

Magic Sea Weed. Shoaling and Refraction. Em (<https://magicseaweed.com/Shoaling-and-Refraction-Article/325/>). Acesso em 10 de janeiro de 2018.

MEIRELLES, S., 2007. **Avaliação da modelagem de ondas superficiais de gravidade quanto ao fenômeno da difração.** Monografia – Universidade Estadual do Rio de Janeiro.

MUNK, W. H., 1944. **Proposed uniform procedure for observing waves and interpreting instrument records.** Scripps Institute of Oceanography, Wave Report N°26. La Jolla, California, USA.

MUNK, W. H., 1951: **Origin and generation of waves.** *Proc. First Coastal Engineering Conference*, Long Beach, Calif., 1–4.

RADDER, A. C., 1978. **On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation.** Dutch Government Public Works Department (RWS). Data Processing Division (DIV); Report n° 78863.

RADDER, A. C., 1979. **On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation.** Journal of Fluid Mechanics, vol. 95, part I.

School Physics. Em (<http://www.schoolphysics.co.uk/>). Acesso em 10 de janeiro de 2018.

SEMEDO, A.; SUSELJ, K.; RUTGERSSON, A.; STERL, A., 2011. **A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40.** Journal of Climate, v. 24, p. 1461–1479.

SOARES, R. A., 2015. **Modelagem do transporte de ictioplâncton no Complexo Estuarino de São Marcos, Maranhão – Brasil.** Dissertação (Mestrado em Recursos Aquáticos e de Pesca) – UFMA, São Luís.

SOUZA FILHO, P. W. M., 2005. **Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas**



usando dados de sensores remotos. Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, n. 4, p. 427–435.

Tasker Milward physics. **Wave Behaviour II.** Em (<http://physics.taskermilward.org.uk>). Acesso em 10 de janeiro de 2018.

WMO, 1998: **World Meteorological Organization - Guide to Wave Analysis and Forecast**, 2° edição.