



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR**  
**CURSO DE OCEANOGRAFIA**

**FRANCISCO BRUNO MOREIRA CARMO**

**ESTUDO DAS CORRENTES COSTEIRAS NAS PROXIMIDADES DO CANAL  
DE NAVEGAÇÃO DO PORTO DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL.**

**FORTALEZA**

**2015**

FRANCISCO BRUNO MOREIRA CARMO

ESTUDO DAS CORRENTES COSTEIRAS NAS PROXIMIDADES DO CANAL DE  
NAVEGAÇÃO DO PORTO DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL.

Monografia apresentada ao Curso de graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Ozilea Bezerra Menezes.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Rui Simões de Menezes

---

C285e Carmo, Francisco Bruno Moreira.

Estudo das correntes costeiras nas proximidades do canal de navegação do porto de Fortaleza, Ceará, Brasil / Francisco Bruno Moreira Carmo – 2015.

48 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso Bacharelado em Oceanografia, 2015.

Orientação: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Ozilea Bezerra Menezes.

Co-Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Correntes marítimas. 2. Circulação oceânica – Ceará, Porto de (Fortaleza, CE). I. Título.

---

CDD 551.462

FRANCISCO BRUNO MOREIRA CARMO

ESTUDO DAS CORRENTES COSTEIRAS NAS PROXIMIDADES DO CANAL DE  
NAVEGAÇÃO DO PORTO DE FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL.

Monografia apresentada ao Curso de graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Ozilea Bezerra Menezes

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Maria Ozilea Bezerra Menezes (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Ms. Samuel Soares Valentim  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Chagas e Neuda.  
À minha avó, Mosa (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Chagas e Francineuda, que me deram o privilégio de viver e fizeram de mim o homem que sou hoje, através de conselhos, apoio na educação e motivação de viver um dia após o outro, além de sempre estarem presentes em todos os momentos importantes da minha vida.

À minha avó Maria Auri “Mosa” (*in memoriam*), pelo amor e carinho.

Aos familiares, que observaram todo esse processo de aprendizado educacional até chegar aqui.

À Profa. Dra. Ozilea pela orientação, palavras de apoio, companheirismo e ajuda para que o projeto fosse concluído com êxito.

Ao Prof. Dr. Carlos, por ter sido meu coorientador, ajudando na parte referente ao tratamento de dados, e também pela paciência.

Ao Samuel Valentim, pela ajuda na configuração e programação do equipamento utilizado durante os embarques.

Ao Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini “Guto”, pelo conhecimento passado em sala de aula e durante as atividades de campo que contribuíram para o sucesso das campanhas, além das dicas no processamento de dados.

À Profa. Dra. Lidriana, pelo empréstimo de equipamentos.

Ao Prof. Dr. Geraldo, pela ajuda na obtenção dos dados de intensidade e direção dos ventos do INMET.

Aos meus colegas do LABOMAR, que estudaram comigo ao longo do curso, em especial, Andréa “Presidente”, Andréa “Consola”, Bruno Catunda, Cecília, Clarissa, Ítalo “Goisão”, Jailton, José Filho, Lucas, Liana, Pedro Paulo, Pedry Frederico, Rayza, Rodolfo, e aos colegas do Laboratório de Oceanografia Física.

Ao Gleidson, pela ajuda na confecção dos mapas e disponibilidade de tempo para o ensino de como deve ser configurado alguns equipamentos.

Ao Eduardo Franklin e aos outros colegas que estavam a bordo da embarcação, pela ajuda durante os embarques.

Às instituições que financiaram o trabalho; à FINEP, pelo financiamento do projeto Gestão e segurança da navegação e do transporte aquaviário: desenvolvimento ambientalmente sustentável de sistemas marítimos e fluviais (TRANSAQUA); e à Companhia Docas do Ceará (CDC) e Secretaria de Portos (SEP) pelo financiamento do projeto Plano Básico de Monitoramento da Dragagem de Aprofundamento do Porto de Fortaleza.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento.” (Albert Einstein)

## RESUMO

Este estudo avalia a variabilidade temporal das correntes nas proximidades do canal de navegação do Porto de Fortaleza, investigando a influência das componentes astronômica, de alta frequência e sub-mareais das correntes. Para a aquisição dessas informações, fez-se uso de um Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Doppler (ADCP) da marca *SonTek*® que foi fundeado próximo a isóbata de 15 m para a obtenção de dados de magnitude e direção das correntes entre o período de 10 de janeiro a 27 de fevereiro de 2015. Dados de vento para o mesmo período de fundeio foram obtidos para uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no bairro Castelão em Fortaleza, Ceará. As correntes longitudinal (U) e transversal (V) ao canal de navegação foram decompostas em termos de componente harmônica ( $U_h$  e  $V_h$ ), através da análise harmônica; de alta frequência ( $U_{af}$  e  $V_{af}$ ), selecionada por filtragem; e sub-mareais ( $U_v$  e  $V_v$ ), decomposta pela subtração das componentes astronômica e de alta frequência. A variância do sinal foi utilizada para quantificar a energia contida nas bandas de cada componente.  $U_h$  e  $V_h$  apresentaram 63,7 e 62,8%;  $U_{af}$  e  $V_{af}$ , 18,1 e 24,7%;  $U_v$  e  $V_v$ , 18,2 e 12,5%, respectivamente. Portanto, de acordo com as análises realizadas neste trabalho durante o período em questão, as componentes astronômicas, com atuação contínua do vento, são agentes primários das alterações na hidrodinâmica nas proximidades do canal de navegação do Porto de Fortaleza. Tanto a componente longitudinal como a transversal da corrente de maré tem influência majoritária na circulação das águas nessa região, ou seja, a circulação é causada predominantemente pela corrente de maré de forma quantitativa, e dos ventos de forma qualitativa.

**Palavras-Chave:** Correntes. Circulação de plataforma. Porto de Fortaleza.

## ABSTRACT

This study evaluates the temporal variability of currents nearby to the navigation channel of the Port of Fortaleza, investigating the influence of astronomical, high-frequency and sub-tidal components of the currents. Magnitude and direction data of the currents were obtained with a moored *SonTek*® Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) near the isobath of 15 m for the period between January 10 and February 27 of 2015. Wind data were obtained for the same period at a weather station located at Castelão neighborhood in Fortaleza, Ceará. The current was initially broken down into its along-shelf (U) and cross-shelf (V) components. The harmonic components ( $U_h$  and  $V_h$ ) were decomposed by harmonic analysis. The high-frequency components ( $U_{af}$  and  $V_{af}$ ) were selected by filtering. The sub-tidal ( $U_v$  and  $V_v$ ) were obtained by subtraction of harmonic and high-frequency components. The energy of the components was quantified by variance analysis. The results are  $U_h$  and  $V_h$ , 63,7 and 62,8%;  $U_{af}$  and  $V_{af}$ , 18,1 e 24,7%;  $U_v$  e  $V_v$ , 18,2 e 12,5%, respectively. Therefore, according to the analysis performed for the study during this period, the astronomical components, including the continual action of the wind, are primary agents of the changes that happen in the hydrodynamic phenomena nearby to the navigation channel of the Port of Fortaleza. So, both  $U_h$  and  $V_h$  components of the tidal current have the majority influence in the circulation of water in this region, in other words, the circulation is caused mainly by the tidal currents, quantitatively, and winds, qualitatively.

**Keywords:** Currents. Shelf Circulation. Port of Fortaleza.

## LISTA DE FIGURAS

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 1 -  | ADCP acoplado a uma estrutura metálica para fundeio.....   | 20 |
| Figura 2 -  | Ponto de fundeio do ADCP na carta náutica.....   | 21 |
| Figura 3 -  | Embarcação utilizada nas duas campanhas.....   | 22 |
| Figura 4 -  | Mergulho autônomo para instalação e resgate do ADCP.....   | 23 |
| Figura 5 -  | Série temporal de amplitude acústica.....  | 24 |
| Figura 6 -  | Estação meteorológica do INMET.....  | 24 |
| Figura 7 -  | Ponto de localização da estação meteorológica do INMET, indicando a distância do ponto de fundeio.....   | 25 |
| Figura 8 -  | Ocorrência das direções das correntes antes da rotação, com desvio magnético corrigido.....  | 26 |
| Figura 9 -  | Ocorrência das direções dos ventos antes da rotação, adotando a convenção oceanográfica do sentido do vento.....   | 27 |
| Figura 10 - | Variação do nível da água durante o período de fundeio.....  | 31 |
| Figura 11 - | Série temporal da temperatura da água.....   | 32 |
| Figura 12 - | Séries temporais horárias de: (A) Intensidade e (B) Direção das correntes.....   | 33 |
| Figura 13 - | Séries temporais horárias de: (A) Intensidade e (B) Direção dos ventos.....  | 34 |
| Figura 14 - | Séries temporais horárias da componente longitudinal decomposta: (A) U – corrente longitudinal original; (B) $U_h$ – componente longitudinal harmônica; (C) $U_{af}$ – componente longitudinal de alta frequência; (D) $U_v$ – componente longitudinal sub-mareal..... | 36 |
| Figura 15 - | Séries temporais horárias da componente transversal decomposta: (A) V – corrente transversal original; (B) $V_h$ – componente transversal harmônica; (C) $V_{af}$ – componente transversal de alta frequência; (D) $V_v$ – componente transversal sub-mareal.....      | 37 |
| Figura 16 - | Variâncias da (A) componente longitudinal harmônica – $U_h$ , (B) componente transversal harmônica - $V_h$ e (C) total.....  | 38 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 17 - | Variação do constituinte harmônico M2 nos níveis, levando-se em consideração (A) eixo maior, (B) eixo menor, (C) inclinação e (D) fase da elipse de maré.....   | 39 |
| Figura 18 - | Variação do constituinte harmônico S2 nos níveis, levando-se em consideração (A) eixo maior, (B) eixo menor, (C) inclinação e (D) fase da elipse de maré.....   | 40 |
| Figura 19 - | Séries temporais horárias: (A) componente longitudinal do vento bruto e filtrado (U bruto e U filtrado) e (B) componente transversal do vento bruto e filtrado (V bruto e V filtrado).....  | 43 |
| Figura 20 - | Séries temporais horárias: (A) componente longitudinal da corrente sub-mareal (Uv) e componente longitudinal do vento filtrada (U filtrada) e (B) componente transversal da corrente sub-mareal (Vv) e componente transversal do vento filtrada (V filtrada)..... | 44 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 - Características técnicas do ADCP Sontek de 750 kHz .....               | 22 |
| Quadro 2 - Principais constituintes harmônicos em termos de amplitude e fase..... | 30 |

## SUMÁRIO

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 12 |
| 1.1      | INFLUÊNCIA DA CORRENTE E DO VENTO NA CIRCULAÇÃO.....                                   | 14 |
| 1.2      | ÁREA DE ESTUDO.....  | 16 |
| 1.3      | OBJETIVOS.....   | 18 |
| 1.3.1    | <b>Objetivo Geral</b> .....  | 18 |
| 1.3.2    | <b>Objetivos Específicos</b> .....   | 18 |
| <b>2</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | 19 |
| 2.1      | AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS.....  | 19 |
| 2.1.1    | <b>Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler - ADCP</b> .....                | 19 |
| 2.1.2    | <b>Estação meteorológica do INMET</b> .....  | 24 |
| 2.2      | DIREÇÃO E INTENSIDADE DAS CORRENTES E DOS VENTOS.....                                  | 25 |
| 2.3      | DECOMPOSIÇÃO DA CORRENTE.....  | 28 |
| 2.3.1    | <b>Decomposição do vento</b> .....   | 29 |
| <b>3</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | 30 |
| 3.1      | DESCRIÇÃO DOS DADOS.....   | 30 |
| 3.1.1    | <b>Nível da água e temperatura</b> .....   | 30 |
| 3.1.2    | <b>Correntes</b> .....   | 32 |
| 3.1.3    | <b>Ventos</b> .....  | 33 |
| 3.2      | DECOMPOSIÇÃO DAS CORRENTES.....  | 34 |
| 3.3      | CORRELAÇÃO DAS COMPONENTES DAS CORRENTES SUB-MAREAIS E DAS COMPONENTES DOS VENTOS..... | 42 |
| <b>4</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | 45 |
| <b>5</b> | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 46 |

## 1 INTRODUÇÃO

Este estudo foi realizado com a finalidade de se ter um monitoramento das correntes costeiras nas proximidades do canal de navegação do Porto de Fortaleza, visando principalmente à segurança da navegação naquele entorno. O órgão de fomento a pesquisa foi a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), que proporcionou todo o recurso financeiro necessário para o projeto ser concluído com êxito.

Este estudo faz parte do projeto de âmbito nacional chamado Gestão e segurança da navegação e do transporte aquaviário: desenvolvimento ambientalmente sustentável de sistemas marítimos e fluviais (TRANSAQUA), que tem como participantes a Universidade Federal do Rio Grande (FURG), a Universidade Federal do Ceará (UFC), a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

As áreas de estudo de cada uma das universidades citadas são estas: o porto de Rio Grande, Rio Grande do Sul, o porto de Fortaleza, Ceará, o porto de Suape, Pernambuco, e o porto de Mucuri, Bahia, respectivamente. A área de estudo escolhida para este trabalho foi nas proximidades do canal de navegação do Porto de Fortaleza, por questões de logística, já que o porto está localizado dentro da cidade.

O projeto TRANSAQUA conta com cinco redes de estudo. As redes são estas: gestão ambiental portuária, monitoramento continuado de propriedades físicas, modelagem numérica de sistemas aquaviários, estudos geoespaciais e gestão integrada do projeto.

A rede de monitoramento continuado de propriedades físicas, que se trata de uma das cinco redes do projeto TRANSAQUA citadas acima, na qual este presente estudo no Porto de Fortaleza está inserido, tem como objetivo a avaliação do estado atual do processo de aquisição de dados ambientais que dão suportes às atividades portuárias, tanto no que diz respeito à segurança da navegação quanto às questões pertinentes ao licenciamento ambiental nos portos relacionados com a proposta, bem como o estabelecimento de um protocolo mínimo de monitoramento continuado, desde a instalação de sensores, o gerenciamento e processamento da informação até sua disponibilização e divulgação (FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE, 2014).

As obras de engenharia costeira existem sempre associadas a áreas onde se desenvolvem atividades humanas, em particular frentes urbanas de elevada densidade populacional, áreas portuárias e embocaduras de rios que, de alguma forma, se encontram ameaçadas pelo desenvolvimento natural dos processos costeiros (JESUS, 2014).

O transporte marítimo de mercadorias caracteriza-se como sendo barato e de vital importância para o Brasil. Partindo-se da importância desse tipo de transporte, os portos são pontos estratégicos para o movimento da economia mundial. Oliveira, Menezes e Maia (2013) definem portos como sendo áreas abrigadas das ondas e correntes, localizadas e ligadas ao mar por entrada navegável, com profundidade adequada a permitir o atracamento de barcos e navios, e com pessoal e serviços necessários à movimentação de carga e ao estoque temporário desta, bem como o embarque e desembarque de passageiros.

Para que um porto possa receber embarcações de maior calado é necessário que haja um canal navegável de acordo com o porte do navio. Por conta dessa problemática e, também, para que o comércio não fique restrito a somente alguns tipos de navios de pequeno porte, várias obras de dragagem são realizadas no mundo todo com o objetivo de aumentar a profundidade do canal de navegação, e, assim, possibilitar que outras embarcações de maior porte possam navegar e distribuir suas mercadorias ou transportar passageiros em várias partes do mundo.

Serviços de dragagem são comuns como obras de melhoramento de portos, podendo representar vultosos investimentos (ALFREDINI; ARASAKI, 2009). A dragagem apresenta-se como a remoção de sedimentos por meio de escavação em áreas marinhas rasas ou em corpos de água doce, visando recolher os sedimentos de fundo para que possam ser depositados em outra localidade. O equipamento utilizado para esse fim chama-se draga, e define-se como um instrumento hidráulico ou mecânico para raspar o fundo do mar.

Pelo fato da área de estudo já ter passado por um processo de serviço de dragagem em 2009, é importante que haja uma contextualização de como funciona o procedimento e qual o instrumento utilizado, como citado acima.

Em linhas gerais, esse estudo tem como objetivo a circulação costeira e sua variabilidade temporal próxima ao canal de navegação, pois estudos dessa natureza são raros na plataforma de Fortaleza.

## 1.1 INFLUÊNCIA DAS CORRENTES E DOS VENTOS NA CIRCULAÇÃO

Levando-se em consideração as características morfológicas gerais das plataformas continentais, que são uma extensão do continente submerso, conforme Cainelli & Mohriak (1999), são extensas, planas e rasas, e atuam modulando as forçantes hidrodinâmicas como marés, ondas e correntes. Seu contraste em relação aos oceanos abertos está na interação das correntes com o fundo marinho e a linha de costa (FROTA, 2015).

Além de ser afetado pela morfologia local, o transporte de águas em regiões costeiras tem seus movimentos associados a forças astronômicas, meteorológicas, gradientes baroclínicos, entre outras (COLLING *et al.*, 1989).

As forçantes astronômicas regem o fenômeno das marés, que possuem íntima relação com o aumento da velocidade das correntes de maré quando ocorre a diminuição da profundidade do local em questão, e também com o aumento de sua amplitude em períodos de sizígia, aumentando a intensidade das correntes.

As correntes mudam de direção continuamente devido ao ciclo de maré quando em regiões costeiras abertas, em resposta ocorre rotação dos vetores de velocidade que influenciam diretamente a magnitude e a direção das correntes sobre a plataforma (WRIGHT, 1995).

Na enchente, a corrente de maré nas proximidades do porto tem a direção sudeste, com velocidade média de 0,5 m/s; na vazante, tem a direção oeste-noroeste, com metade da velocidade média observada na enchente (ROTEIRO COSTA NORTE/DHN, 1993).

Para estudar o comportamento das correntes costeiras da região de Fortaleza e determinar os fatores de maior importância na circulação no litoral, Maia (1998) realizou uma série de campanhas de medições de correntes em sete estações distribuídas ao longo do litoral de Fortaleza, durante o período seco (setembro a novembro) e chuvoso (março a maio). Em cada estação as direções e velocidades das correntes foram medidas por meio de um correntômetro da marca Hidrocean, em perfis verticais de profundidade a intervalos de 1 metro e durante um ciclo completo das marés de sizígia e quadratura.

Paralelamente a estas medidas, foram registrados valores de velocidade e direção dos ventos e a salinidade e temperatura da coluna de água. Foi também

realizado uma série de estudos utilizando flutuadores, principalmente na zona do porto.

A partir disso, a direção predominante observada foi de oeste-noroeste, com variações entre oeste-sudoeste e norte-noroeste. Durante o período seco os valores variaram entre 0,22 e 0,68 m/s, com média de 0,34 m/s, enquanto que no período chuvoso a variação foi de 0,08 a 0,58 m/s, com média de 0,25 m/s, indicando uma velocidade média inferior a do período seco (MAIA, 1998).

Os dados obtidos na porção externa do porto indicaram a influência das correntes costeiras na predominância do sentido leste-oeste das observações realizadas. Verificou-se ainda, através de estudos com flutuadores na Praia do Futuro, que a velocidade das correntes próximas à linha de costa de Fortaleza variam de 0,24 a 0,31 m/s (MAIA, 1998).

A ação meteorológica ocorre por meio dos ventos remotos e locais. Estes influenciam na hidrodinâmica oceânica através de uma ação direta. Sendo a dinâmica de sua atuação relativa ao tamanho da pista de atuação, intensidade e duração do vento atuante (THURMAN, 1997). Já aqueles agem sobre as camadas de água superficiais do oceano, gerando correntes superficiais marinhas. Isto ocorre devido à transferência de energia da atmosfera ao oceano. Esta energia é transferida das camadas superficiais para as mais profundas, devido às forças friccionais de cisalhamento que atuam de forma diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do vento (COLLING et al., 2001; DOYLE, 2002).

Enquanto a energia é transferida para as camadas de água subsequentes, vórtices turbulentos são formados e o movimento das águas superficiais é transferido, em parte, para as camadas mais profundas (FROTA, 2015).

A característica dos ventos na região Nordeste do Brasil é a presença de um forte ciclo estacionário definido por um período anual. Os ventos são controlados pelo movimento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que se move de norte a sul com as mudanças das estações. A ZCIT é uma grande região onde confluem os ventos alísios de nordeste e sudeste. É caracterizada pela intensa nebulosidade e pela baixa pressão atmosférica (MAIA, 1998).

As direções predominantes dos ventos no litoral cearense são de sudeste, leste-sudeste, leste e nordeste. As médias de velocidade chegam a superar os 4,5 m/s nos meses mais secos (MEIRELES, 2008).

A ocorrência dos ventos é controlada principalmente pelos alísios de nordeste e sudeste e pelo regime de brisas terrestres e marinhas, que é fortemente atuante no Ceará e alinhada aos alísios (AMARANTE, 2001).

Os alísios de sudeste dominam durante os períodos de inverno e primavera, enquanto que nos meses de verão e outono, o predomínio é de ventos de leste, com ocorrências de sudeste, nordeste e uma parcela reduzida de noroeste (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROGRÁFICAS/SECRETARIA DE PORTOS, 2014).

A circulação devido a gradientes baroclínicos está relacionada à distribuição da salinidade e temperatura. Sua atuação pode ser evidenciada em reposta à entrada de água doce, proveniente da drenagem continental e aos maiores fluxos de calor na zona costeira em relação ao oceano aberto. Isso resulta em áreas que apresentam gradientes horizontais de salinidade, temperatura e densidade relativamente grandes o que acaba por causar mudanças nas correntes (BOWDEN, 1983).

Alterações nas forçantes citadas como mudanças na intensidade e direção das correntes, mudanças climáticas, entre outras, podem causar assoreamento de complexos portuários e canais de navegação, erosão de áreas litorâneas, alteração de zonas de pesca e destruição de infraestrutura costeira (FROTA, 2015).

Essas mudanças são prejudiciais para a população mundial que, em geral, vivem e dependem de recursos das zonas costeiras, sejam por motivos econômicos ou, somente, pelo lazer.

## 1.2 ÁREA DE ESTUDO

O Porto de Fortaleza está situado na enseada do Mucuripe, no município de Fortaleza, Estado do Ceará, Brasil, possuindo um canal de acesso de 3500 m de extensão, 160 m de largura e 14 m de profundidade média. O cais acostável tem uma extensão de 1.054 m em concreto armado, na orientação leste-oeste (COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ, 2015).

Possui uma bacia de evolução com razoáveis condições de manobra, e a região onde está localizado apresenta uma linha de costa de particular conformação, onde se destaca a mudança de seu alinhamento entre a Praia do Futuro e aquela

onde se encontra o porto. Esta diferença no alinhamento das praias dá origem a uma enseada (PITOMBEIRA, 1976).

Os primeiros estudos para a implantação de um porto em Fortaleza foram feitos em 1875, através do Projeto de Hawkshaw, que resultou negativo, devido ao grande assoreamento resultante. Sucederam-se estudos para a construção de um quebra-mar acostável. Finalmente, em 1929, a ideia de um porto na enseada do Mucuripe foi considerada definitiva, sendo as obras iniciadas em 1939, sem terem sido feitos os necessários estudos das condições oceanográficas e sedimentológicas da área adjacente (MORAIS, 1972).

A primeira consequência da não realização de tais estudos fez-se sentir logo após a construção do porto. Uma corrente para sentido noroeste e aproximadamente paralela à Praia do Futuro, carregada de sedimentos em suspensão, encontrou o molhe do porto como obstáculo ao seu curso normal, em direção à plataforma continental (MORAIS, 1972). Quando a corrente incidia no molhe, ocorria depósito de sedimentos ao longo do dique, criando a Praia Mansa, e havia erosão da Praia de Iracema.

O molhe construído ocasionou uma deformação das ondas incidentes sobre esta região costeira, ocorrendo então a entrada de ondas difratadas na bacia de evolução do porto em questão. (PITOMBEIRA, 1976).

Há alguns anos, foi realizada uma dragagem no canal de navegação do Porto de Fortaleza, que antes possuía uma profundidade média de 8 m. Através de um estudo feito em 2007 a partir de 5030 pontos de batimetria referentes ao canal do Porto, evidenciou-se que a profundidade média para esta região era de 10,11 m com presença de picos máximos na ordem de aproximadamente 14 m e desvio padrão de 2,75 m (FARIAS, MAIA, 2012).

O Porto de Fortaleza permite a movimentação dos diferentes tipos de carga: granéis sólidos, como grãos e cereais, granéis líquidos, como derivados de petróleo, carga geral solta e containerizada, além do fluxo de navios de passageiros. Possui um cais comercial acostável com 20 m de largura e 1.116 m de extensão com 5 berços de atracação, com profundidades que variam de 5 m a 11,5 m. A Companhia Docas do Ceará é a autoridade portuária no Porto de Fortaleza (OLIVEIRA, MENEZES, MAIA, 2013).

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Ampliar o conhecimento existente da hidrodinâmica através do levantamento de dados oceanográficos na região do Porto de Fortaleza.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Caracterizar a estrutura hidrodinâmica quanto à correntometria e sua variabilidade temporal nos primeiros meses do ano de 2015.

Avaliar as características dos ventos locais com relação à intensidade e direção da velocidade nos primeiros meses do ano de 2015.

Avaliar se a circulação das águas é causada predominantemente pela influência das marés ou dos ventos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

Foram realizadas 3 campanhas de 13 horas para a coleta de perfis de salinidade e temperatura através de um sonda da marca YSI®, que foi calibrada antes de cada campanha. A cada hora a sonda era programada para coletar dados a cada 3 s, e, então, era colocada cuidadosamente na água da superfície até o fundo, soltando o cabo aos poucos para a coleta dos parâmetros de salinidade e temperatura em cada uma das 13 horas. As campanhas aconteceram nos dias 10 de janeiro, 24 de março e 6 de maio de 2015. O perfilador acústico de correntes por efeito Doppler (ADCP) foi fundeado no dia 10 de janeiro de 2015 e retirado no dia 28 de fevereiro de 2015. Os dados de vento foram coletados por meio de uma estação meteorológica durante o mesmo período de coleta de dados do ADCP. A aquisição e tratamento de dados do ADCP e da estação meteorológica estão descritos abaixo.

#### 2.1.1 Perfilador acústico de correntes por efeito Doppler- ADCP

A coleta de dados foi efetuada durante um período de aproximadamente 48 dias, entre os dias 10 de janeiro e 27 de fevereiro de 2015. Durante esse período, um perfilador acústico de correntes por efeito Doppler (ADCP), representado na figura 1, foi fundeado nas coordenadas 3°41,739' S e 38°29,081' W no sistema de coordenadas geográficas, próximo ao canal de navegação do Porto de Fortaleza (figura 2), a cerca de 3 km da costa, a 400 m do espigão e a uma profundidade de aproximadamente 15 m. O modelo utilizado no estudo foi o Argonaut-XR de 750 kHz da marca *SonTek*®. A descrição de suas principais características, sumarizadas no quadro 1, pode ser obtida no manual do equipamento (SONTEK, 2001).

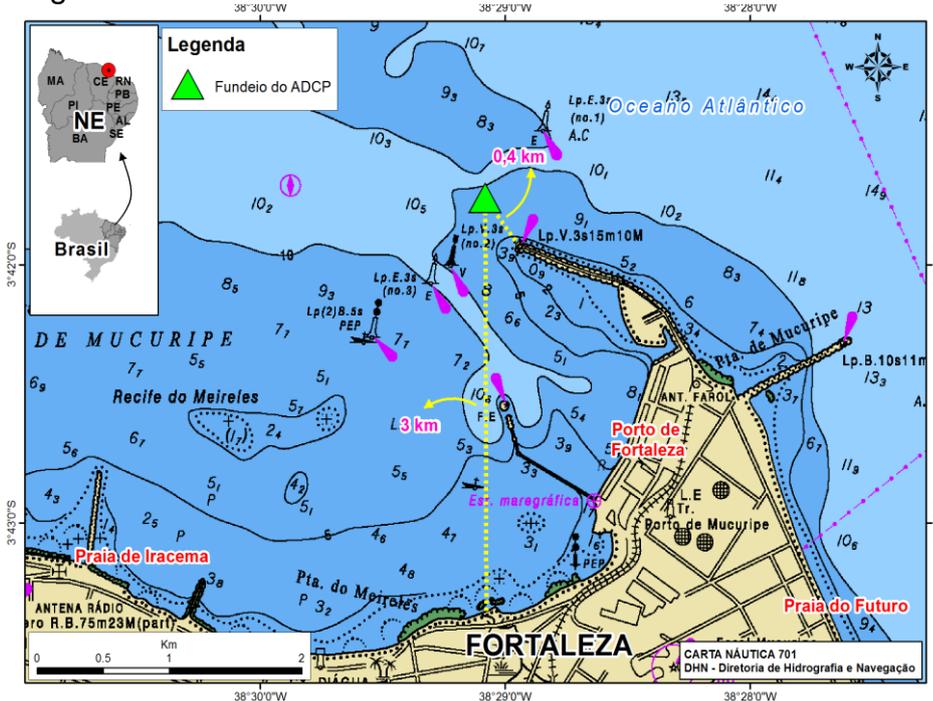
Figura 1 – ADCP acoplado a uma estrutura metálica para fundeio.



Fonte: o autor, 2015.

O ADCP foi fixado a uma poita de concreto de aproximadamente 220 kg, transportado por uma pequena embarcação (batera) que estava amarrada ao barco utilizado nas campanhas (figura 3), e depois fundeado com apoio de mergulho autônomo (figura 4), nas coordenadas citadas acima. Durante o período do fundeio foram realizadas duas campanhas, uma para instalação e outra para o resgate do equipamento. O instrumento foi recuperado a bordo; as incrustações retiradas; os dados, armazenados em sua memória interna, descarregados através de um computador portátil; e depois reinstalado sobre a poita de concreto para uma futura aquisição de dados.

Figura 2 – Ponto de fundeio do ADCP na carta náutica



Fonte: o autor, 2015.

O ADCP foi configurado para registrar dados em intervalos horários, com médias de 180 s, com blank de 0,8 m. O tamanho da célula adotado foi de 2 m, com o tamanho da primeira célula de 0,5 m e da última de 20 m, considerando a profundidade máxima de 20 m, pois antes do embarque essa profundidade foi estimada. O ADCP registrou dados de temperatura, magnitudes longitudinal (U) e transversal (V) das correntes, pressão e amplitude do feixe acústico na extensão .arg. Utilizando o software ViewArgonaut, os dados foram convertidos para o formato ascii, para que o processamento fosse realizado utilizando rotinas do software *Matlab*®, da Mathworks Inc. ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)).

Foi realizada a eliminação de dados espúrios. Primeiro, caso os dados de pressão sejam positivos ou próximos de zero, isto indica que o equipamento está fora da água e estes dados devem ser descartados.

Quadro 1 – Características técnicas do PACD Sontek de 750 kHz.

| <b>Especificações</b>      | <b>Características</b> |
|----------------------------|------------------------|
| Alcance máximo             | 40 m                   |
| Bateria                    | 0,2 a 0,3 W            |
| Blank                      | 0,8 m                  |
| Largura do feixe           | 2°                     |
| Memória                    | 63 Mb                  |
| Número de feixes           | 3                      |
| Número máximo de células   | 10                     |
| Pressão                    | 0 a 200 m              |
| Range de temperatura       | -5° a 40°C             |
| Resolução da bússola       | 0,1°                   |
| Tamanho das células        | 0,5 a 2 m              |
| Taxa de amostragem         | 1 Hz                   |
| Velocidade mínima e máxima | +/- 6 m/s              |

Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

Figura 3 – Embarcação utilizada nas duas campanhas.



Fonte: o autor, 2015.

Figura 4 – Mergulho autônomo para instalação e resgate do ADCP.

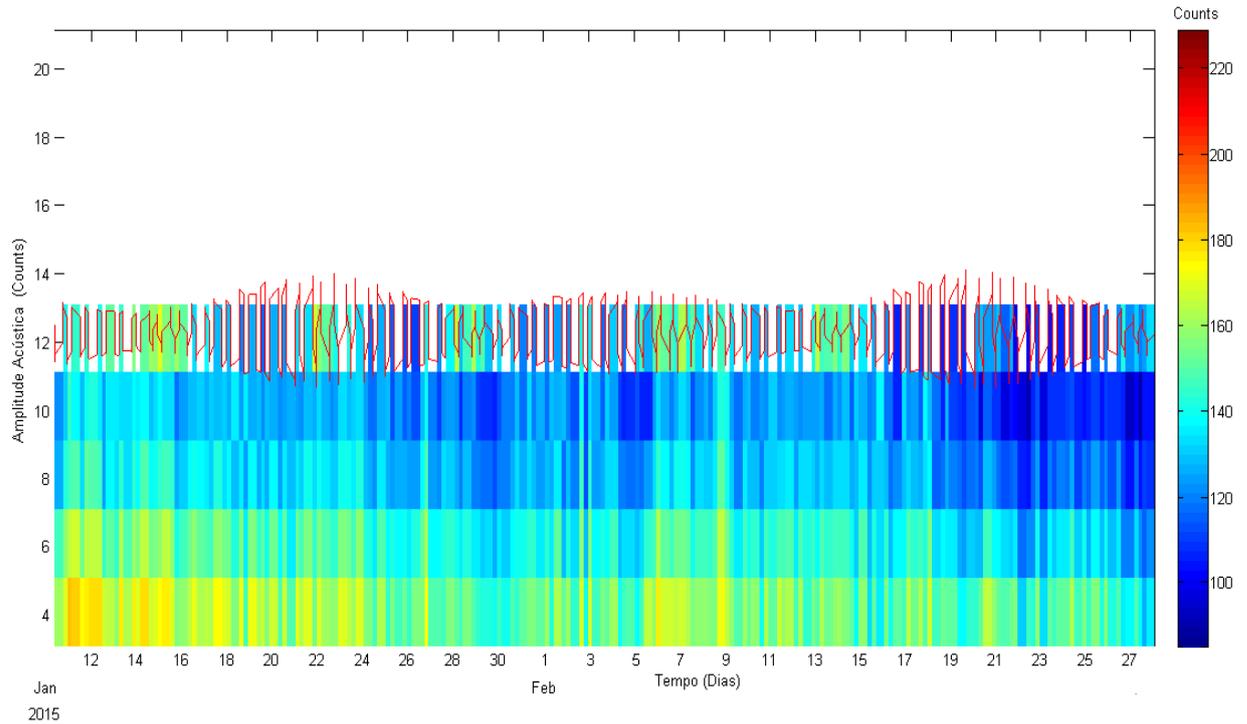


Fonte: o autor, 2015.

Segundo, o número de células pré-configuradas excede o tamanho da coluna de água, assim existem células válidas (que estão no interior da coluna de água) e células inválidas (que se encontram acima da superfície da água).

As células válidas variam com o tempo e é facilmente observadas através da média da série temporal de amplitude acústica (figura 5). Foi aplicada a metodologia semelhante a de Frota (2015), no qual os dados contidos nas células mais próximas da superfície também devem ser descartados, devido ao elevado ruído causado por oscilações de alta frequência como processos turbulentos. A partir disso, pode-se visualizar na figura 5 que há somente 5 células válidas das 10 células configuradas, havendo 5 profundidades de interesse. A variação das 5 profundidades ocorrem de 11,1 a 3,1 m, com cada camada sendo de 2 m, então há as profundidades de 11,1; 9,1; 7,1; 5,1; e 3,1 m do fundo para a superfície.

Figura 5 – Série temporal de amplitude acústica.



Fonte: o autor, 2015.

### 2.1.2 Estação Meteorológica do INMET

Dados de vento foram disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) através do site do Instituto Nacional de Meteorologia. A estação meteorológica escolhida foi a Fortaleza A305, indicada na figura 6.

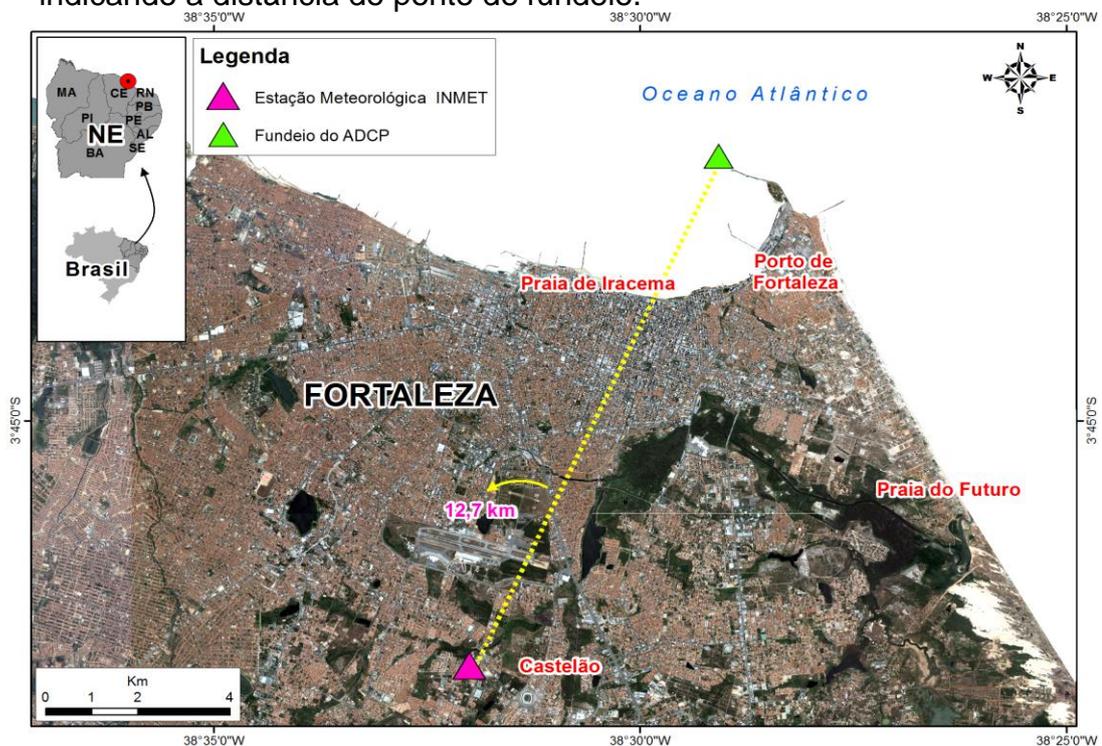
Figura 6 – Estação meteorológica do INMET.



Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015.

A estação meteorológica está localizada no bairro Castelão em Fortaleza, Ceará, a uma distância de aproximadamente 12,7 km do ponto de fundeio do ADCP. As coordenadas do ponto da estação meteorológica Fortaleza A305 são  $3^{\circ}48' S$  e  $38^{\circ}32' W$  no sistema de coordenadas geográficas (figura 7). Os sensores de intensidade e direção dos ventos ficam a 2 m do nível do solo e a estação está a 30 metros de altitude. A periodicidade dos dados é de 1 hora. Os dados também foram tratados em rotinas no software *Matlab*®.

Figura 7 – Ponto de localização da estação meteorológica do INMET, indicando a distância do ponto de fundeio.



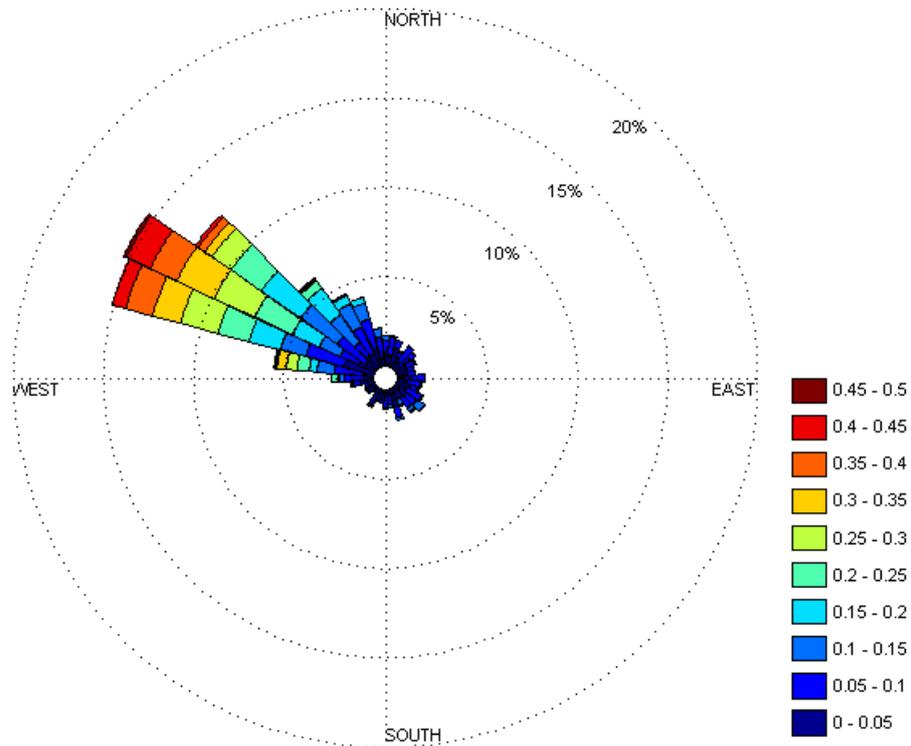
Fonte: o autor, 2015.

## 2.2 DIREÇÃO E INTENSIDADE DAS CORRENTES E DOS VENTOS

As componentes longitudinal (U) e transversal (V) da corrente e do vento foram rotacionadas para que ficassem dispostas de forma paralela e transversal à orientação do canal de navegação, respectivamente. Para isso, foi construído um histograma com as direções resultantes das correntes. Inicialmente foi adotada uma convenção de rotação para o sentido anti-horário em  $90^{\circ}$ , pois o software *Matlab*® tem outro tipo de notação para o comando adotado para a representação gráfica, então as correntes foram rotacionadas para o sentido anti-horário em  $33^{\circ}$  com base

na moda do histograma. A figura 8 mostra a distribuição das direções majoritárias das correntes com suas respectivas intensidades (m/s) antes da rotação.

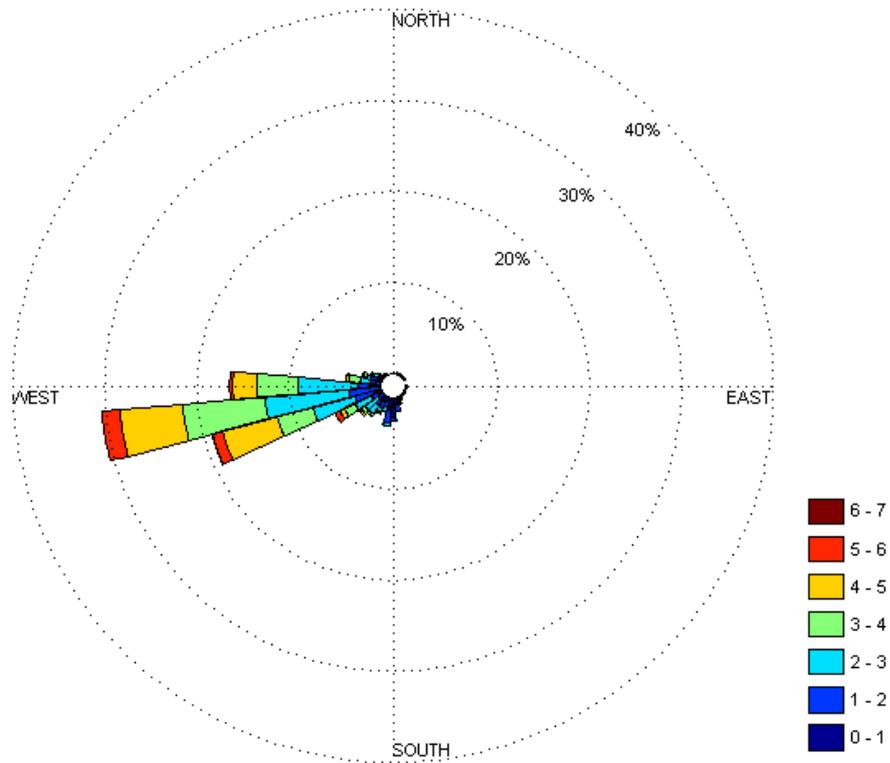
Figura 8 – Ocorrência das direções das correntes antes da rotação com desvio magnético corrigido.



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

Os dados de vento também foram rotacionados em 33° sentido anti-horário. Porém, antes disso, foi realizado o mesmo procedimento adotado para as correntes, ou seja, foi feita uma rotação para o sentido anti-horário em 90°, pelo mesmo motivo dito acima. A figura 9 mostra a distribuição das direções majoritárias dos ventos com suas respectivas intensidades (m/s) antes da rotação. Os dados de vento já foram obtidos de acordo com a convenção oceanográfica do sentido do vento, ou seja, indicando o sentido que o vento vai ao invés de indicar a sua origem como é adotado pela convenção meteorológica.

Figura 9 – Ocorrência das direções dos ventos antes da rotação, adotando a convenção oceanográfica do sentido do vento.



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

A partir disso, as direções resultantes das correntes e dos ventos rotacionadas foram decompostas em componentes U e V, porém agora orientadas de forma longitudinal e transversal, respectivamente, à orientação do canal de navegação do Porto de Fortaleza.

### 2.3 DECOMPOSIÇÃO DA CORRENTE

Os dados de corrente longitudinal (U) e transversal (V) foram decompostos em termos de componentes relacionados aos constituintes harmônicos ( $U_h$  e  $V_h$ ), aos de alta frequência ( $U_{af}$  e  $V_{af}$ ) e as sub-mareais ( $U_v$  e  $V_v$ ), como:

$$\begin{aligned}U &= U_h + U_{af} + U_v \\V &= V_h + V_{af} + V_v\end{aligned}\tag{1}$$

As componentes  $U_h$  e  $V_h$  foram obtidas através da análise harmônica do sinal, que consiste de um processo matemático no qual um sinal observado em um determinado ambiente é separado em constituintes harmônicos simples. A partir dela foi possível extrair o eixo maior, eixo menor, inclinação e fase de cada constituinte. Esta metodologia é amplamente utilizada atualmente como uma técnica tradicional ao tratamento de dados de processos estacionários e lineares em diversos trabalhos. De acordo com Pugh (1987), esses conceitos foram inicialmente desenvolvidos por Laplace, Lord Kelvin e George Darwin.

A análise harmônica foi aplicada sobre a série temporal de correntes utilizando rotinas do programa T\_TIDE (SEA-MAT, 2015) em ambiente *Matlab*®. Esta análise possibilitou determinar a componente mareal das correntes e também analisar o comportamento das principais constituintes em diferentes profundidades da água. Para isso, foram calculados constituintes para cada profundidade, isto é, a cada 2 metros de coleta do ADCP foram realizadas as análises harmônicas do sinal.

Depois de realizada a análise harmônica do sinal das correntes, foi aplicado um filtro espectral sobre os dados do residual obtido, utilizando uma janela temporal (WALTERS; HESTON, 1982). Isso foi possível por meio de uma rotina do programa FOURFILT para *Matlab*®. Como a força inercial de Coriolis próxima a linha do equador é quase desprezível, a frequência subinercial não foi adotada nesse estudo.

A frequência maregráfica de corte de  $1 / 24,8$  horas<sup>-1</sup> foi utilizada como passa-baixa (low pass) para que os dados de frequência da maré e de alta frequência fossem filtrados, restando apenas os dados de baixa frequência, ou seja,

os dados sub-mareais (EMERY, THOMSON, 2001). Através desse procedimento foi possível separar os sinais  $U_{af}$  e  $V_{af}$  da série temporal.

Por fim, as componentes sub-mareais ( $U_v$  e  $V_v$ ) foram obtidas através da subtração dos componentes harmônico e de alta frequência da série de dados de corrente observadas. Esses dados são originados pela filtragem descrita acima.

### **2.3.1 Decomposição do vento**

Os dados de vento obtidos através do INMET também foram decompostos em componentes longitudinal e transversal para que pudessem ser comparados aos dados de corrente sub-mareais. Para que isso fosse realizado, filtraram-se os dados de vento com a mesma frequência de corte de passa-baixa (low pass) para as correntes, tirando o efeito da alta frequência, havendo somente a influência do vento nesse conjunto de dados. Assim, pôde-se fazer a comparação dos dados de corrente sub-mareais e os dados de vento filtrados para que fosse calculada a correlação entre cada uma das componentes.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 DESCRIÇÃO DOS DADOS

##### 3.1.1 Nível da água e temperatura

A variação do nível da água está representada na figura 10. A altura máxima registrada foi de 3,38 m, então a maré é caracterizada como mesomaré (DAVIS, 1964). A altura mínima foi de 0,98 m e altura média foi de 1,29 m. Através de uma análise harmônica simples foi observado que as alterações de nível na costa são explicadas em 99,8% pelas forçantes astronômicas. O quadro 2 mostra as principais componentes para essa análise. A importância relativa dos componentes diurnos e semi-diurnos da maré pode ser obtida pelo número de forma (Nf), definido por A. Courtier em 1938 (Defant, 1960) pela razão:

$$Nf = K1 + O1 / M2 + S2$$

(2)

Onde K1, O1 e M2, S2 indicam as amplitudes dos principais componentes diurnos e semi-diurnos da maré, respectivamente.

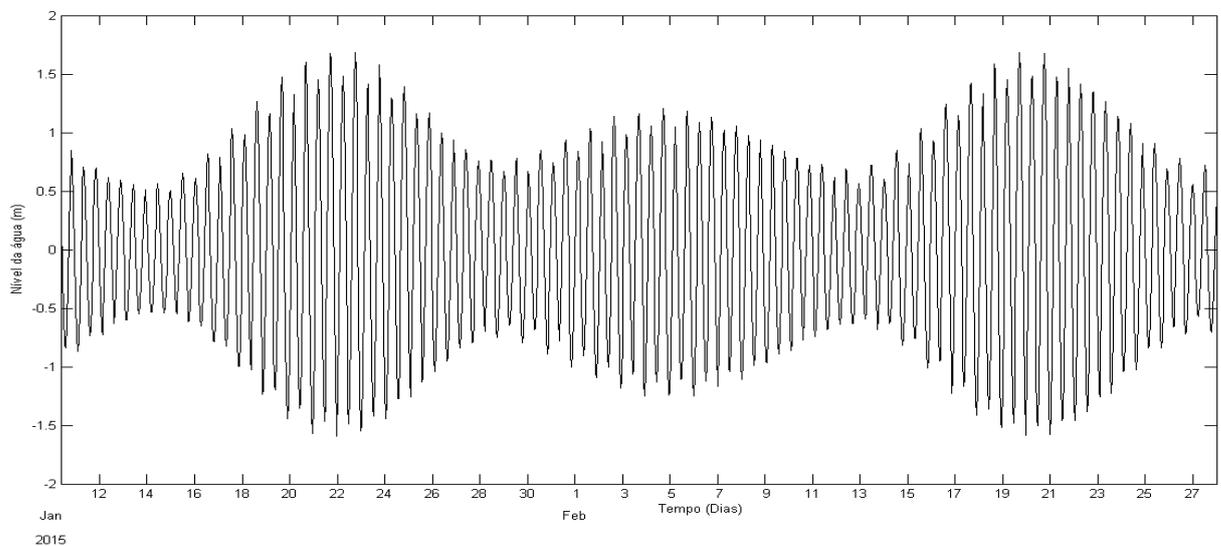
Quadro 2 – Principais constituintes harmônicos em termos de amplitude e fase.

| <b>Componentes harmônicos</b> | <b>Amplitude (m)</b> | <b>Fase (°)</b> |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|
| M2                            | 0,9815               | 0,97            |
| S2                            | 0,3260               | 44,75           |
| N2                            | 0,2283               | 146,54          |
| K1                            | 0,0624               | 318,64          |
| O1                            | 0,0582               | 338,72          |

Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

De acordo com os intervalos de variação do número adimensional  $N_f$ , a maré classifica-se em:  $0 < N_f < 0,25$  – semi-diurna;  $0,25 < N_f < 1,5$  – mista com predominância semi-diurna;  $1,5 < N_f < 3,0$  – mista com predominância diurna;  $N_f > 3,0$  – diurna (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002, p.66). Como o valor de  $N_f$  utilizando a equação 2 deu 0,0922, então a maré classifica-se como semi-diurna.

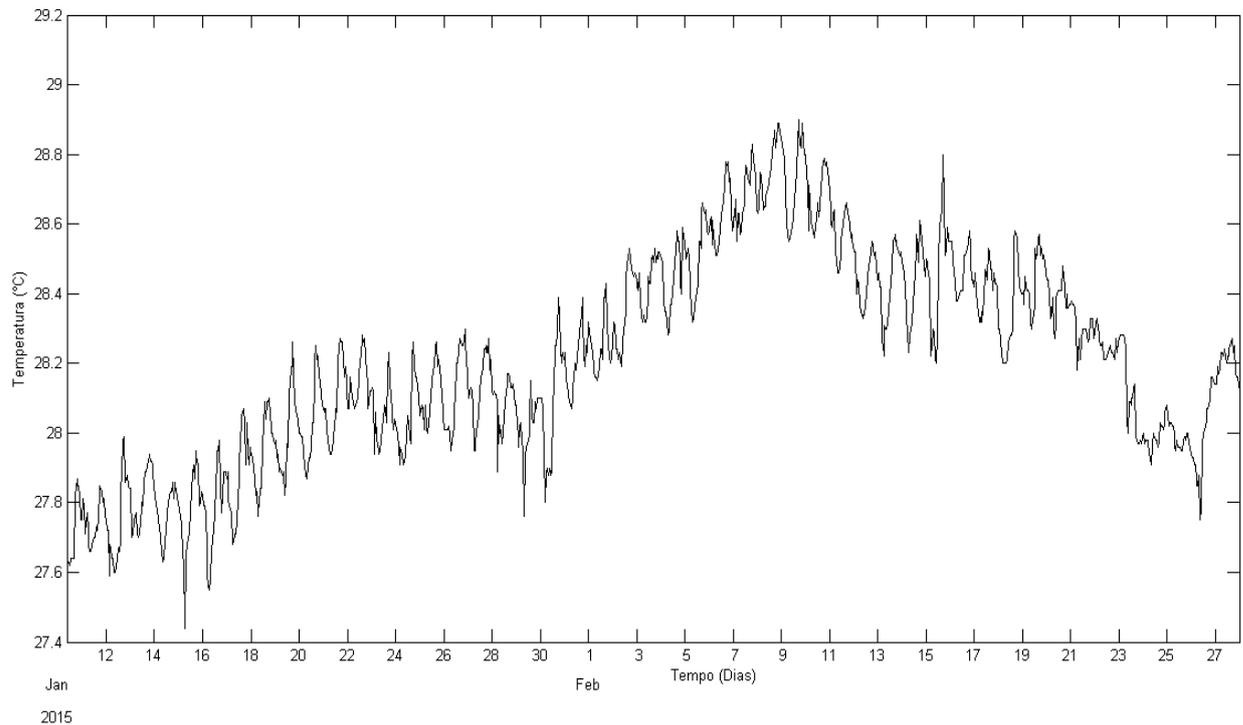
Figura 10 – Variação do nível da água durante o período de fundeio.



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

A temperatura da água, que foi registrada pelo ADCP, variou de 27,4 a 28,9°C, com média de 28,2°C. A série temporal da temperatura da água de onde o ADCP foi fundeado está representada na figura 11. As maiores temperaturas estão relacionadas aos períodos de quadratura, como pode ser visualizado na figura 11 nos dias 8, 9 e 10 de fevereiro. As menores temperaturas também estão nos períodos de quadratura, sendo nos dias 15 e 29 de janeiro e 26 de fevereiro. Esse fato está relacionado com a água da superfície que é muito quente nessa região, e, mesmo com a mistura com a água de fundo, ainda permanece quente. Há uma oscilação de 0,2°C entre os ciclos de maré. Através do uso da sonda da marca YSI® durante as 3 campanhas de 13 horas, pôde-se observar (resultados não apresentados) que não existe estratificação da temperatura.

Figura 11 – Série temporal da temperatura da água.

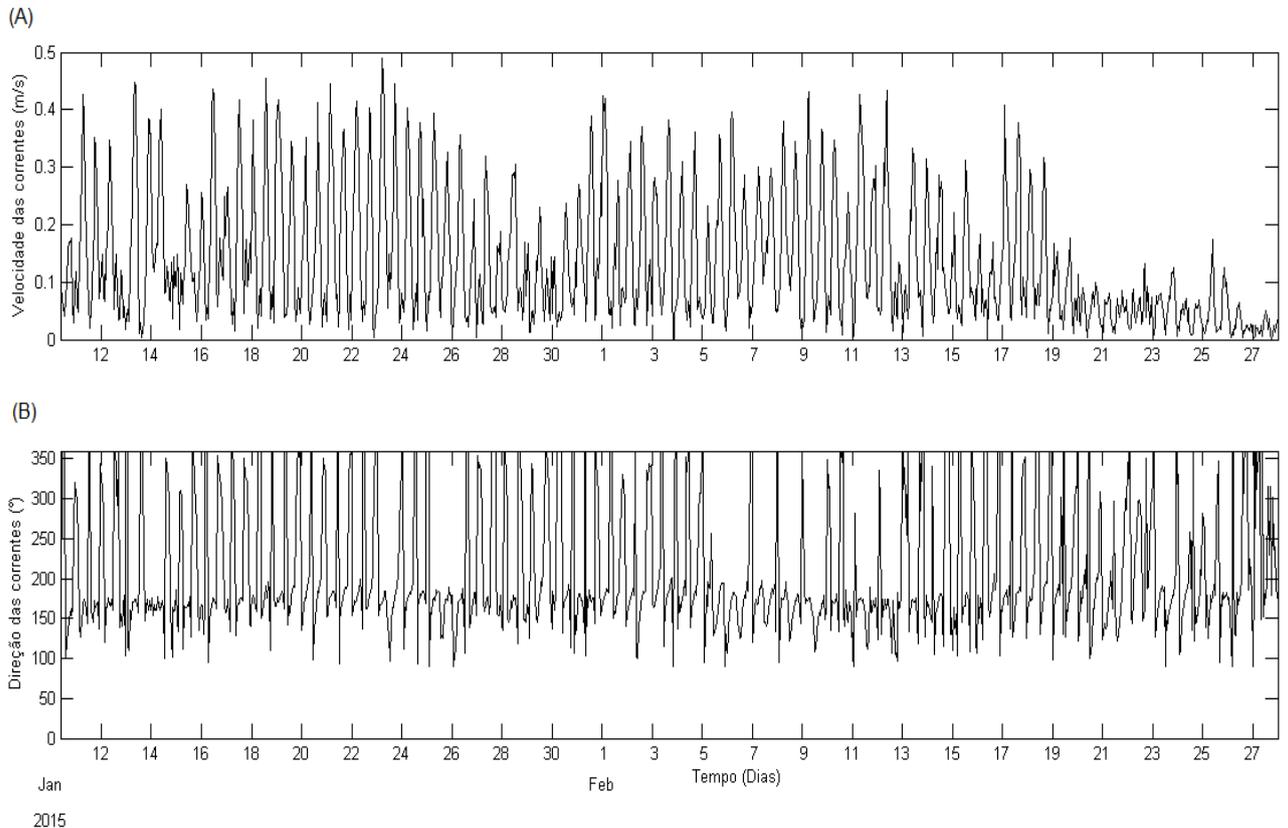


Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

### 3.1.2 Correntes

A intensidade das correntes apresentou valor mínimo de 0,001 m/s no dia 11 de fevereiro, e máximo de 0,490 m/s no dia 23 de janeiro com média de 0,137 m/s como é mostrado na figura 12A. Durante o mês de janeiro, as velocidades médias das correntes crescem com o passar do tempo e apresentam uma queda durante o mês de fevereiro, e depois crescem novamente, e novamente ocorre um outro decréscimo no fim de fevereiro.

Figura 12 – Séries temporais horárias de: (A) Intensidade e (B) Direção das correntes.



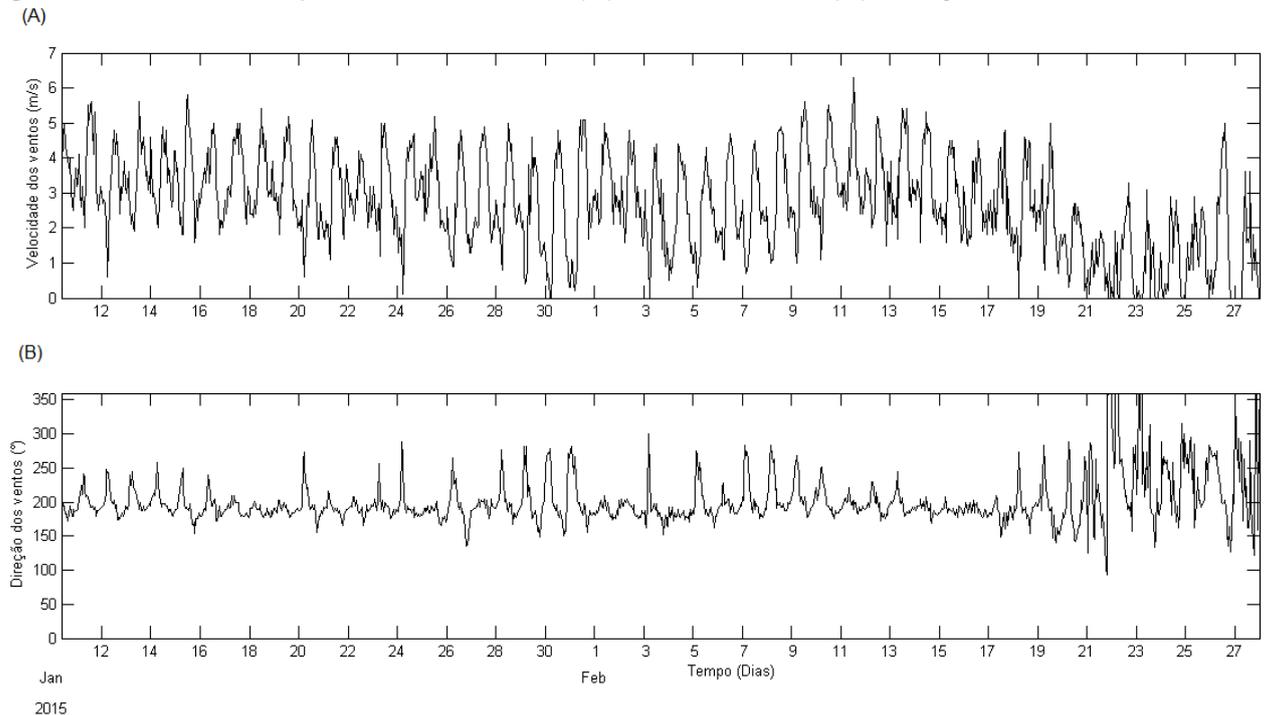
Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

A direção apresentou pouca variabilidade no tempo. A moda da direção foi de  $176,6^\circ$ , sentido oeste-noroeste, porém durante vários dias dos dois meses, houve mudança na direção como pode ser observado na figura 12B.

### 3.1.3 Ventos

A intensidade média dos ventos foi de  $2,72$  m/s. Os períodos de menores intensidades dos ventos foram do dia 1 a 9 e 20 a 27 de fevereiro. Os períodos de maiores intensidades foram do dia 10 a 31 de janeiro e 10 a 19 de fevereiro. O valor máximo foi de  $6,3$  m/s no dia 11 de janeiro, e o mínimo de  $0,1$  m/s no dia 26 de fevereiro.

Figura 13 - Séries temporais horárias de: (A) Intensidade e (B) Direção dos ventos.



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

O vento soprou quase que exclusivamente para o quadrante oeste-sudoeste (W-SW), havendo então uma origem na direção leste-nordeste (E-NE) e um pouco de contribuição de leste-sudeste (E-SE). Isso ocorre pelo fato de os meses em questão estarem no período chuvoso e, também devido à influência da posição meridional da ZCIT, ocorrendo predominância de ventos de leste, com ocorrências de nordeste, sudeste e uma parcela reduzida de noroeste.

### 3.2 DECOMPOSIÇÃO DAS CORRENTES

Nas figuras 14 e 15 estão representados os resultados da decomposição das componentes longitudinal (U) e transversal (V) das correntes, respectivamente. A figura 14A representa a série temporal de velocidade longitudinal das correntes. Os valores negativos correspondem ao sentido oeste das correntes e os positivos, ao sentido leste. Ocorreu predominância dos valores de U para o sentido oeste. A magnitude máxima absoluta de U foi de aproximadamente 0,45 m/s e ocorreu no dia 23 de janeiro e a média absoluta foi de 0,12 m/s.

A figura 15A representa a série temporal de velocidade transversal das correntes. Os valores negativos indicam o sentido sul de deslocamento das

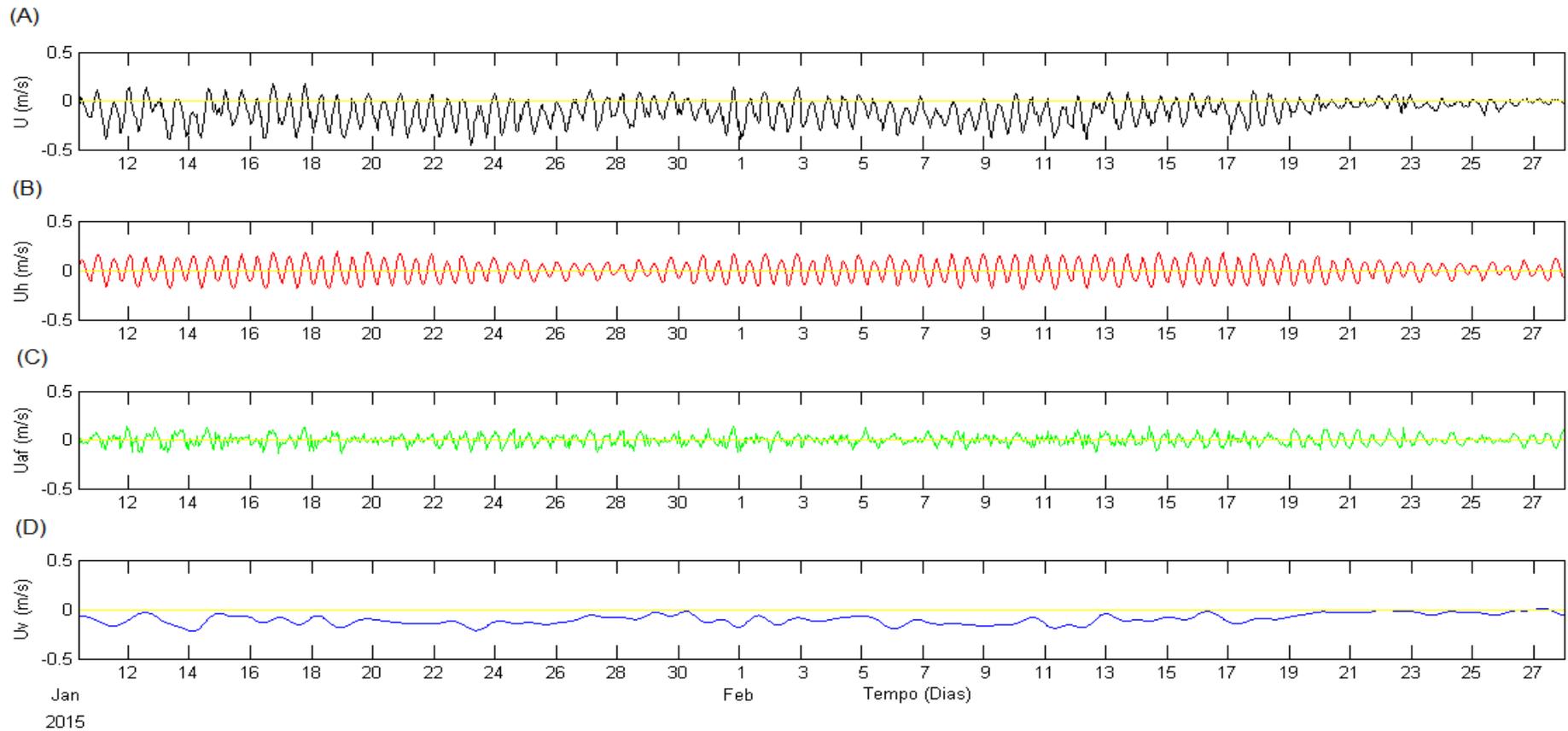
correntes e os positivos, sentido norte. Há predominância dos valores de  $V$  para sul, porém não de forma tão acentuada quanto aos valores de  $U$  para oeste. A magnitude máxima absoluta de  $V$  foi de aproximadamente 0,31 m/s e ocorreu no dia 18 de janeiro e a média absoluta foi de 0,06 m/s.

A componente harmônica longitudinal ( $U_h$ ) e transversal ( $V_h$ ) representadas pelas figuras 14B e 15B não apresentaram grandes diferenças em suas magnitudes, com máximo absoluto ficando em torno de 0,19 e 0,13 m/s, respectivamente, e médias absolutas em torno de 0,08 e 0,05 m/s, respectivamente. As duas figuras a seguir ilustram os principais constituintes harmônicos ( $M_2$  e  $S_2$ ) em termos de eixo maior, eixo menor, inclinação e fase da elipse de maré de cada uma dos constituintes que compõem esse sinal. A análise harmônica dos parâmetros da elipse de maré para cada componente tem um nível de confiança de 95%.

De acordo com a média aritmética do percentual total da variância esperada pela variância original de cada um das 5 profundidades de interesse (5 células válidas), a contribuição das componentes representou aproximadamente 55,44% do sinal. Esses valores de variância total dos dados estão indicados na figura 16C. De acordo com os valores presentes na figura 16A, a média da variância para  $U_h$  é de 55,38%, e de acordo com a figura 16B, a média para  $V_h$  é de 55,32%.

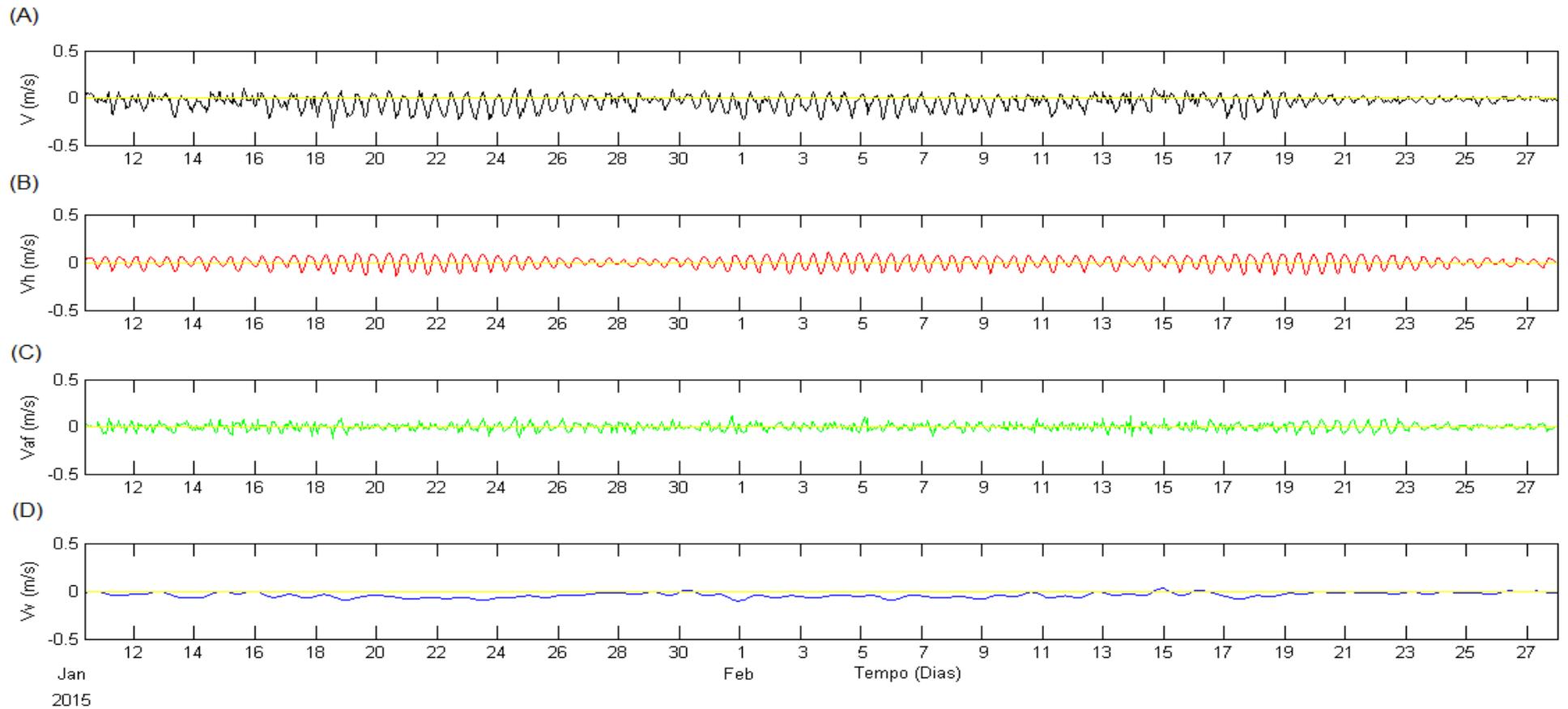
O cálculo para a obtenção da primeira profundidade foi feito somando o blank (0,8 m), nível do sensor (0,3 m) e tamanho da célula (2 m). Para a obtenção da segunda profundidade foi somado o valor da primeira e o tamanho da célula, e, assim, sucessivamente, até a última profundidade de registro válida. A variação das 5 profundidades ocorrem de 11,1 a 3,1 m, com cada camada sendo de 2 m (tamanho da célula), então há os níveis 11,1; 9,1; 7,1; 5,1; e 3,1 m no sentido do fundo para a superfície.

Figura 14 – Séries temporais horárias da componente longitudinal decomposta: (A)  $U$  – corrente longitudinal original; (B)  $U_h$  – componente longitudinal harmônica; (C)  $U_{af}$  – componente longitudinal de alta frequência; (D)  $U_v$  – componente longitudinal sub-mareal.



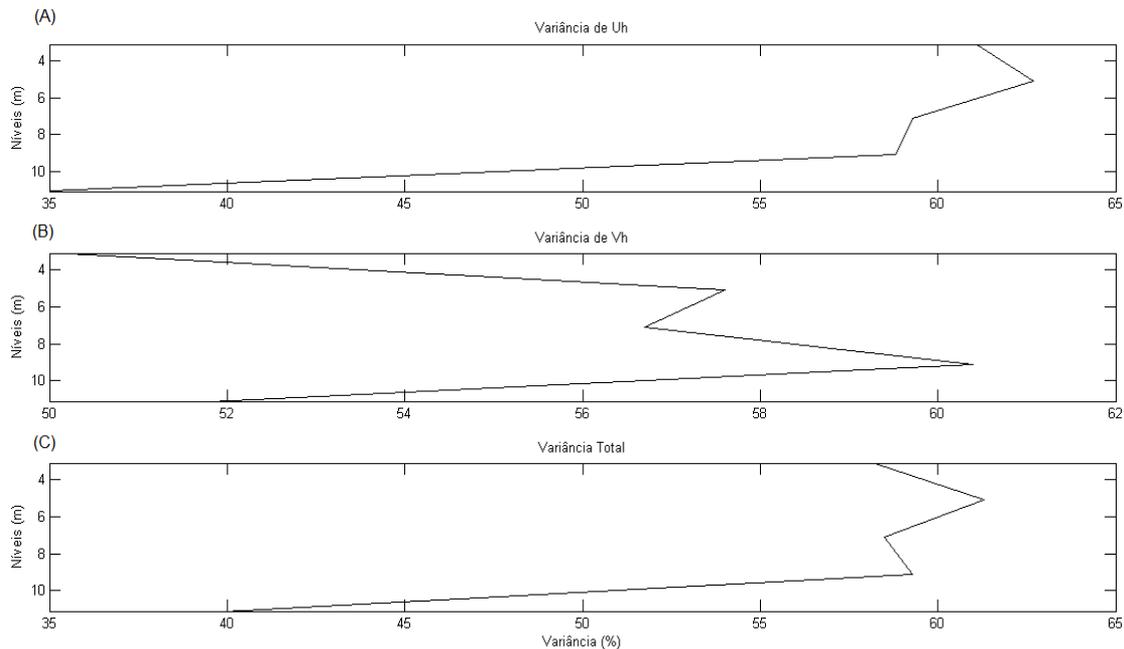
Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

Figura 15 – Séries temporais horárias da componente transversal decomposta: (A)  $V$  – corrente transversal original; (B)  $V_h$  – componente transversal harmônica; (C)  $V_{af}$  – componente transversal de alta frequência; (D)  $V_v$  – componente transversal sub-mareal.



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

Figura 16 – Variâncias da (A) componente longitudinal harmônica –  $U_h$ , (B) componente transversal harmônica –  $V_h$  e (C) total.



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

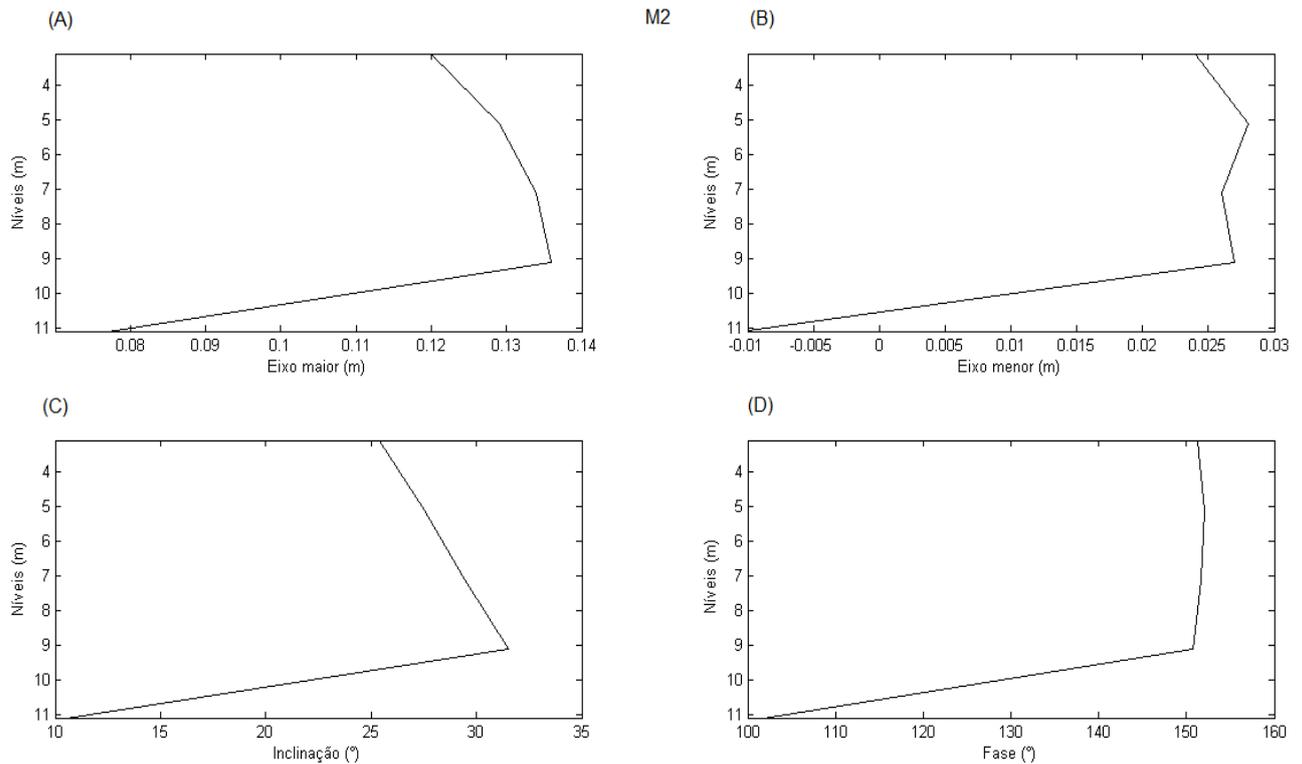
Dentre os principais constituintes harmônicos usados neste trabalho, o constituinte de valor mais alto do eixo maior foi o M2 (principal lunar semi-diurna) com média de 0,119 m, seguido do S2 (principal solar semi-diurna) com média de 0,038 m. Os que apresentaram os menores valores do eixo maior foram O1 (principal lunar diurna) com a média de 0,013 m e L2 (lunar maior semi-diurna) com a média de 0,032 m. Os que obtiveram valores intermediários foram K1 (lunar-solar diurna) com média de 0,034 m e N2 (lunar menor semi-diurna) com média de 0,036m.

Na figura 17 está sendo mostrado como a componente M2 está variando de acordo com esses parâmetros citados. A figura 17A indica uma variação de aumento do eixo maior até o nível de 9,1 m, e depois há uma diminuição até próximo a superfície no nível de 3,1 m. A figura 17B mostra um aumento de -0,010 a 0,027 m do eixo menor até o nível de 9,1 m, e após isso ocorre uma pequena diminuição do eixo e depois um pequeno aumento, alcançando um valor de 0,024 m no nível de 3,1 m.

A figura 17C mostra basicamente um aumento gradual da inclinação conforme ocorre o aumento dos níveis, ocorrendo em seguida a diminuição da inclinação a partir do nível de 9,1 m, alcançando um valor de 25,4° próximo a

superfície, no nível de 3,1 m. A figura 17D indica o aumento gradual da fase até os 9,1 m, e depois um aumento até próximo a superfície a 3,1 m de  $151,3^\circ$ .

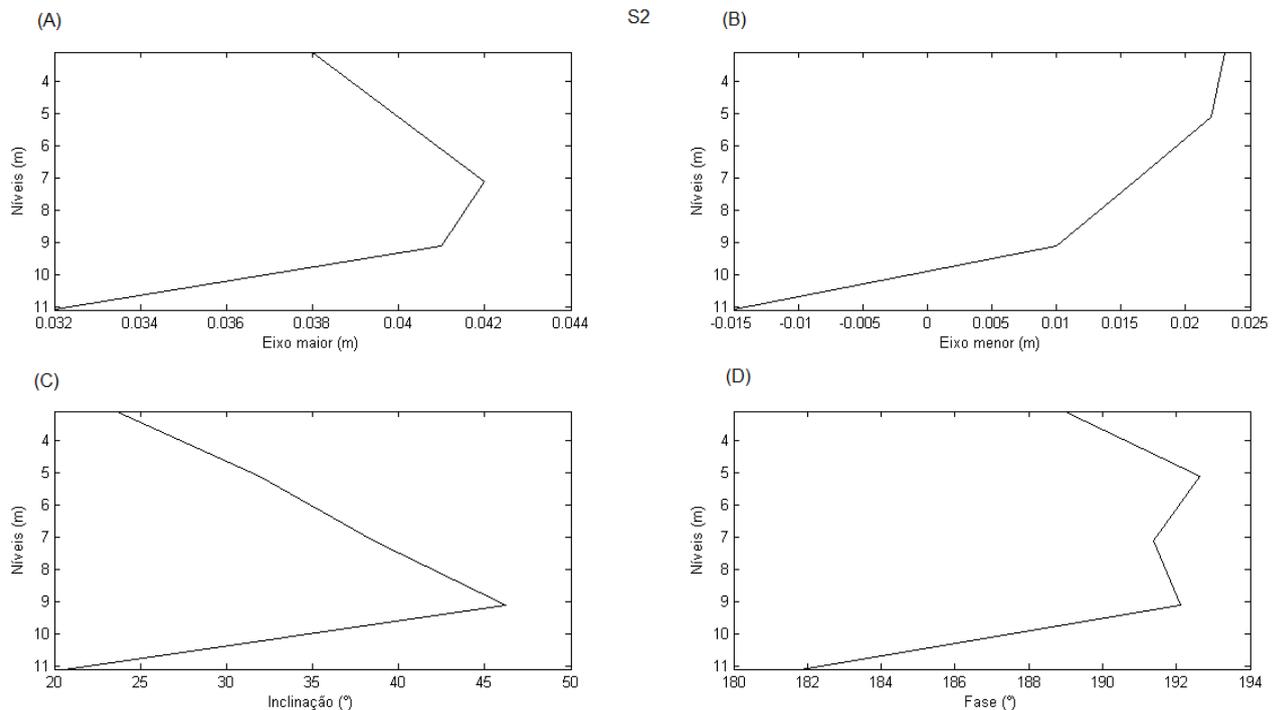
Figura 17 – Variação do constituinte harmônico M2 nos níveis, levando-se em consideração (A) eixo maior, (B) eixo menor, (C) inclinação e (D) fase da elipse de maré.



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

Na figura 18 está sendo mostrado como a componente S2 está variando. A figura 18A indica uma variação de aumento do eixo maior até o nível de 9,1 m, e depois há um aumento novamente até o nível 7,1 m, ocorrendo depois uma diminuição até próximo à superfície no nível de 3,1 m. A figura 18B mostra um pequeno aumento de -0,015 a 0,010 m do eixo menor até o nível de 9,1 m, e após isso ocorre um grande aumento do eixo menor, chegando a 0,022 m a 5,1 m e depois um pequeno aumento, alcançando um valor de 0,023 m no nível de 3,1 m.

Figura 18 - Variação do constituinte harmônico S2 nos níveis, levando-se em consideração (A) eixo maior, (B) eixo menor, (C) inclinação e (D) fase da elipse de maré.



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

A figura 18C mostra basicamente um aumento gradual da inclinação conforme ocorre o a chegada até a superfície, ocorrendo em seguida a diminuição da inclinação a partir do nível de 9,1 m com 46,2°, alcançando um valor de 23,6° próximo a superfície, no nível de 3,1 m. A figura 18D indica o aumento gradual da fase até os 9,1 m, e depois uma diminuição, e, em seguida, um aumento, ocorrendo depois uma diminuição até próximo a superfície a 3,1 m de 188,9 °.

Pode ser visualizados nas figuras 17 e 18 a interação do vento na superfície que age de forma constante com o aumento de todos os parâmetros da elipse de maré. Isso ocorre ao longo da coluna da água, porém a partir do nível de 9,1 m todos os parâmetros diminuem devido à diminuição da influência do vento na coluna de água. A partir do nível 9,1 ao 11,1 m todos os parâmetros diminuem devido ao aumento do atrito de fundo e pouca influência do vento.

Nas figuras 14C e 15C estão representadas a componente de alta frequência longitudinal (Uaf) e transversal (Vaf). As velocidades absolutas de Uaf são mais intensas que as de Vaf conforme pode ser observado nas figuras. Como a componente U apresenta mais energia que a componente V, então as velocidades absolutas de Uaf são maiores que as de Vaf. A velocidade absoluta máxima

registrada para Uaf foi de 0,14 m/s e para Vaf foi de 0,13 m/s. A média absoluta de velocidade registrada para Uaf foi de 0,04 m/s e para Vaf foi de 0,03 m/s.

As componentes sub-mareais longitudinal ( $U_v$ ) e transversal ( $V_v$ ) estão representadas nas figuras 14D e 15D, respectivamente. Estas componentes não apresentaram grandes diferenças de intensidade entre si. A componente  $U_v$  apresentou velocidade absoluta máxima de 0,22 m/s e para a componente  $V_v$  foi de 0,10 m/s. A média absoluta foi de 0,10 m/s para  $U_v$  e 0,04 m/s para  $V_v$ .

A partir do cálculo da variância do sinal contida nas bandas de cada componente decomposta, e, posteriormente, da divisão de cada sinal de variância pelo somatório das variâncias das três componentes decompostas, foi possível quantificar a contribuição de energia dessas componentes. Então,  $U_h$  e  $V_h$  apresentaram 63,7 e 62,8%; Uaf e Vaf, 18,1 e 24,7%;  $U_v$  e  $V_v$ , 18,2 e 12,5%, respectivamente.

Freitas (2015), por meio de dados modelados, estudou a circulação na plataforma continental do Ceará que apresentou predominância de correntes longitudinais com frequência maregráfica. As componentes de maré explicaram para a componente longitudinal 45,2% e para a componente transversal 87,6% durante o período chuvoso. No período de seca, a explicação da corrente de maré foi de 38% para a componente transversal e de 98% para a componente longitudinal.

Bittencourt (2013), por meio de dados modelados, estudou a variabilidade espacial e sazonal da circulação barotrópica da plataforma continental do Ceará. Foi concluído que as correntes de marés agem com um movimento cíclico e que a interação entre o vento e as correntes residuais de maré é o que realmente causa transporte.

Talvez essa pequena contribuição dos ventos na análise esteja relacionada ao período chuvoso dos meses de janeiro e fevereiro de 2015. A intensidade dos ventos durante esse período é pequena comparada ao período seco. Além disso, deveria ser analisado outros meses para haver uma análise sazonal, especialmente, dos meses do período seco para uma melhor comparação, pois somente uma análise temporal não é confiável.

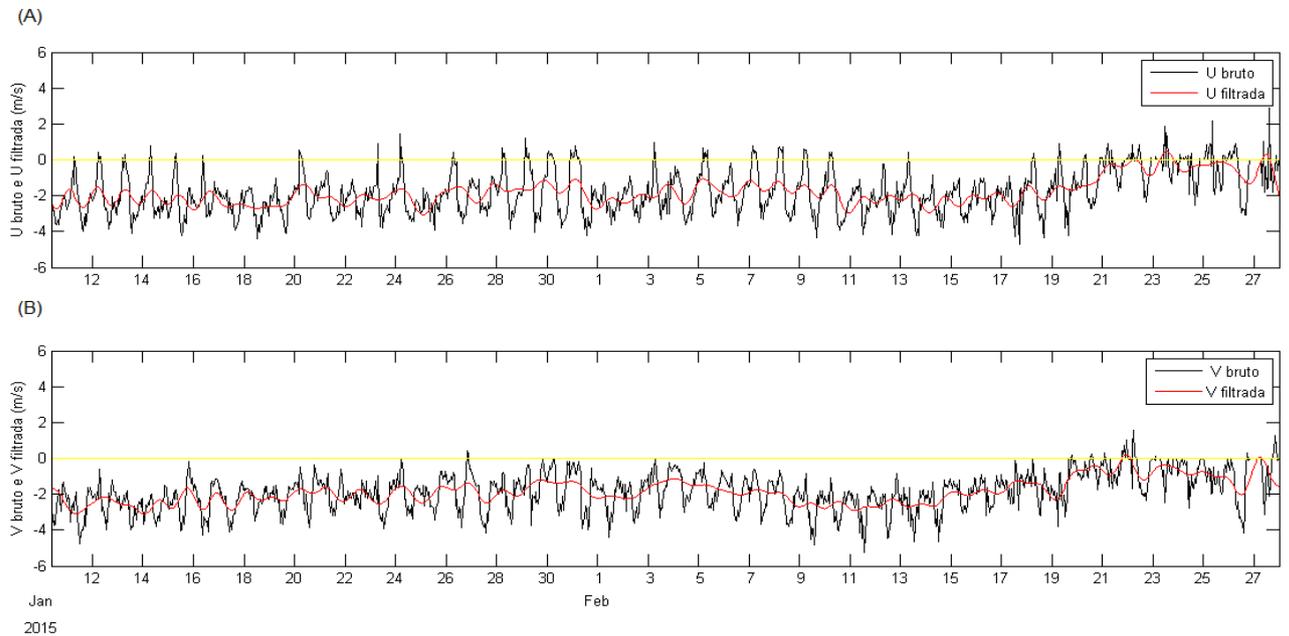
### 3.3 CORRELAÇÃO DAS COMPONENTES DAS CORRENTES SUB-MAREAIS E DAS COMPONENTES DOS VENTOS

As componentes longitudinal e transversal da corrente sub-mareais ( $U_v$  e  $V_v$ ) foram correlacionadas com as componentes longitudinal e transversal do vento filtradas. Para isso, os dados de velocidade dos ventos foram também decompostos em componente longitudinal e transversal. A figura 19 mostra como as componentes com os dados brutos e filtrados variaram no decorrer do tempo, sendo que a figura 19A indica a série temporal da componente longitudinal do vento (m/s), e a figura 19B indica a série temporal da componente transversal do vento (m/s). De acordo com a adoção do sentido para onde o vento vai ao invés de onde se origina, os valores negativos da componente longitudinal indicam sentido oeste e os positivos indicam sentido leste, bem como os valores negativos da componente transversal indicam sentido sul e os positivos indicam o sentido norte, ou seja, nesse período chuvoso em questão há o predomínio de ventos vindo de leste-nordeste com poucas contribuições de ventos vindo de leste-sudeste.

A maior magnitude absoluta da componente longitudinal foi de 4,67 m/s e ocorreu no dia 17 de fevereiro. Já a maior magnitude absoluta da componente transversal foi de 5,22 m/s no dia 11 de fevereiro. A menor magnitude absoluta da componente longitudinal foi de 0,16 m/s no dia 11 de janeiro. Já a menor magnitude absoluta da componente transversal foi de 0,25 m/s no dia 27 de janeiro. A média da magnitude absoluta da componente longitudinal foi de 1,86 m/s e da componente transversal foi de 1,87 m/s, indicando que tanto a componente longitudinal do vento como a transversal apresentaram intensidades de valores aproximados.

A maior magnitude absoluta da componente longitudinal filtrada foi de 3,09 m/s. Já a maior magnitude absoluta da componente transversal filtrada foi de 3,11 m/s. A média da magnitude absoluta da componente longitudinal filtrada foi de 1,78 m/s e da componente transversal filtrada foi de 1,85 m/s, indicando que tanto a componente longitudinal filtrada do vento como a transversal apresentaram intensidades de valores aproximados.

Figura 19 – Séries temporais horárias: (A) componente longitudinal do vento bruto e filtrado (U bruto e U filtrado) e (B) componente transversal do vento bruto e filtrado (V bruto e V filtrado).



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

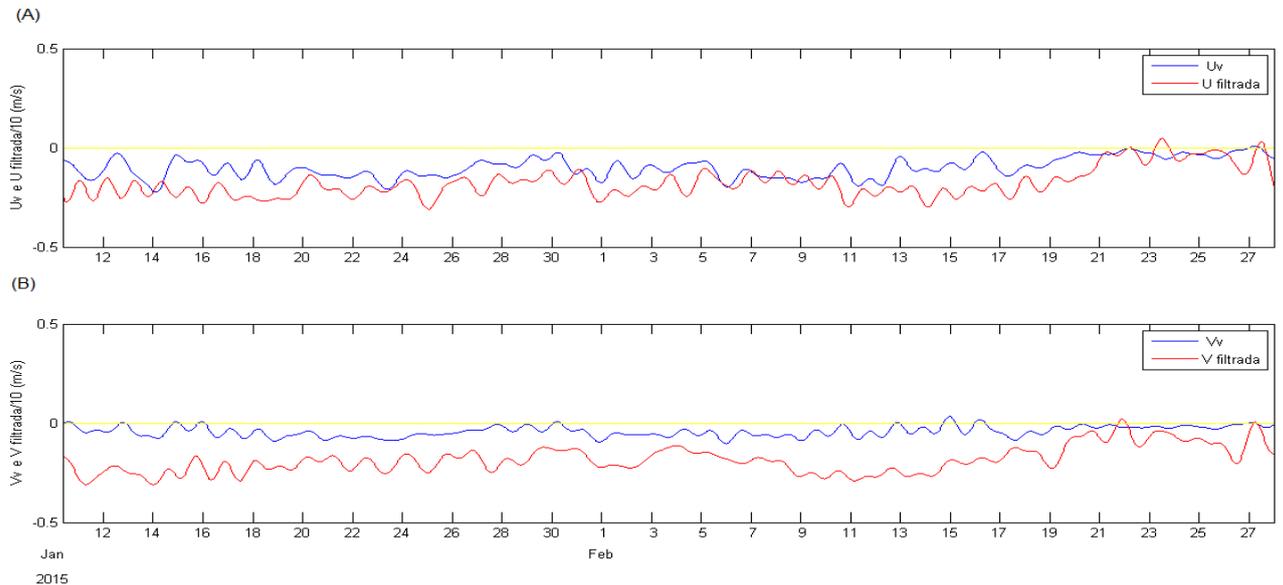
A partir disso, foi realizada a correlação dos valores de  $U_v$  e  $U$  filtrada, bem como dos valores de  $V_v$  e  $V$  filtrada. Para isso, calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) através da seguinte equação:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}}$$

(3)

Para o primeiro caso ( $U_v$  e  $U$  filtrado) o  $r = 0,55$  e para o segundo caso ( $V_v$  e  $V$  filtrado)  $r = 0,35$ . No caso da correlação entre  $U_v$  e  $V$  filtrado,  $r = 0,66$ , e para  $V_v$  e  $U$  filtrado,  $r = 0,33$ , indicando então uma correlação positiva moderada para todas as variáveis correlacionadas. A figura 20 mostra como ocorre essa comparação, sendo as componentes  $U$  e  $V$  filtradas divididas por 10 para melhor visualização no gráfico, diminuindo o tamanho em relação às componentes  $U_v$  e  $V_v$ . A figura 20A mostra para  $U_v$  e  $U$  filtrado, e a figura 20B mostra para  $V_v$  e  $V$  filtrado.

Figura 20 – Séries temporais horárias: (A) componente longitudinal da corrente sub-mareal ( $U_v$ ) e componente longitudinal do vento filtrada (U filtrada) e (B) componente transversal da corrente sub-mareal ( $V_v$ ) e componente transversal do vento filtrada (V filtrada).



Fonte: elaborado pelo autor, 2015.

Já o coeficiente de determinação foi obtido pelo quadrado do valor do coeficiente de correlação de Pearson. Para o primeiro caso,  $r^2 = 0,30$ , indicando que aproximadamente 70% da variabilidade não é explicada por  $U_v$  em relação a U filtrado. Para o segundo caso,  $r^2 = 0,12$ , então cerca de 88% da variabilidade não é explicada por  $V_v$  em relação a V filtrado. Para o terceiro caso,  $r^2 = 0,44$ , portanto 56% da variabilidade não é explicada por  $U_v$  em relação ao V filtrado. Para o último caso,  $r^2 = 0,11$ , indicando que 89% da variabilidade não é explicada por  $V_v$  em relação a componente U filtrado, ou seja, somente 11% é explicada.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo colaborou para ampliar o conhecimento existente da hidrodinâmica através do levantamento de dados de corrente próximo à região do Porto de Fortaleza. Esse trabalho contribuiu com a obtenção de 48 dias contínuos de dados de corrente.

A análise harmônica mostrou que os dados de nível da água são explicados quase que totalmente pelo sinal harmônico com 99,8%. Os principais constituintes harmônicos presentes nas correntes são os semi-diurnos, com destaque para M2 e S2.

O vento soprou quase que exclusivamente para o quadrante oeste-sudoeste (W-SW) na maioria dos casos, havendo então uma origem na direção leste-nordeste (E-NE) e leste-sudeste (E-SE). O valor da média absoluta da componente longitudinal (U) do vento é praticamente o mesmo da componente transversal (V) do vento, sendo os valores das médias da ordem de 1,86 e 1,87 m/s, respectivamente.

As correntes estão predominantemente indo para a direção oeste-noroeste. Os valores absolutos da corrente longitudinal (U) são em geral mais intensos do que os da componente transversal (V) sendo os valores das médias da ordem de 0,12 e 0,06 m/s, respectivamente.

As correntes foram decompostas em termos de componentes e suas energias foram quantificadas em termos percentuais através de uma análise de variância. As componentes  $U_h$  e  $V_h$  apresentaram 63,7 e 62,8%;  $U_{af}$  e  $V_{af}$ , 18,1 e 24,7%;  $U_v$  e  $V_v$ , 18,2 e 12,5%, respectivamente.

De acordo com as análises realizadas neste trabalho durante o período em questão, as componentes astronômicas, com atuação contínua do vento, são agentes primários das alterações na hidrodinâmica nas proximidades do canal de navegação do Porto de Fortaleza. As correntes de maré costumam agir quantitativamente e o vento, qualitativamente na dinâmica de correntes local.

Pretendo continuar desenvolvendo esta linha de pesquisa durante outros meses para conseguir uma série temporal de dados mais completa. O ADCP continua instalado nas mesmas coordenadas, coletando dados para outras análises, e, então, poderei afirmar com maior clareza qual fator será majoritário.

## 5 REFERÊNCIAS

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 804p, 2009.

AMARANTE, O. A. C. D.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. D. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília. 2001. 45 p. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)>. Acesso em 7 jun. 2015.

BITTENCOURT, L, P. **Variabilidade espacial e sazonalidade da circulação barotrópica da plataforma continental do Ceará**. 2013. 69 p. Monografia (Bacharelado em Oceanografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BOWDEN, K. F. **Physical oceanography of coastal waters**. Chichester: Ellis Horwood Limited. 302 p, 1983.

CAINELLI, C; MOHRIAK, W. U. Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the eastern Brazilian continental margin. **Episodes**, Pequim, v. 22, n. 3, p. 206-216. 1999.

COLLING, A., BROWN, E., WRIGHT, J. B., PARK, D. **Waves, Tides and Shallow – Water Processes**. 1. ed. Oxford: Butterworth Heineman, 187 p, 1989.

COLLING, A., BROWN, E., WRIGHT, J. B., PARK, D. **Ocean circulation**. 2. ed. Oxford: Butterworth Heinemann. 2001. 286 p.

COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ. **Características do porto**. Disponível em: <<http://www.docasdoceara.com.br/o-porto/caracteristicas-do-porto>>. Acesso em: 07 jun.2015.

DEFANT, A. **Physical Oceanography**. Oxford: Pergamon Press, v. 2, 598 p, 1960.

DOYLE, J. D. Coupled atmosphere-ocean wave simulations under high wind conditions. **Monthly Weather Review**. Boston, v. 130, p. 3087-3099. 2002.

EMERY, W. J., THOMSON, R. E. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. Oxford: Elsevier, 2. ed. 654 p, 2001.

FARIAS, E. G., MAIA, L. P. Análise da incerteza do mapeamento batimétrico do canal de navegação do Porto do Mucuri. **Revista Mercator**, Fortaleza, v.11, n. 25, p.167-177. 2012.

FREITAS, P.P. **Modelagem hidrodinâmica da circulação sobre a plataforma continental do Ceará – Brasil**. 2015. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FROTA, F. F. **Correntes costeiras na plataforma norte do nordeste do Brasil**. 2015. 52 p. Dissertação (Mestrado em Programa de pós graduação em oceanografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE. **Transaqua**. Disponível em: <[http://www.transaqua.furg.br/internet/bin/estrutura/esqueleto\\_internet.php?dir=estrutura&pagina=principal](http://www.transaqua.furg.br/internet/bin/estrutura/esqueleto_internet.php?dir=estrutura&pagina=principal)>. Acesso em: 24 out.2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações automáticas**. Disponível em: <[www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas)>. Acesso em: 14 jun.2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS/SECRETARIA DE PORTOS. **Anteprojeto de dragagem de manutenção do terminal de passageiros e adequação do acesso aquaviário ao Porto de Fortaleza/CE**. Rio de Janeiro. 188 p. 2014.

JESUS, A. C. D. L. **Estudo das variáveis oceanográficas na área de influência do terminal marítimo de passageiros do porto de Fortaleza – Praia Mansa, Ceará, Brasil**. 2014. 135 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

MAIA, L. P. **Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE – Brasil): implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral**. 1998. 269 p. Tese (Doutorado em Ciencias del mar) - Universidade de Barcelona, Barcelona, 1998.

MEIRELES, A. J. D. A. Impactos ambientais decorrentes da ocupação de áreas reguladoras do aporte de areia: a planície costeira da Caponga, município de Cascavel, litoral leste cearense. **Confins – Revista franco-brasileira de geografia**, Confins, v. 2, n. 2, 2008. Disponível em: <<http://confins.revues.org/2423?lang=pt>>. Acesso em: 7 jun. 2015.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. 2. ed. São Paulo: EdUSP, 411 p, 2002.

MORAIS, J. O. Processos de assoreamento do Porto do Mucuripe. **Arquivo de ciências do mar**, Fortaleza, v.12, n. 2, p. 139–149. 1972.

OLIVEIRA, I. D.; MENEZES, M. O. B.; MAIA, L. P. Diagnóstico dos resíduos sólidos, efluentes líquidos e fauna sinantrópica nociva no porto de Fortaleza, Estado do Ceará. **Arquivo de Ciências do Mar**, Fortaleza, v.46, n. 2, p.13-26. 2013.

PITOMBEIRA, E. D. S. Deformação das ondas por difração no molhe do Porto do Mucuripe (Fortaleza-Ceará-Brasil). **Arquivo de ciências do mar**, Fortaleza, vol. 16, n. 1, p. 55-58, 1976.

PUGH, D. T. **Tides, surges and mean sea level**. Swindon: John Wiley & Sons Ltd, 486 p, 1987.

ROTEIRO COSTA NORTE/DHN. **Roteiro Costa Norte: da Baía do Oiapoque ao Cabo Calcanhar – Rios Amazonas, Jari e Trombetas – Rio Pará**. 10. ed. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação. 2013. 228 p.

SEA-MAT. **Matlab tools for Oceanographic analysis**. Disponível em: <[www.woodshole.er.usgs.gov/operations/sea-mat](http://www.woodshole.er.usgs.gov/operations/sea-mat)>. Acesso em: 14 jun.2015.

SONTEK. X. B. **SonTek/YSI firmware release notes**. San Diego. 2001. 240 p.

THURMAN, H. V. **Introductory oceanography**. 8. ed. New Jersey: Prentice Hall. 1997. 544 p.

WALTERS, R. A.; HESTON, C. Removing tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filters. **Journal of Physical Oceanography**. Boston, v.12, p.112-115, 1982.

WRIGHT, L, D. **Morphodynamics of inner continental shelves**. CRC Press, 242 p, 1995.