Luís Felipe Silva Santos

Variabilidade subinercial das correntes na plataforma continental ao largo de Cabo Frio (RJ): observações

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho

São Paulo 2009

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

Variabilidade subinercial das correntes na plataforma continental ao largo de Cabo Frio (RJ): observações

Luís Felipe Silva Santos

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Física.

Julgada em ____ /____ /____

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

"Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço."

Dave Weinbawm

Sumário

| Ag | grade | cimentos | | | | | i | iii |
|-----|--------|--|---|---|---|-----|----------|------------|
| Re | esumo | 0 | | | | | | v |
| Ał | ostrac | t | | | | | v | 'ii |
| Li | sta de | e Figuras | | | | | x | iv |
| Li | sta de | e Tabelas | | | | | x | vi |
| Lis | sta de | e Siglas e Abreviaturas | | | | | xv | 'ii |
| 1 | Intro | odução | | | | | | 1 |
| | 1.1 | A região de estudo | | | | | | 1 |
| | 1.2 | Característicais gerais da região e estudos anteriores | | • | | | | 2 |
| | | 1.2.1 Climatologia e estrutura termohalina | | • | | | | 2 |
| | | 1.2.2 Hidrodinâmica da plataforma continental | | • | • | | , , . | 13 |
| | | 1.2.3 Circulação na porção norte da PCSE | | • | • | | , , . | 19 |
| | 1.3 | Objetivos | • | • | • | • • | . 2 | 26 |
| 2 | Dad | os e Métodos de Análise | | | | | 2 | 27 |
| | 2.1 | Dados | | • | | • • | . 2 | 27 |
| | | 2.1.1 Instrumentos | | • | | • • | | 35 |
| | 2.2 | Métodos de Análise | • | • | • | • • | . 4 | 41 |
| 3 | Resu | ultados | | | | | 4 | 19 |
| | 3.1 | Correntes subinerciais | | | | • • | . 4 | 49 |

| | | 3.1.1 | Domínio do tempo | 49 |
|----|--------------------------------|----------|--|------|
| | | 3.1.2 | Domínio da frequência | 98 |
| | 3.2 | Vento | | 113 |
| | | 3.2.1 | Domínio do tempo | 113 |
| | | 3.2.2 | Domínio da frequência | 121 |
| | р, | ~ | | 1.00 |
| 4 | Disc | ussão | | 129 |
| | 4.1 | Corren | ntes mais frequentes | 129 |
| | 4.2 | Variab | ilidade Subinercial | 134 |
| | 4.3 | Influêr | ncia do vento nas correntes observadas | 137 |
| | 4.4 | Influêr | ncia da Corrente do Brasil nas correntes observadas | 138 |
| | | | | |
| 5 | Con | clusões | i de la construcción de la constru | 139 |
| | 5.1 | Consid | lerações Finais | 140 |
| П- | farên | aine Pil | hliográfices | 1/1 |
| ке | Keferencias Bibliograficas 141 | | | |

Agradecimentos

Agradeço a Deus por mais esta oportunidade de crescimento, pela luz e proteção a cada passo de minha caminhada.

Aos meus pais que, com amor incondicional, forjaram meu caráter e proporcionaram a base de tudo que sou hoje.

À Valesca, minha esposa, pela paciência por meus períodos de ausência. A sua incessante lembrança me fortaleceu e ajudou-me a perseverar...o amor supera tudo !

À minha irmã, Gabriela, amiga e companheira, pelo carinho e apoio nos momentos difíceis.

À Marinha do Brasil pela oportunidade e aos Comandantes Listo, Vitorino e Borges, pela confiança em mim depositada ao me indicarem para o curso.

Ao Comandante Marcelo, meu co-orientador que, sempre pronto a ajudar, me acompanhou desde o ínício desta empreitada.

Ao Professor Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho, grande ícone do IO e da oceanografia brasileira, agradeço por ter me aceitado em seu laboratório (Laboratório de Hidrodinâmica Costeira - LHiCo), pelo tratamento cordial e sobretudo pela orientação segura e conhecimentos transmitidos.

Sou muito grato também aos demais professores, com quem tive a honra e satisfação de aprender os princípios dessa ciência tão fascinante que é a oceanografia física: Luiz Bruner de Miranda, Ilson Carlos A. da Silveira, Edmo José D. Campos, Paulo S. Polito e Sueli S. de Godoi.

Agradeço aos Comandantes Luciano, Álvaro e Joaquim e a toda tripulação do Centro de Coordenação de Estudos da Marinha em São Paulo (CCEMSP), pelo amparo, acompanhamento e incentivo constantes, nos fornecendo toda a retaguarda e tranqüilidade para desenvolvermos nosso trabalho. Aos funcionários do IO, da biblioteca, da informática e secretarias, que nos apoiaram a todo momento. Em especial quero destacar os Engenheiros Luiz Vianna Nonnato e Francisco Luiz Vicentini Neto e todos os profissionais do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIO), cujo trabalho dedicado, silencioso e importantíssimo é um dos diferenciais do Instituto.

Aos amigos do "2ndfloor", Fernando, Rafael e Márcio sou grato pelo companheirismo, a convivência tranqüila, harmônica e divertida, que tornaram minha estada em São Paulo bem mais agradável.

E finalmente, agradeço o apoio, a companhia, o convívio fraterno e os grandes momentos passados junto aos amigos, que tive o imenso prazer em conhecer: Alexandre, Bruno, Cássia, Fabíola, Fabrício, Francisco, Gustavo, Juliana, Hélvio, Marcos, Marina, Mariana C., Melissa, Natali, Piero, Raquel, Rafael (R2), Sandro, Sebastian, Vitor, Wellington e tantos outros.

Resumo

Este trabalho foi desenvolvido dentro do contexto da hidrodinâmica da plataforma continental, com o objetivo de estudar a variabilidade subinercial das correntes no extremo norte na Plataforma Continental Sudeste brasileira.

A região de estudo está localizada nas proximidades de Cabo Frio (RJ) e Arraial do Cabo (RJ) (aproximadamente 23° S / 42° W).

Apesar de ser uma região bastante conhecida e estudada, em função do fenômeno da ressurgência costeira que ocorre em suas proximidades, pouco se conhece sobre a circulação subinercial nessa localidade.

Devido à importância das correntes subinerciais, por serem responsáveis pelo transporte de substâncias dissolvidas ou em suspensão nas águas, tais como sedimentos, nutrientes e poluição, este trabalho tenta contribuir com um maior conhecimento desses campos de corrente, a partir da análise, no domínio do tempo e da frequência, de séries temporais de intensidade e direção das correntes e do vento local.

Foram utilizados dados coletados no Projeto DEPROAS (Dinâmica do Ecossistema de Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul) a partir de correntógrafos e ADCP fundeados, numa radial em frente a Cabo Frio, sobre as isóbatas de 50, 100 e 200 m, bem como de uma bóia e de uma estação meteorológicas. Trabalhamos com as séries temporais do inverno de 2001 e do inverno e verão de 2003.

A partir desse estudo foi possível verificar que a variabilidade subinercial domina o fluxo das correntes na região, principalmente na direção paralela à batimetria. Como no restante da PCSE, verificou-se um balanço geostrófico na direção normal à topografia, responsável por um fluxo paralelo às isóbatas, em especial na PCM e nas profundidades intermediárias afastadas das camadas limite. Foi observado que a corrente costeira, forçada por processos baroclínicos e pelo vento, típica da parte central da PCSE, atinge o extremo norte da plataforma continental, induzindo um fluxo mais frequente com sentido SE, nas camadas intermediária e de fundo, principalmente no inverno. Verificou-se também que os ventos locais têm baixa correlação com as correntes, exceto nos níveis superficiais, evidenciando a importância das forçantes remotas na dinâmica da região, somado à influência da atividade vortical ciclônica gerada na região pela Corrente do Brasil, com influência até a PCM. Evidências de eventos de ressurgência/subsidência apareceram ao longo de todos os períodos estudados, com ocorrência preferencial a W desta localidade.

Palavras-chave: Hidrodinâmica da plataforma continental, Plataforma Continental Sudeste, Correntes subinerciais, Ressurgência costeira.

Abstract

This work was developed within the context of the continental shelf hydrodynamics, with the aim of studying the subtidal variability of the currents in the far north of the South Brazil Bight (SBB).

The area of the study is located in the vicinity of Cabo Frio (RJ) and Arraial do Cabo (RJ) (approximately 23° S / 42° W).

Despite being a well known and studied region, due to the coastal upwelling phenomenon that occurs in its vicinity, little is known about the subtidal variability in this location.

Given the importance of the subtidal currents, that are responsible for the transport of substances dissolved or suspended in water, such as sediments, nutrients and pollution, this work tries to contribute to a better understanding of these current fields, by the analysis in the time and frequency domain, from time series of the currents and local wind intensity and direction.

We used data collected in DEPROAS Project (Western South Atlantict Platform Ecosystem Dynamics) from current meters and an ADCP moored in front of Cabo Frio, on the isobaths of 50, 100 and 200 m, and from a buoy and a weather station. We worked with time series of 2001 winter and 2003 winter and summer.

From this study it was found that the subtidal variability dominates the flow in the region, mainly in the parallel direction of the bathymetry. As in the rest of the SBB, there was a geostrophic balance in the normal direction of the topography, which accounts for a flow parallel to isobaths, particularly in the middle shelf and in intermediate depths of the remote boundary layer. It was observed that the coastal current forced by baroclinic processes and by the wind, typical of the central part of the SBB reaches the northern edge of the SBB, leading to a more frequent flow in the southeast direction, in the intermediate layers and the bottom, especially in the winter. It was also found that the local winds have low correlation with the currents, except on the superficial layers, indicating the importance of remote forcing in the dynamics of the region, coupled with the influence of cyclonic vortical activity in the region, generated by the Brazil Current, reaching the middle shelf. Upwelling and downwelling evidences were observed in all time series, with the preferential location occurring west of Cabo Frio.

Keywords: Continental Shelf Hydrodynamics, South Brazil Bight, Subtidal currents, Coastal Upwelling.

Lista de Figuras

| 1.1 | A Plataforma Continental Sudeste do Brasil | 2 |
|------|--|----|
| 1.2 | Tensão de cisalhamento do vento na região oeste do oceano Atlântico Sul | 3 |
| 1.3 | Campo de correntes na superfície do oceano (PCSE), após a passagem da frente | |
| | fria | 5 |
| 1.4 | Circulação verticalmente integrada na PCSE, após a passagem da frente fria | 6 |
| 1.5 | Distribuição superficial de temperatura climatológica de verão | 8 |
| 1.6 | Distribuição superficial de temperatura climatológica de inverno | 9 |
| 1.7 | Distribuição próximo ao fundo da temperatura climatológica de verão | 9 |
| 1.8 | Distribuição próximo ao fundo da temperatura climatológica de inverno | 10 |
| 1.9 | Distribuição superficial de salinidade climatológica de verão | 10 |
| 1.10 | Distribuição superficial de salinidade climatológica de inverno | 11 |
| 1.11 | Distribuição próximo ao fundo da salinidade climatológica de verão | 11 |
| 1.12 | Distribuição próximo ao fundo da salinidade climatológica de inverno | 12 |
| 1.13 | Imagem AVHRR da costa sudeste brasileira exibindo os meandros da Corrente | |
| | do Brasil | 17 |
| 1.14 | Amplitude em cm, da constituinte M2 de maré | 18 |
| 1.15 | Fase em relação a Greenwich, em graus, da constituinte M2 de maré | 19 |
| 1.16 | Correntes médias na superfície (PCSE) | 22 |
| 1.17 | Circulação vertical integrada (PCSE) | 23 |
| 2.1 | Estrutura dos fundeios do DEPROAS | 28 |
| 2.2 | Posição dos fundeios do DEPROAS - Radial de Cabo Frio | 29 |
| 2.3 | Correntógrafo 2D-ACM | 36 |
| 2.4 | Geometria dos feixes sonoros e da perfilagem de correntes do ADP | 37 |

| 2.5 | Bóia meteorológica | 39 |
|------|---|----|
| 2.6 | Convenções direcionais da bóia meteorológica | 40 |
| 2.7 | Exemplo de edição de " <i>spikes</i> " | 42 |
| 2.8 | Eixos de referência para a decomposição dos vetores velocidade | 43 |
| 2.9 | Exemplo de utilização do filtro passa-baixa | 44 |
| 3.1 | Diagrama de dispersão do fundeio CF50 (I01) | 56 |
| 3.2 | Diagrama de dispersão do fundeio CF100 (I01) | 57 |
| 3.3 | Diagrama de dispersão do fundeio CF200 (I01) | 57 |
| 3.4 | Diagrama de dispersão do fundeio CF50 (V03) | 58 |
| 3.5 | Diagrama de dispersão do fundeio CF100 (V03) | 58 |
| 3.6 | Diagrama de dispersão do fundeio CF200 (V03) | 59 |
| 3.7 | Diagrama de dispersão do fundeio CF50 (I03) | 59 |
| 3.8 | Diagrama de dispersão do fundeio CF100 (I03) | 60 |
| 3.9 | Diagrama de dispersão do fundeio CF200 (I03) | 60 |
| 3.10 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF50 (I01) | 62 |
| 3.11 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF100 (I01) | 62 |
| 3.12 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF200 (I01) | 63 |
| 3.13 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF50 (V03) | 63 |
| 3.14 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF100 (V03) | 64 |
| 3.15 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF200 (V03) | 65 |
| 3.16 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF50 (I03) | 65 |
| 3.17 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF100 (I03) | 66 |

| 3.18 | Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão | |
|------|--|----|
| | de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF200 (I03) | 66 |
| 3.19 | Médias do vetor velocidade do vento e dos vetores velocidade da corrente fil- | |
| | trados (I01) | 68 |
| 3.20 | Médias do vetor velocidade do vento e dos vetores velocidade da corrente fil- | |
| | trados (V03) | 69 |
| 3.21 | Médias do vetor velocidade do vento e dos vetores velocidade da corrente fil- | |
| | trados (I03) | 70 |
| 3.22 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF50 (I01) . | 73 |
| 3.23 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF100 (I01) . | 74 |
| 3.24 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF200 (I01) . | 75 |
| 3.25 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF50 (V03) $$. | 76 |
| 3.26 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF100 (V03) | 77 |
| 3.27 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF200 (V03) | 78 |
| 3.28 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF50 (I03) . | 79 |
| 3.29 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF100 (I03) . | 80 |
| 3.30 | Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF200 (I03) . | 81 |
| 3.31 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF50 (I01) | 83 |
| 3.32 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF100 (I01) . | 84 |
| 3.33 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF200 (I01) . | 85 |
| 3.34 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF50 (V03) | 86 |
| 3.35 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF100 (V03) . | 87 |
| 3.36 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF200 (V03) . | 88 |
| 3.37 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF50 (I03) | 89 |
| 3.38 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF100 (I03) . | 89 |
| 3.39 | Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF200 (I03) . | 90 |
| 3.40 | Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (I01), em | |
| | cada fundeio | 91 |
| 3.41 | Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I01), | |
| | em cada fundeio | 92 |

| 3.42 | Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (V03), | |
|------|---|-----|
| | em cada fundeio | 92 |
| 3.43 | Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (V03), | |
| | em cada fundeio | 93 |
| 3.44 | Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (I03), em | |
| | cada fundeio | 93 |
| 3.45 | Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I03), | |
| | em cada fundeio | 94 |
| 3.46 | Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (I01), | |
| | entre os fundeios | 95 |
| 3.47 | Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I01), | |
| | entre os fundeios | 95 |
| 3.48 | Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (V03), | |
| | entre os fundeios | 96 |
| 3.49 | Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (V03), | |
| | entre os fundeios | 96 |
| 3.50 | Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (I03), | |
| | entre os fundeios | 97 |
| 3.51 | Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I03), | |
| | entre os fundeios | 97 |
| 3.52 | Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I03), | |
| | entre os fundeios | 98 |
| 3.53 | Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF100 (V03) | 99 |
| 3.54 | Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF200 (V03) | 99 |
| 3.55 | Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF50 (I03) | 100 |
| 3.56 | Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF100 (I03) | 100 |
| 3.57 | Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF200 (I03) | 101 |
| 3.58 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas no fundeio CF100 | |
| | (V03) | 107 |
| 3.59 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas no fundeio CF200 | |
| | (V03) | 107 |

| 3.60 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF50 | |
|--|--|---|
| | e CF100 (V03) | 108 |
| 3.61 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF50 | |
| | e CF200 (V03) | 108 |
| 3.62 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF100 | |
| | e CF200 (V03) | 109 |
| 3.63 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas no fundeio CF100 | |
| | (I03) | 110 |
| 3.64 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas no fundeio CF200 | |
| | (I03) | 110 |
| 3.65 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF50 | |
| | e CF100 (I03) | 111 |
| 3.66 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF50 | |
| | e CF200 (I03) | 111 |
| 3.67 | Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF100 | |
| | e CF200 (I03) | 112 |
| 3.68 | Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalha- | |
| | | |
| | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) | 117 |
| 3.69 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) | 117 |
| 3.69 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) | 117 117 |
| 3.69 3.70 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) | 117 117 |
| 3.69 3.70 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada | 117 117 |
| 3.69 3.70 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) | 117117118 |
| 3.69 3.70 3.71 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- mento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalha- | 117117118 |
| 3.693.703.71 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- mento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalha- mento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03) | 117117118118 |
| 3.69 3.70 3.71 3.72 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- mento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalha- mento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- fundeio (I01) Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalha- Mento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- | 117 117 118 118 |
| 3.69 3.70 3.71 3.72 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) | 117117118118119 |
| 3.69 3.70 3.71 3.72 3.73 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada fundeio (I01) Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03) Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03) | 117 117 118 118 119 |
| 3.69 3.70 3.71 3.72 3.73 | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01) | 117 117 118 118 119 |

| 3.74 | Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalha- | |
|------|---|-----|
| | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (IO3) | 120 |
| 3.75 | Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- | |
| | mento do vento e da corrente, em cada fundeio (I03) | 120 |
| 3.76 | Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalha- | |
| | mento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada | |
| | fundeio (I03) | 121 |
| 3.77 | Espectros de energia da tensão de cisalhamento do vento (V03) | 122 |
| 3.78 | Espectros de energia da tensão de cisalhamento do vento (I03) | 122 |
| 3.79 | Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as cor- | |
| | rentes no fundeio CF50 (V03) | 125 |
| 3.80 | Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as cor- | |
| | rentes no fundeio CF100 (V03) | 125 |
| 3.81 | Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as cor- | |
| | rentes no fundeio CF200 (V03) | 126 |
| 3.82 | Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as cor- | |
| | rentes no fundeio CF50 (I03) | 126 |
| 3.83 | Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as cor- | |
| | rentes no fundeio CF100 (I03) | 127 |
| 3.84 | Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as cor- | |
| | rentes no fundeio CF200 (I03) | 127 |
| 4.1 | Correntes subinerciais mais frequentes no inverno | 130 |
| 4.2 | Correntes subinerciais mais frequentes no verão | 131 |
| | | |

Lista de Tabelas

| 2.1 | Dados de corrente utilizados - período de inverno de 2001 (I01) | 30 |
|------|---|-----|
| 2.2 | Dados de corrente utilizados - período de verão de 2003 (V03) | 31 |
| 2.3 | Dados de corrente utilizados - período de inverno de 2003 (I03) | 32 |
| 2.4 | Séries Temporais eliminadas | 33 |
| 2.5 | Conjunto de dados de vento utilizados | 34 |
| 2.6 | Conjunto de dados utilizados | 34 |
| 3.1 | Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (I01) | 50 |
| 3.2 | Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (I01) | 51 |
| 3.3 | Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (V03) | 51 |
| 3.4 | Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (V03) | 52 |
| 3.5 | Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (I03) | 52 |
| 3.6 | Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (I03) | 53 |
| 3.7 | Média dos valores absolutos para cada componente filtrada, (V03) e (I03) | 55 |
| 3.8 | Faixas de período com oscilações energéticas das componentes de velocidade | |
| | filtradas, no inverno e verão de 2003 | 102 |
| 3.9 | Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (I01) | 114 |
| 3.10 | Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (I01) | 114 |
| 3.11 | Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (V03) | 114 |
| 3.12 | Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (V03) | 115 |
| 3.13 | Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (I03) | 115 |
| 3.14 | Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (I03) | 115 |
| 3.15 | Relação das frentes frias que chegaram ao Rio de Janeiro e Cabo Frio nos períodos | |
| | em estudo | 116 |

 $4.1 \quad \text{Resumo das direções mais frequentes das correntes na PC no inverno e verão} \quad . \quad 133$

Lista de Siglas e Abreviaturas

| 2D-ACM | - Scientific 2-Dimensional Acoustic Current Meter |
|---------|--|
| ACAS | - Água Central do Atlântico Sul |
| ADCP | - Acoustic Doppler Current Profiler |
| AVHRR | - Advanced Very High Resolution Radiometer |
| СВ | - Corrente do Brasil |
| CF | - Cabo Frio |
| CNPq | - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| CPTEC | - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do INPE |
| DEPROAS | - Dinâmica do Ecossistema de Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul |
| Ε | - Leste |
| ES | - Espírito Santo |
| FSI | - Falmouth Scientific Inc. |
| IEAPM | - Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira |
| INPE | - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IOUSP | - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo |
| | |

| LIO | - Laboratório de Instrumentação Oceanográfica |
|-----------|--|
| N | - Norte |
| NCAR | - National Center for Atmospheric Research |
| NCEP | - National Centers for Environmental Prediction |
| NE | - Nordeste |
| OPC | - Ondas de Plataforma Continental |
| РС | - Plataforma Continental |
| PCE | - Plataforma Continental Externa |
| PCI | - Plataforma Continental Interna |
| РСМ | - Plataforma Continental Média |
| PCSE | - Plataforma Continental Sudeste |
| PETROBRAS | - Petróleo Brasileiro S/A |
| РОМ | - Princeton Ocean Model |
| PRONEX | - Programa de Apoio a Núcleos de Excelência (CNPq) |
| RJ | - Rio de Janeiro |
| S | - Sul |
| SE | - Sudeste |
| SP | - São Paulo |
| SW | - Sudoeste |
| TSM | - Temperatura da Superfície do Mar |

| UESC | - Universidade Estadual de Santa Cruz |
|------|---------------------------------------|
| USP | - Universidade de São Paulo |
| VL | - Velocidade Longitudinal |
| VT | - Velocidade Transversal |
| W | - Oeste |
| WOCE | - World Ocean Circulation Experiment |

Capítulo 1

Introdução

1.1 A região de estudo

A região de estudo está localizada nas proximidades de Cabo Frio (RJ) e Arraial do Cabo (RJ) (aproximadamente 23° S / 42° W), no limite norte da Plataforma Continental Sudeste (PCSE), que é a região da plataforma continental atlântica que se estende, ao longo da costa brasileira, desde Cabo Frio, até o Cabo de Santa Marta, em Santa Catarina (Figura 1.1). Com um comprimento aproximado de 1100 km, de um modo geral a PCSE possui uma topografia suave, com as isóbatas dispondo-se paralelamente à linha da costa. Sua parte mais larga (230 km), está localizada em frente a Santos e as partes mais estreitas nas proximidades de Cabo Frio (50 km) e Cabo de Santa Marta (70 km) [*Castro*, 1996]. De acordo com *Zembruscki* [1979], a profundidade de quebra da plataforma varia entre 120 m e 180 m.

Cabo Frio (CF) tem despertado, a bastante tempo, o interesse de pesquisadores em virtude da ressurgência costeira que ocorre nas suas proximidades. A presença de águas de baixa temperatura, anormais pela latitude da região, é um fenômeno bastante conhecido e estudado, desde o trabalho pioneiro de *Allard* [1955]. O núcleo principal da ressurgência tem sido observado a oeste dessa localidade e possui forte sinal sazonal, concentrado nas estações de primavera e verão, do início de setembro ao final de abril [*Ikeda et al.*, 1974; *Miranda*, 1982]. O vento predominante de NE é considerado a principal forçante do fenômeno, de acordo com os autores já citados, dentre outros.



Figura 1.1: A Plataforma Continental Sudeste do Brasil (profundidade em metros). Figura extraída de *Mazzini* [2009].

1.2 Característicais gerais da região e estudos anteriores

1.2.1 Climatologia e estrutura termohalina

Apresentamos na Figura 1.2 as médias mensais da tensão de cisalhamento do vento sobre a PCSE e regiões adjacentes para os meses de janeiro e julho. A principal feição observada é a parte oeste do giro subtropical anticic1ônico (alta subtropical) presente no Atlântico Sul em latitudes médias (em torno de 30° S). Em geral, esse giro traz ventos provenientes de sudeste-nordeste para a costa situada entre 15° S e 25° S e

leva ventos provenientes de sudoeste-noroeste para o largo entre as latitudes de 35° S e 40° S. A posição e a profundidade da alta subtropical do Atlântico Sul apresentam oscilações sazonais, afetando diretamente a intensidade e também a direção da tensão de cisalhamento do vento sobre a plataforma continental. Durante o verão, os ventos predominantes sobre a região costeira situada entre 15° S e 35° S sopram principalmente de leste-nordeste. Durante o inverno, por outro lado, a banda de ventos proveniente de leste-nordeste, associada à alta subtropical, fica confinada entre as latitudes de 20° S e 25° S [*Castro*, 1996]; ou seja, ao longo de todo o ano, a região de estudo fica sujeita a ventos provenientes de E/NE.



Figura 1.2: Tensão de cisalhamento do vento na região oeste do oceano Atlântico Sul que encompassa a plataforma continental sudeste para os meses de janeiro (esquerda) e julho (direita). Figura desenhada por *Castro* [1996] com base nos dados interpolados por *Samuels & Cox* [1987].

Segundo *Castro* [1996], os sistemas frontais (frentes frias) caracterizam-se como sendo a perturbação meteorológica em escala sinótica mais importante sobre a PCSE. Geralmente esses sistemas têm sua gênese no oceano Pacífico entre 50° S e 60° S. A partir dessa origem, as perturbações se deslocam para leste, alcançando os Andes e interagindo com a circulação atmosférica existente sobre a América do Sul. Como consequência, esses sistemas adquirem quantidade de movimento que os impulsiona em direção ao equador, apresentando deslocamento preferencial de sudoeste para nordeste ao longo da costa leste do Brasil. Frequentemente, os sistemas frontais são observados propagando-se ao longo da costa entre 40° S e 20° S, embora possam atingir latitudes menores, em torno de 13° S, especialmente durante o inverno [*Kousky*, 1979].

Entre 20° S e 34° S a ocorrência de frentes frias varia ao longo do ano entre três

e seis por mês, resultando em escalas de tempo de cinco a dez dias entre as passagens. *Oliveira* [1986] mostra que a frequência de ocorrência de sistemas frontais tende a decrescer em direção ao equador e a crescer durante o inverno. Em média, entre 20° S e 25° S a mínima ocorrência é em fevereiro, tipicamente três por mês e a máxima em outubro, cinco por mês.

Coelho [2008], fez um estudo da resposta da PCSE à passagem de frentes frias no verão, obtendo um estado básico médio de correntes utilizando modelagem numérica através do POM. O autor verificou que durante a passagem da frente fria as correntes invertem em cerca de seis a nove horas após a passagem do sistema frontal por cada região da PCSE, sendo que a porção da PC localizada ao sul da Ilha de São Sebastião é a que responde com maior intensidade à passagem da frente fria. Já na região norte da PCSE a passagem de frentes frias no verão não alterou significativamente o estado básico climatológico desta estação, com correntes transientes apresentando as seguintes características (Figura 1.3):

- i) logo acima de CF fluem para SE;
- ii) entre CF e Saquarema, em toda a PC, as correntes enfrequecem em relação ao estado básico (Figura 1.16); e
- iii) as correntes para NE/N na PCI, entre Santos e a Baia de Guanabara ficam mais intensas.

Foi verificado que quatro horas e meia após a passagem da frente pelo Cabo de São Tomé, a PCSE já está próxima ao estado básico climatológico de verão (Figura 1.16).



Figura 1.3: Campo de correntes na superfície do oceano, trinta e uma horas e meia após a passagem da frente pelo Cabo de Santa Marta. Frente sobre o Cabo de São Tomé. Figura extraída de *Coelho* [2008].

Comparando-se o resultado acima descrito ao da circulação verticalmente integrada, com a frente deixando a região de estudo após 31,5 h da sua passagem pelo Cabo de Santa Marta (Figura 1.4), constatou-se um aspecto relevante na circulação barotrópica: foi verificado que em toda a <u>porção norte da PCSE</u>, situada acima da Ilha de São Sebastião, a passagem da frente fria parece não modificar a circulação verticalmente integrada (Figura 1.17).

Coelho [2008] modelou as etapas da subsidência costeira, em função da passagem das frentes frias, tendo ocorrido transporte de deriva do vento em direção à costa, na camada superficial (0-10 m) e transporte de compensação ao longo da coluna d'água, havendo empilhamento de água na região costeira. Dessa forma, a força de gradiente de pressão barotrópica desenvolvida implicou na formação e intensificação do jato costeiro em direção a menores latitudes.



Figura 1.4: Circulação verticalmente integrada na PCSE, 31,5 h após a passagem da frente fria pelo Cabo de Santa Marta. Figura extraída de *Coelho* [2008].

Segundo *Castro et al.* [2006], com base no trabalho regional de *Emílsson* [1961] e outros, as características termohalinas das massas de água presentes na PCSE são resultado da mistura entre:

- Água Tropical (AT) , quente e salina (T > 20 °C e S > 36,40; *Miranda* [1982]), transportada para o S-SW na camada superficial (0-200m) da Corrente do Brasil (CB), sobre o talude continental, nas proximidades da quebra da plataforma continental;
- **Água Central do Atlântico Sul (ACAS)**, relativamente fria (T < 20 °C e S < 36,40; *Miranda* [1982]), transportada também para o S-SW ao longo do talude continental na camada inferior da CB (200-500 m), próximo à quebra da plataforma continental;

Água Costeira (AC), resultante da mistura da descarga continental de água doce com

as águas da plataforma continental, sendo a menor salinidade (S < 34) das águas da PCSE devida, principalmente, ao efeito combinado dos muitos pequenos e médios rios que desaguam na região.

Conforme apresentado por *Castro et al.* [2006], na plataforma interna (PCI) existe predomínio da AC, a qual tende a ser verticalmente homogênea devido a processos de mistura. Ao largo dessa região observa-se a presença de águas com influência da AT, próximo à superfície e da ACAS, próximo ao fundo, principalmente no entorno da quebra da PC. A penetração sazonal da ACAS na PCSE é um fenômeno conhecido desde o trabalho de *Emílsson* [1961].

As estratificações horizontais e verticais de temperatura e de salinidade das águas da plataforma continental são determinadas pelos processos de mistura (advecção e difusão turbulenta), governados pelas correntes, trocas de calor e de massa com a atmosfera e trocas de massa com o oceano profundo e com as regiões estuarinas [*Castro et al.*, 2006].

No verão, a maior parte das temperaturas médias superficiais na PCSE está entre 25 °C e 27 °C (Figura 1.5). Na parte norte da PCSE o gradiente horizontal de temperatura é maior do que em outras regiões, tendo ainda orientação aproximadamente normal à costa. Essas últimas características estão associadas aos frequentes eventos de ressurgência costeira de águas relativamente frias nas proximidades de Cabo Frio. Nessa região, ao contrário das demais áreas da PCSE, as temperaturas decrescem em direção à costa: a isoterma de 21 °C está situada entre a costa e a isóbata de 50 m. Durante o inverno as temperaturas superficiais, nas partes central e norte da PCSE, apresentam valores entre 20 °C e 23 °C, sendo mais homogêneas do que durante o verão devido ao desaparecimento do núcleo com baixas temperaturas situado nas proximidades de Cabo Frio (Figura 1.6) [*Castro et al.*, 2006].

As temperaturas nas proximidades do fundo, durante o verão, apresentam os maiores valores (> 23 °C) na faixa mais interna da plataforma continental entre 24° S e 26° S de latitude (Figura 1.7). Ao norte de 24° S, as temperaturas próximas ao fundo são, em geral, menores do que 18 °C durante o verão, o que está também associado à região de ressurgência situada nas proximidades de Cabo Frio. De forma contrastante, entre a ilha de São Sebastião e a Baía da Guanabara, as temperaturas nas proximidades



Figura 1.5: Distribuição superficial de temperatura climatológica de verão na plataforma continental e talude sudeste, obtida com dados hitóricos [*Rezende*, 2003].

do fundo durante o inverno são maiores do que durante o verão, sendo os valores superiores a 20 °C (Figura 1.8). Assim, em geral, as temperaturas nas proximidades do fundo, com exceção da zona mais costeira da plataforma continental, são maiores durante o inverno do que durante o verão [*Castro et al.*, 2006].

Salinidades superficiais médias para o verão (Figura 1.9) indicam a influência da Água Tropical (AT) na parte mais externa da plataforma continental [*Rezende*, 2003]. Nessa região, salinidades maiores do que 36 podem ser observadas. Os menores valores nessa época do ano (< 34) estão presentes no espaço mais costeiro da PCSE, especialmente na sua parte central, próximo a 24,5° S. A influência da AT na camada superficial situada nas proximidades da quebra da plataforma continental pode ser observada também durante o inverno (Figura 1.10). Ainda durante essa estação, as salinidades na parte interna da plataforma continental são maiores do que durante o verão. A massa de água superficial fria oriunda do sul que penetra na PCSE durante o inverno possui salinidades relativamente baixas, com valores em torno de 34. As salinidades nas proximidades do fundo (Figuras 1.11 e 1.12) não apresentam grandes variações sazonais: os valores estão geralmente entre 35,0 e 35,5, decrescendo da quebra da plataforma continental em direção à costa [*Castro et al.*, 2006].



Figura 1.6: Distribuição superficial de temperatura climatológica de inverno na plataforma continental e talude sudeste, obtida com dados hitóricos [*Castro & Miranda*, 1998].



Figura 1.7: Distribuição próximo ao fundo da temperatura climatológica de verão na plataforma continental e talude sudeste, obtida com dados hitóricos [*Rezende*, 2003].



Figura 1.8: Distribuição próximo ao fundo da temperatura climatológica de inverno na plataforma continental e talude sudeste, obtida com dados hitóricos [*Castro & Miranda*, 1998].



Figura 1.9: Distribuição superficial de salinidade climatológica de verão na plataforma continental e talude sudeste, obtida com dados hitóricos [*Rezende*, 2003].



Figura 1.10: Distribuição superficial de salinidade climatológica de inverno na plataforma continental e talude sudeste, obtida com dados hitóricos [*Castro & Miranda*, 1998].



Figura 1.11: Distribuição próximo ao fundo da salinidade climatológica de verão na plataforma continental e talude sudeste, obtida com dados hitóricos [*Rezende*, 2003].



Figura 1.12: Distribuição próximo ao fundo da salinidade climatológica de inverno na plataforma continental e talude sudeste, obtida com dados hitóricos [*Castro & Miranda*, 1998].

1.2.2 Hidrodinâmica da plataforma continental

Os processos hidrodinâmicos da plataforma continental não são independentes daqueles de regiões oceânicas ou estuarinas. Contudo, as características da região costeira resultam em processos dinâmicos típicos dessas áreas. A presença da costa, gerando divergências unilaterias, o fundo raso, ocasionando dissipação de energia pelo atrito, a inclinação do fundo, induzindo alterações de vorticidade, o pequeno volume de água em comparação às regiões oceânicas, intensificando o ciclo sazonal de aquecimento/resfriamento das águas, as descargas estuarinas, causando alterações no campo de densidades e por fim a anisotropia que em geral ocorre nas escalas horizontais, influenciando no balanço de forças da equação do movimento, geram movimentos e processos físicos que muitas vezes diferem daqueles das áreas afastadas da costa *Castro[in prep.]*.

Como exemplos de processos hidrodinâmicos costeiros podemos citar: as interações da PC com as correntes de contorno, seus meandros e vórtices, de grande influência na circulação das PC externa e média; a ressurgência costeira e a propagação ao longo da costa de variações do nível do mar e os padrões de fluxo associados, conhecida como ondas costeiras confinadas.

Os movimentos na maior parte da PCSE são forçados, em diferentes escalas de tempo, principalmente pelos ventos, pela ação da Corrente do Brasil (CB) e pelas marés. Uma característica marcante da dinâmica das plataformas continentais é a resposta de suas águas a ventos superficiais com escala temporal sazonal e sinótica. As correntes geradas pelo vento podem ser as mais energéticas na PCSE e em geral são paralelas às isóbatas, para manter o balanço geostrófico na direção normal à topografia [*Castro*, 1996].

A região de estudo não apresenta descargas fluviais significativas que influenciem na sua dinâmica, a não ser na parte mais interna da plataforma continental.

Ressurgência

As áreas de ressurgência, embora representem menos de 1 % da superfície total dos oceanos, têm grande importância econômica, ecológica e climática, sendo responsáveis por cerca de 50 % da produtividade pesqueira mundial [*Rodrigues*, 1973].

Na costa brasileira, os principais núcleos de ressurgência costeira são observados do Rio Doce (ES) às proximidades da Ilha Grande (RJ), embora células mais fracas possam ser observadas ao longo da plataforma continental SE e S, até o litoral do Rio Grande do Sul [*Kampel et al.*, 1997].

A ressurgência é um fenômeno que ocorre em mesoescala espacial (dezenas a centenas de quilômetros) e na escala temporal subinercial (dias, semanas). Pode ser classificada em três categorias principais [*Smith*, 1968; *Hidaka*, 1972]: ressurgência costeira, de oceano aberto e equatorial. O fenômeno classifica-se no primeiro tipo quando movimentos ascendentes de massas de água têm sua influência nas proximidades da costa. O mecanismo básico da ressurgência costeira é a divergência unilateral, na costa, do transporte de deriva do vento.

Em torno de Cabo Frio, durante todo o ano, ventos de E e NE, especialmente durante o verão, geram transporte de volume na camada de Ekman superficial em direção ao largo. A divergência unilateral desse transporte requer, por continuidade, um transporte de ajuste, em direção à costa, que ocorre em toda coluna de água. Abaixo da camada de Ekman, o transporte de ajuste propicia penetração de massas de água subsuperficiais em direção à costa. Dependendo da intensidade e da persistência dos ventos, as águas subsuperficiais podem aflorar, fechando então o ciclo de ressurgência costeira [*Castro et al.*, 2006]. Diversos estudos mostram que a ACAS é a fonte das águas que afloram à costa nessa região [*Campos et al.*, 1995; *Valentin et al.*, 1987; *Miranda*, 1985, 1982]. Essa massa d'água fria, menos salina e com maior concentração de sais nutrientes do que a Água Tropical do oceano adjacente, estimula as produções primária e secundária. O significante papel da ressurgência no enriquecimento de nutrientes da coluna d'água é mostrado por *Matsuura* [1996] e *Matsuura* [1998].

Mais recentemente, *Lorenzzetti & Tanaka* [1990] implementaram um modelo numérico em duas camadas para estudar a ressurgência entre Cabo de São Tomé e Cabo Frio. Os resultados dos experimentos, além de comprovar a alta correlação existente entre o vento de leste-nordeste e o movimento vertical ascendente, também mostraram que o vento de sudoeste pode estancar o afloramento de água. Quando as frentes frias passam pela região de CF, os ventos de superfície rotacionam e passam a soprar do quadrante sul, inibindo o fenômeno da ressurgência [*Stech & Lorenzzetti*,
1992].

Rodrigues & Lorenzzetti [2001] observaram através de imagens TSM que as águas que afloram em CF fluem na direção W/SW. Esse padrão também encontra-se na literatura nos trabalhos de *Maglioca et al.* [1979] e *Ikeda* [1976].

Outros estudos apontam para mecanismos, além do transporte de Ekman, que desempenham um importante papel no bombeamento de águas frias sobre a PC, contribuindo para intensificar a ressurgência em CF. Tem sido conjecturado por alguns autores que a intensificação que ocorre ao largo de CF, bem como a localização das células de ressurgência estão relacionadas à topografia local do fundo [Valentin et al., 1987; Mascarenhas et al., 1971]. Os resultados de Rodrigues & Lorenzzetti [2001], através de modelagem numérica, indicam que tanto a topografia de fundo quanto a geometria da costa desempenham um importante papel no fenômeno. A presença de um cabo proeminente é acompanhada por uma abrupta mudança na orientação da linha de costa de NE/SW para E/W, que gera uma forte curvatura nas linhas de corrente, as quais adquirem vorticidade suficiente para gerar velocidades verticais substanciais. Somado a esse processo, a vorticidade relativa que favorece a ressurgência pode ser gerada através do mecanismo de estiramento do tubo de vórtice, quando o fluxo da Corrente do Brasil, ao passar pelo cabo, segue por inércia para SW atingindo maiores profundidades. Campos et al. [2000] e Castelão et al. [2004] utilizaram observações e modelagem numérica para mostrar a importância da ressurgência de quebra de plataforma induzida por meandros ciclônicos da CB.

A partir de dados de vento do satélite QUICKSCAT, *Castelão & Barth* [2006] verificaram a contribuição significativa do bombeamento de Ekman ao fenômeno da ressurgência, em função do rotacional da tensão de cisalhamento do vento negativo junto à costa durante todo o ano, com valores máximos no verão e mínimos no outono.

Do ponto de vista climático regional, os fortes processos de interação do ar com a pluma de água fria ressurgida afetam a circulação da brisa marinha, modelando o clima na região [*Franchito et al.*, 1998].

A Corrente do Brasil

A Corrente do Brasil, que é a corrente de contorno oeste associada ao giro subtropical do Atlântico Sul, está presente na parte mais externa da PCSE, fluindo para SW e tendo grande influência na dinâmica da região. O núcleo principal da CB, entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Baía da Guanabara (RJ) está próximo à borda da PC no verão e se afasta dela no inverno [*Paviglione & Miranda*, 1985]. Esse comportamento foi também observado por *Mello Filho* [2006], que, através de imagens termais da superfície do oceano, obtidas por sensores orbitais, verificou que no verão e no outono há uma tendência da frente interna da CB localizar-se a oeste da isobatimétrica de 200 m e no inverno numa posição intermediária das isobatimétricas de 200 e 1000 m.

Stramma et al. [1990] indicaram que, ao sul de 15° S, parte substancial do transporte da CB pode ocorrer na própria plataforma continental, em profundidades menores do que 200 m, devido ao alargamento desta última. Por meio de medições acústicas com o Pégasus, nas proximidades de Cabo Frio, *Evans & Signorini* [1985] obtiveram evidências de que cerca da metade do transporte de 11 Sv da CB ocorreria acima da isóbata de 200 m.

As primeiras descrições de vórtices e meandramentos da CB na região Sudeste, utilizando resultados da topografia dinâmica, foram apresentadas em relatórios de comissões oceanográficas da Diretoria de Hidrografia e Navegação do Ministério da Marinha [*DHN*, 1957] e no trabalho de *Mascarenhas et al.* [1971]. Nesses trabalhos foram descritas estruturas vorticais ciclônicas e anticiclônicas na região ao largo de CF.

Os vórtices e meandros da CB, na parte externa da PCSE, têm sido observados por dados hidrográficos clássicos [*Miranda et al.*, 1985; *Castro et al.*, 1987; *Campos et al.*, 1994] e por imagens de infravermelho por satélites [*Campos et al.*, 1995; *Mello Filho*, 2006].

Campos [1995] atribuiu a ocorrência de vórtices e meandros da CB à mudança de orientação da linha de costa e ao gradiente batimétrico existente na região Sudeste. O autor utiliza imagens AVHRR para ilustrar os meandros da CB (Figura 1.13). Segundo ele, ao passar por Cabo Frio, onde ocorre a mudança na orientação da linha de costa, a CB continuaria a fluir por inércia em regiões mais profundas. Seguindo os princípios da conservação de vorticidade potencial, a CB deve meandrar ciclonicamente e se comportar como uma onda de Rossby topográfica dentro da Bacia de Santos. Essa rotação ciclônica da corrente pode ser observada em dados hidrográficos [*Signorini*, 1978], em imagens termais da superfície do oceano provenientes de satélites [*Lorenzzetti & Stech*, 1994; *Mello Filho*, 2006] e em resultados de modelos [*Cirano*, 1995; *Coelho*, 2008]. Após penetrar na região costeira, cruzando as isóbatas quase perpendicularmente, a CB meandra em torno da quebra da PCSE.



Figura 1.13: Imagem AVHRR da costa sudeste brasileira exibindo os meandros da Corrente do Brasil (tons avermelhados). A linha sólida vermelha foi editada para realçar o padrão meandrante (de acordo com *Campos et al.* [1995]).

Marés

Na PCSE a constituinte M2 da maré é a dominante nas oscilações maregráficas do nível do mar, seguida pelas constituintes S2, O1 e K1 [*Mesquita & Harari*, 1987]. Devido à preponderância de M2, é apresentado nas Figuras 1.14 e 1.15 o mapeamento das

características gerais dessa constituinte na região oceânica oeste do Atlântico tropical. Pode-se observar (Figura 1.14) que as amplitudes são máximas na região do talude norte-nordeste do Brasil, diminuindo em direção ao sul. No extremo norte da PCSE as amplitudes na região do talude são da ordem de 0,3 m, continuando a decrescer até a área ao largo do cabo de Santa Marta, onde atingem apenas 0,1 m. Existe ainda uma convergência da fase em direção às áreas centrais da PCSE (Figura 1.15). Assim, aparentemente, a onda da constituinte M2 penetra na PCSE a partir de suas extremidades norte e sul [*Castro et al.*, 2006].



Figura 1.14: Amplitude em cm, da constituinte M2 de maré, mapeada por *Castro* [1996] a partir de altimetria de satélite de *Cartwright et al.* [1991].

Ondas de plataforma continental

Muitos aspectos da variabilidade induzida pelo vento sobre a margem continental podem ser explicados em termos das propriedades das ondas confinadas à costa. Tais ondas geralmente possuem períodos maiores que o período inercial, de forma que frequentemente desempenham um papel na resposta do oceano às mudanças do estado atmosférico, que tipicamente possuem escalas temporais de alguns



Figura 1.15: Fase em relação a Greenwich, em graus, da constituinte M2 de maré, mapeada por *Castro* [1996] a partir de altimetria de satélite de Cartwright *et al* (1991).

dias. As ondas são importantes porque são rapidamente excitadas e, através da sua propagação, disseminam a resposta do oceano na direção ao longo da costa [*Brink*, 1991].

O processo forçante das OPC é, em geral, o vento oscilante na direção paralela à costa [*Gill & Schumann*, 1974]. Essas ondas são confinadas na PC pela inclinação do fundo e, quando livres, deslocam-se unidirecionalmente com a costa à sua esquerda, no hemisfério sul. Sua relação de dispersão mostra que, em latitudes médias, os períodos naturais de ocorrência estão compreendidos entre 2 e 15 dias, estando portanto sintonizados com os períodos de oscilação do vento [*Castro et al.*, 2006].

As ondas de plataforma continental (OPC) têm sido identificadas como responsáveis pela variabilidade subinercial das correntes e do nível do mar em diversas PC. *Castro* [1985] e *Castro & Lee* [1995] concluíram que as oscilações subinerciais do nível do mar, nas partes central e norte da PCSE, são resultado da propagação de OPC na região, com períodos entre 6 e 12 dias.

1.2.3 Circulação na porção norte da PCSE

Apresentaremos aqui um resumo dos conhecimentos sobre a circulação na PCSE, com ênfase em sua porção norte.

De toda a PCSE, sua parte central tem sido a mais estudada. Os resultados desses estudos podem ser generalizados para parte substancial da PCSE, incluindo sua região norte.

Subdividimos as correntes, utilizando suas variabilidades temporais: correntes sazonais, subinerciais e de maré.

Correntes Sazonais

Registros observacionais [*Matsuura*, 1975; *Luedemann*, 1979] e resultados de modelos [*Caldas*, 1978; *Rezende*, 2003; *Coelho*, 2008] indicam que as correntes sazonais, na parte mais interna da PC, fluem ao longo da costa com direção predominante para N-E, desde o norte de Santos (SP) até as proximidades da Baía da Guanabara (RJ). Indícios dessa corrente costeira foram também observados por *Stevenson et al.* [1998] que, utilizando dados biológicos, da temperatura da superfície do mar e de derivadores, verificaram que organismos nativos de águas oceânicas mais frias e salinas são advectados para o N, ao longo da PCI, até cerca de 22° S. *Campos et al.* [1996] verificaram, a partir de trajetórias de derivadores (WOCE-type Low Cost Drifters), um fluxo costeiro em direção ao norte, de 29° S a 23° S. *Souza & Robinson* [2004] descreveram uma corrente costeira brasileira, relativamente lenta porém altamente energética, fluindo na direção oposta da CB. Sua ocorrência foi verificada da primavera ao inverno, atingindo no seu extremo norte latitudes médias de 25,2° S em agosto de cada ano.

Diversos trabalhos na parte central da PCSE [*Kvinge*, 1967; *Castro*, 1985, 1990a; *Miranda & Castro*, 1995; *Fontes*, 1995] mostram a alta correlação das correntes locais com os ventos predominantes. *Castro* [1985] modelou a resposta da PCSE à passagem de frentes frias. A resposta das águas a essa forçante ficou confinada à PC, com escala de decaimento neperiano de 70-120 km, a partir da costa. O tempo de resposta das águas ao vento impulsivo foi de aproximadamente 30h na parte norte da PCSE. O balanço resultante foi friccional, na direção paralela à costa, entre a tensão de cisalhamento do vento e a tensão de cisalhamento com o fundo e geostrófico, na direção normal à costa, entre as forças de Coriolis e de gradiente de pressão.

Através de modelagem, *Stech* [1990] simulou a resposta da PCSE a ventos típicos de inverno, tendo observado que o campo de velocidades apresentou a tendência de seguir as isóbatas, indicando um balanço geostrófico, com fluxo em direção S-SW, quando o vento predominante soprava de NE.

Na parte central da PCSE, *Castro* [1996] observou, no período de inverno, fluxo predominante para SW, tanto na PCI quanto na PCM, com eventos de inversão de corrente para NE um pouco mais frequentes na PCI. A intensidade das correntes paralelas à costa foi significativamente maior do que a das correntes normais. Na PCI e na PCM as correntes paralelas, no inverno, foram dominadas pelo modo barotrópico. Já para o fluxo normal à costa, na PCI os movimentos podem ser associados ao primeiro modo baroclínico. Para a PCM, *Castro* [1996] encontrou uma estrutura complicada, com grande cisalhamento vertical das correntes. No verão, na PCM, o fluxo para SW é o mais frequente. Já para a PCI não foi possível determinar um sentido predominante. Na PCE, tanto no verão quanto no inverno, os movimentos predominantes ocorreram para SW, sob influência da CB, confirmando os resultados de *Castro & Moreira* [1994], que apontaram correntes predominantes para SW durante todo o ano na parte mais externa da PC.

Castro [1996] observou a persistência de correntes para NE, contra o vento dominante, na PCI, durante o verão. *Maglioca et al.* [1979] detectaram, na região próxima a Cabo Frio, evidências de um fluxo costeiro de águas mais quentes para leste, nas camadas superiores. Essas correntes foram contrárias à direção do vento dominante, vindo do quadrante E/NE. Os autores sugeriram que esse fluxo é originado para compensar a divergência costeira. Essa contracorrente de superfície, movendo-se contra o vento, foi também detectada por *Ikeda et al.* [1974] na mesma região, durante o fenômeno da ressurgência. A causa desse fenômeno foi qualitativamente explicada como um efeito dinâmico induzido pela não uniformidade do campo de vento.

A existência de correntes com fluxo para NE, durante os meses de inverno, no limite de até 30 milhas da costa em CF, foi sugerida por *Miranda & Castro* [1979]. Nesse mesmo trabalho os autores identificaram correntes de pequena intensidade fluindo para NE, a 90 m de profundidade (entre as isóbatas de 100 e 200 m), 30 milhas a SW de Arraial do Cabo (RJ).

A Figura 1.16 apresenta o resultado do experimento de *Coelho* [2008] na superfície com as correntes médias geradas pelo vento médio e por diferenças de densidade (forçante baroclínica), onde verificou-se que as correntes que fluem para NE, paralelas à costa, ficaram confinadas entre a costa e a isóbata de 50-70 m até a região leste da Baia de Guanabara. No ponto central entre CF e RJ há uma convergência entre as correntes costeiras que fluem para NE/E e as correntes com direção SW/S que escoam entre as isóbatas de 100 e 200 m. Entre essa região e a Ilha Grande a corrente gira ciclonicamente incorporando-se ao escoamento para SW, mais ao largo. Nos demais níveis foi possível observar vórtices ou circulação ciclônica em frente a Cabo Frio, entre as isóbatas de 100 e 200 m. O autor verificou que nas direções normal e paralela à costa, em CF, predomina o balanço geostrófico e que as correntes médias na superfície, geradas por diferenças de densidade, próximo à costa escoam para N/NE/E até as proximidades de CF.

Observando-se a circulação verticalmente integrada (Figura 1.17), verificou-se uma grande célula ciclônica entre Itajaí e CF.

É possível verificarmos no experimento de *Coelho* [2008] que o jato costeiro estende-se até as proximidades de CF, entre a costa e a isóbata de 100 m, da superfície ao fundo. No nível de 44 m o autor observou correntes N/NE de CF até o ponto central entre essa localidade e o Cabo de São Tomé.

Apresentamos a seguir um resumo do escoamento modelado por *Coelho* [2008], nas proximidades de Cabo Frio:

- <u>Isóbata de 100 m</u>
 - da superfície até 30 m \Rightarrow escoamento para SW
 - de 44 m até o fundo \Rightarrow escoamento para E/SE

• Isóbata de 200 m

- da superfície até 100 m \Rightarrow escoamento para SW
- de 155 m até o fundo ⇒ não é possível determinar uma direção mais frequente



Figura 1.16: Correntes médias na superfície geradas pelo vento médio e por difirenças de densidade. Figura extraída de *Coelho* [2008]

Coelho [2008] apresenta também a distribuição vertical das correntes a partir de uma seção transversal à costa em CF, onde verificou-se que, próximo à costa a camada com escoamento para SW concentra-se nos 3 primeiros metros, tornando-se mais espessa em regiões ao largo, alcançando 200 m. Toda a água da PC, entre as isóbatas de 30 m e 100 m escoa para E. Os resultados indicam que abaixo de 10-30 m o escoamento é tipicamente para NE nas partes interna e média da PCSE.



Figura 1.17: Circulação vertical integrada gerada pelo vento médio e por diferenças de densidade. Figura extraída de *Coelho* [2008]

Correntes Subinerciais

Segundo *Castro & Miranda* [1998], na PCSE a maior variância das correntes na PCI e PCM está concentrada em duas bandas de períodos: 3-7 dias e 9-15 dias, o mesmo das oscilações do vento e do nível do mar, com as correntes estando altamente correlacionadas com o vento em ambas as bandas. A variabilidade subinercial das correntes na PCE apresenta um pouco de energia nos períodos entre 5 a 10 dias. Meandros e vórtices da CB contribuem eventualmente na variabilidade subinercial na PCE.

A forte influência dos ventos sobre as correntes subinerciais na PCSE foi primeiramente verificada por *Emilsson* [1962] no Canal de São Sebastião (CSS). Esse fato também foi constatado no mesmo local por *Castro* [1990a], que observou reversões da corrente com a passagem de frentes frias. Nesse trabalho o autor verificou que as componentes do vento e da corrente paralelas ao canal tiveram correlações significativas, com defasagem de 12-18h e liderança do vento. As faixas de frequência de maior variância das correntes foram 11-16 dias e 3 dias. Ainda no CSS, *Fontes* [1995] verificou que os períodos de 3 e 15 dias dos espectros de corrente foram os mais energéticos. Nos períodos entre 3 e 5 dias, houve uma liderança do vento sobre a corrente entre 10 e 15 h e nos períodos entre 10 e 15 dias a corrente liderou o vento em cerca de 6 h.

Stech & Lorenzzetti [1992], a partir de modelagem numérica, simularam a passagem de sistemas atmosféricos frontais sobre a PCSE. Verificou-se que esses sitemas são um dos principais mecanismos forçantes de baixa frequência da variabilidade do fluxo de inverno na plataforma e causam uma quase completa inversão das correntes. Os resultados mostraram que a resposta da PCSE à passagem de frentes frias é quase geostrófica e que uma parte das mudanças subinerciais do nível do mar e da variabilidade das correntes num ponto específico da região não são explicadas apenas pelos ventos locais, corroborando *Castro* [1985], cujos resultados indicam a importância de forçantes remotas para a PCSE e também *Castro & Lee* [1995], que verificaram que nas partes central e norte da PCSE as flutuações costeiras do nível do mar são melhor correlacionadas com os ventos localizados mais ao sul e que ocorreram mais cedo no tempo, especialmente nas bandas de 9 a 12 e de 6 a 7 dias. Outro resultado de *Stech & Lorenzzetti* [1992] indicou que próximo à costa a corrente flui na direção do vento com quase nenhuma diferença de fase. Já para a plataforma externa, ocorreu uma diferença de fase de 90°, típica do balanço de Ekman.

Os resultados de *Castro* [1996], nas proximidades de Ubatuba (SP), no período de inverno, mostraram que, na direção normal à costa, tanto na PCI quanto na PCM, os fluxos nas camadas intermediária e profunda estão melhor correlacionados entre si do que com os da camada superficial. Na PCI, para as correntes paralelas, verificouse uma concentração da energia nos períodos longos e médios (10-14 dias e 4-10 dias, respectivamente). Na faixa longa, a coerência entre as correntes e a tensão de cisalhamento do vento foi maior na PCI do que na PCM, com liderança da corrente de aproximadamente 50 h. Na banda de períodos menores houve correlação significativa entre o vento e a componente paralela da corrente na PCI, com o vento liderando em cerca de 18h. A correlação entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes normais foi pequena em ambas PCI e PCM. Também de acordo com *Castro* [1996], na PCM, no inverno, para as correntes paralelas à costa, a energia ficou concentrada nos períodos médios (6-10 dias) e curtos (3-4 dias), com coerências maiores na banda de períodos médios, onde o vento liderou com uma defasagem de cerca de 42 h. As oscilações da corrente na PCM e na PCI foram altamente coerentes, principalmente nas bandas de períodos média e curta. Em ambas as bandas a liderança foi da PCI, em cerca de 30 h na faixa média e de 15 h na curta. No verão, as correntes da PCM permanecem coerentes com o vento nas faixas médias e curtas.

Souza [2000] mostrou a falta de correlação entre as correntes na PCM e na PCE, ao largo de Santos (SP), com exceção para períodos curtos, de alguns dias, quando ocorreu forte atividade de meandros da CB.

Conforme *Castro et al.* [2006], em função da presença da costa, a resposta das águas da PC à forçante do vento não é direta. No caso de ventos de NE, paralelos à costa, como ocorre com maior frequência na região de estudo, o transporte de Ekman na camada superficial é perpendicular à costa em direção ao oceano. Essa divergência costeira provoca elevações no nível do mar ao largo, gerando dessa forma forças de gradiente de pressão normais e em direção à costa. O balanço dessas forças pela força de Coriolis, resulta num movimento geostrófico paralelo à costa, na direção e sentido do vento. De acordo com os autores o intervalo de tempo necessário para que o ajuste geostrófico ocorra é de 10 h a 20 h.

Correntes de Maré

Johannessen [1968] foi um dos pioneiros a abordar o fenômeno das correntes de maré. O autor verificou que ao largo de Cabo Frio essas correntes eram rotatórias.

De acordo com o estudo de *Alves* [1992] na parte central da PCSE, para as componentes de corrente paralelas à topografia, as correntes subinerciais contribuíram com cerca de 80 % da variância. Já para as componentes de corrente normais, as correntes de maré foram responsáveis por 40-50 % da variância total.

1.3 Objetivos

Conforme visto nas seções anteriores, pouco se conhece sobre a circulação subinercial na porção norte da PCSE. Devido à importância das correntes subinerciais, por serem responsáveis pelo transporte de substâncias dissolvidas ou em suspensão nas águas, tais como sedimentos, nutrientes e poluição, este trabalho visa a contribuir com um maior conhecimento desses campos de corrente, buscando os seguintes objetivos específicos:

- 1. Descrição e análise dos campos de corrente, em frequências subinerciais, que ocorrem na parte norte da plataforma continental sudeste brasileira; e
- 2. Análise e correlação dos padrões de vento local, com os registros de correntes na região de estudo.

Capítulo 2

Dados e Métodos de Análise

2.1 Dados

Foram utilizados dados coletados no Projeto DEPROAS (Dinâmica do Ecossistema de Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul), desenvolvido pelo Instituto Oceanográfico da USP conjuntamente com INPE, UESC e IEAPM e financiado pelo Programa de Núcleos de Excelência (PRONEX) do CNPq e pela PETROBRAS.

O DEPROAS foi um estudo interdisciplinar, englobando todas as áreas da oceanografia, tendo como foco a ressurgência de Cabo Frio. O principal objetivo era estudar os mecanismos físicos que possibilitam a penetração sazonal da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na área da PC localizada entre Cabo de São Tomé (RJ) e São Sebastião (SP) e os impactos dessa penetração nos processos biológicos dos ecossistemas da região.

Os trabalhos de coleta de dados iniciaram em dezembro de 2000 e tiveram duração de quatro anos. Durante todo o período, fundeios dotados de correntógrafos acústicos ou perfiladores acústicos de corrente (ADCP), descritos na seção 2.1.1, registraram dados de correntes enquanto dados de intensidade do vento eram registrados por bóias meteorológicas localizadas no ponto de fundeio mais próximo da costa (Figura 2.1).

Os fundeios foram distribuídos ao longo de três radiais, localizadas em frente à Ubatuba (SP), Rio de Janeiro (RJ) e Cabo Frio (RJ), tendo sido lançados três fundeios em cada radial, sobre as isóbatas de 50, 100 e 200 metros, com exceção da radial inter-



Figura 2.1: Estrutura dos fundeios do DEPROAS posicionados sobre a Plataforma Continental. Fonte: Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIO-IOUSP).

mediária, onde houve fundeios apenas nas isóbatas de 100 e 200 metros.

Para este trabalho utilizamos os dados coletados na radial de Cabo Frio (Figura 2.2), em três períodos: inverno de 2001 (I01), verão de 2003 (V03) e inverno de 2003 (I03), conforme descrito nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3.

Nessa radial, para o fundeio da plataforma média (100 m), inicialmente utilizaram-se correntógrafos acústicos, posteriormente substituídos por um ADCP, o qual ficou próximo ao fundo amostrando toda a coluna d'água. O fundeio na plataforma interna (50 m), contendo quatro correntógrafos, estava também equipado com uma estação meteorológica completa (bóia meteorológica), com sensores de intensidade e direção do vento, pressão atmosférica, temperatura e umidade do ar. Na plataforma média (100 m) e externa (200 m) os fundeios foram subsuperficiais, equipados com 4 e 5 correntógrafos, respectivamente, dispostos ao longo da vertical. As profundidades de instalação dos correntógrafos, em cada fundeio, constam nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3.



Figura 2.2: Posição dos fundeios do DEPROAS - Radial de Cabo Frio.

| Sigla do | Sigla do | Data e Hora do | Lat. de | Lon. de | Data e Hora da | Prof. | Número de | Data e Hora da | | Dados | | Ohser | rvações |
|----------|----------|----------------|---------------|-------------------|-----------------|-------|----------------|----------------|--------------------|---------------------|---|-------------------|------------------------------|
| Período | Fundeio | Lançamento | Lançamento | Lançamento | Inicialização | (m) | Correntógrafos | Recuperação | Nome do arquivo | Profundidade (m) | N ⁿ de série do correntógrafo | correntógrafos | fundeios |
| | | | | | | | | | DE0401 | 10 | 1351 | | |
| | CE SU | 27,06,01,12,05 | 770 40 7661 9 | 0/120 DK 6021 137 | 27.M6.M1 10-50 | 51.7 | ۲ ۲ | 11.00.01 10.00 | DE0402 | 22 | 1357 | immdado | anen antanko enatanentóreira |
| | R.D | CO'FT TO/00/17 | N 007,50 22 | W L70,00 270 | 20"01 10/00/77 | ·'1/ | r | nn'nt tn/on/tt | DE0403 | 35 | 1365 | | רחווו בפוסלסה זוובובהוההההוה |
| | | | | | | | | | DE0404 | 45 | 1345 | | |
| | | | | | | | | | DE0501 | 22 | 1342 | | |
| | CETON | 77.0C 1003017C | 320 DE ADRI C | 1110 KA KKU 117 | 27,06,001,17.50 | y W | , k | 10.001 10.00 | DE0502 | 75 | 1359 | | fundeio cortado por rede de |
| 101 | Crim | CC:07 10/00/17 | 40 UU,4UU V | W LUC.FC 140 | 2011 10/00/77 | r*22 | t | nn'ni in/on/ni | DE0503 | 85 | 1366 | antena danificada | pesca |
| | | | | | | | | | DE0504 | 95 | 1347 | | |
| - | | | | | | | | | DE0601 | 22 | 1320 | | |
| | | | | | | | 141 | | DE0602 | 85 | 1354 | | |
| | CF200 | 29/06/01 16:30 | 23° 44,52' S | 041° 44,86' W | 29/06/01 14:59 | 201,0 | 5 | 12/08/01 10:00 | DE0603 | 155 | 1344 | | |
| | | | | | | | | | DE0604 | 185 | 1343 | | |
| | | | | | | | | | DE0605 | 195 | 1348 | | |

Tabela 2.1: Dados de corrente utilizados - período de inverno de 2001 (I01).

| vações | fundeios | 10. 19. 19. 19. 19. 19. 19. 19. 19. 19. 19 | com estação meteorológica | (à deriva a partir de 22/03 às | 17:59) | ADP fundeado | | | | |
|-------------------------------|----------------------------|--|---------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------|--------|
| Ohsen | correntógrafos | | perdido | perdido | | | | | | |
| | N ⁿ de série do | correnugrato | 1364 | 1344 | 1341 | 379 | 1360 | 1350 | 1367 | 1361 |
| Dados | Profundidade | (m) | 10 | 30 | 45 | 100 | 77 | 85 | 155 | 195 |
| | Nome do | aryww | DE2301 | DE2302 | DE2303 | DE2401 | DE2501 | DE2502 | DE2503 | DE2504 |
| Data e Hora da Recuperação | | 06/05/03 21:00 | | | 06/05/03 11:00 | | 05/05/02 10:15 | כדיחד בחולחולם | | |
| Número de orrentógrafos | | 3 | | | | | ٢ | t | | |
| Prof. Local (m) | | 8 | | | 100 | | 306 | 077 | | |
| Data e Hora da | Inicialização | | 11/01/03 15:00 | | | | | 11 /01 /02 21 ·00 | 00'17 CO/IO/II | |
| Lon. de | Lançamento | | | 042° 07,340' W | | 041° 54,700' W | | 0.410 AA 9601 TJ7 | 041 44 ,000 W | |
| Lat. de Lançamento | | | 22° 59,030' S | | 23° 05,444' S | 23° 44,450' S | | | | |
| Data e Hora do | Lançamento | | | 11/01/03 13:50 | | 13/01/03 00:00 | | 11/01/02 10:25 | CC.71 CU/IU/II | |
| Sigla do | Fundeio | | | CF30 | | CF100 | | UUCAU | 017700 | |
| Sigla do | Período | 1 N | | | | τun | 3 | | | |

 Tabela 2.2:
 Dados de corrente utilizados - período de verão de 2003 (V03).

| | Sigla do | Data e Hora do | Lat. de | Lon. de | Data e Hora da | Prof. | Número de | Data e Hora da | | Dados | | Observ | ações |
|------|----------|-----------------|---------------|-------------------|----------------|-------|----------------|------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|---|---------------------------|
| 200 | Fundeio | Lançamento | Lançamento | Lançamento | Inicialização | (II) | Correntógrafos | Recuperação | Nome do arquivo | Profundidade (m) | Nº de série do correntógrafo | correntógrafos | fundeios |
| | CF50 | 07/05/03 18:00 | 22° 58,940' S | 042° 06,740' W | 07/05/03 21:00 | 50 | 3 | 31/08/03 00:00 | DE3301 | 01 | 1342 | dados gravados até 30/08 - o intervalo de amostragem no final do arq. está alterado | com estação meteorológica |
| | | | | | | | | | DE3302 | 8 | 1347 | | |
| | | | | | | | | | DE3303 | 45 | 1341 | | |
| | CF100 | 06/05/03 20:30 | 23° 05,460' S | 041° 54,540' W | 06/05/03 21:00 | 100 | | 06/02/04 00:00 | DE3401 | 100 | 379 | | ADP fundeado |
| | | | | | | | | | DE3501 | 22 | 1360 | | |
| | 00020 | 05,05,002,16,50 | 220 AA 5001 C | 0.410 AA 0701 137 | 0.50050050 | 000 | 2 | 05.002.002.00.20 | DE3502 | 85 | 1350 | | |
| | Cr200 | | 2 mr. ++ c7 | AA 0.00 +++ 1+0 | | 700 | t | 00.01 00/00//2 | DE3503 | 155 | 1367 | | |
| - 22 | 10 | 5. 10 | | | | | 10 10 | | DE3504 | 195 | 1361 | | |

Tabela 2.3: Dados de corrente utilizados - período de inverno de 2003 (I03).

Após o tratamento inicial dos dados, descrito na Seção 2.2, algumas séries temporais apresentaram inconsistências e foram eliminadas da análise, conforme a Tabela 2.4.

| Período | Fundeio | Profundidade (m) | Arquivo de Dados |
|---------|---------|------------------|------------------|
| V03 | CF200 | 195 | DE2504 |
| I03 | CF50 | 10 | DE3301 |
| I03 | CF50 | 30 | DE3302 |
| I03 | CF200 | 195 | DE3504 |

Tabela 2.4: Séries Temporais eliminadas.

Na interseção da radial com a costa, em Arraial do Cabo, foi instalada uma estação meteorológica, por segurança, para o caso de perda da bóia meteorológica. Os dados dessa estação também foram utilizados para verificarmos a coerência das informações coletadas pela bóia.

Além dos dados meteorológicos coletados pelas bóias e na estação de Arraial, em virtude de falhas de aquisição, algumas lacunas tiveram que ser preenchidas com dados de reanálise da base NCEP/NCAR, interpolados da grade original (1,875° X 1,90239°) para uma grade de $0,5^{\circ}$ X $0,5^{\circ}$ e para a posição 23° S / 42° W. Os dados de 'u' e 'v' (intensidade do vento nas direções zonal e meridional, respectivamente) dessa base de dados são referentes a uma altitude de 2 m, com um intervalo de 6 h entre amostragens.

As estações meteorológicas (bóia e Arraial) estão descritas na seção 2.1.1 e os dados de vento utilizados constam na Tabela 2.5. A Tabela 2.6 apresenta, de forma esquemática, todos os conjuntos de dados utilizados neste trabalho.

| | | Dados | | |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|---|
| Estação Meteorológica | Nome do arquivo | Início | Fim | Observações |
| Bóia | bo110801.dat | 28/06/01 01:31 | 12/08/01 11:01 | Foram utilizadas as linhas do arquivo de dados iniciadas pelo índice "111" |
| | est33.dat | 05/09/03 00:00 | 25/08/03 10:30 | |
| Arraial da Caba | artotal.dat | 27/06/01 13:00 | 12/08/01 10:00 | O arquivo "artotal.dat" foi montado a partir dos arquivos de dados dos meses de junho, julho e agosto de 2001 |
| Arraial do Cabo | ar_sel3_1.txt | 13/01/03 18:00 | 02/10/03 12:00 | |
| | ar_sel3_2.txt | 17/02/03 06:00 | 24/03/03 18:00 | |
| <u>.</u> | ar_sel3_3.txt | 04/11/03 18:00 | 05/05/03 06:00 | |
| | merid_wind_1.dat | 10/02/03 18:00 | 17/02/03 00:00 | |
| NCEP/NCAR | zonal_wind_1.dat | 10/02/03 18:00 | 17/02/03 00:00 | |
| NOEL MOAR | merid_wind_2.dat zonal_wind_2.dat | 25/03/03 00:00 | 11/04/03 12:00 | |

Tabela 2.5: Conjunto de dados de vento utilizados.

Tabela 2.6: Conjunto de dados utilizados.

| Ano | Dados | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago |
|------|-------------------------|-----|-------|-----|----------------|-------|------|-----|-------------|
| | Correntógrafos | | | | | | 27 🗲 | | → 12 |
| 2001 | Bóia Meteorológica | | | | | | 28 🗲 | | → 12 |
| | | | | | | | | | |
| | Correntógrafos / ADP | 13 | | | | 05 09 | | | 25 |
| 2002 | Bóia Meteorológica | | | | | 09 | | | 25 |
| 2005 | Estação Arraial | 13 | 10 17 | 24 | 11 | 05 | | | |
| | NCEP/NCAR | | 10 17 | 24 | → 11 | | | | |

As taxas de aquisição foram as seguintes:

- Correntógrafos
 - Intervalo entre aquisições (Interval Time): 15 min
 - Período de aquisição (On Time): 3 min
 - Médias (Average Interval): a cada 1 min
- ADCP
 - Intervalo entre aquisições (Burst Interval): 30 min
 - Nº de perfis gravados em cada período de aquisição (Profiler per Burst): 3
 - Médias (Average Interval): 1 min
 - Período entre perfis sucessivos (Profile Interval): 3 min

- Bóia Meteorológica
 - Valores instantâneos: a cada 2 min
 - Valores instantâneos: a cada 30 min
 - Média de 15 valores instantâneos: a cada 30 min
- Estação Meteorológica de Arraial
 - Valores instantâneos: a cada 1 min
 - Média de 60 valores instantâneos: a cada 1 h

2.1.1 Instrumentos

Correntógrafo

Foram utilizados correntógrafos 2D-ACM (Scientific 2-Dimensional Acoustic Current Meter) da Falmouth Scientific Inc. (FSI), que coletam, informam e armazenam dados instantâneos de intensidade da corrente nas duas dimensões horizontais, juntamente com dados de direção, inclinação, temperatura e dados de sensores opcionais. Esses dados podem ser informados em tempo real ou armazenados na memória interna do equipamento, sendo que a velocidade da corrente e a inclinação podem também ser informados e armazenados como médias vetoriais a partir de intervalos especificados.

O 2D-ACM, mostrado na Figura 2.3, é um equipamento portátil, que pode ser utilizado em profundidades até 200 m. Para a medição das correntes ele utiliza quatro transdutores acústicos.

Especificações gerais:

- Velocidade
 - Sensor: acústico
 - Range: 0-600 cm/s
 - Acurácia: 1 cm/s
 - Resolução: 0,01 cm/s



Figura 2.3: Correntógrafo 2D-ACM.

- Bússola
 - Sensor: magnetômetro triaxial
 - Range: 0-360°
 - Acurácia: $\pm \, 2^\circ$
 - Resolução: 0,01°
- Inclinação
 - Sensor: acelerômetro biaxial
 - Range: 0-45°
 - Acurácia: 0,5°
 - Resolução: 0,01°
- Temperatura
 - Sensor: semicondutor
 - Range: -2-35 °C
 - Acurácia: 0,1 °C
 - Resolução: 0,5 °C

Maiores informações podem ser obtidas no manual do equipamento, disponível no seguinte *site: www.falmouth.com/Manuals.html*

ADCP

Foi utilizado o perfilador acústico de correntes ADP da SonTek/YSI Inc.. Esse equipamente mede a velocidade da água, a partir de três transdutores acústicos, baseado no princípio físico do efeito Doppler. Os feixes sonoros são transmitidos e a reflexão do som nas partículas em suspensão (sedimentos, pequenos organismos e bolhas) é captada pelo equipamento, que calcula a velocidade da água em diversas distâncias do transdutor. O perfil de velocidades é separado em células de alcance (*cell range*), onde cada célula representa a média do sinal de retorno para um dado período (Figura 2.4).



Figura 2.4: Geometria dos feixes sonoros e da perfilagem de correntes do ADP.

As velocidades medidas pelos três feixes, em cada célula, são combinadas para o cálculo da velocidade 3D, referente a cada camada de profundidade. Essas velocidades são fornecidas em coordenadas cartesianas (XYZ) em relação ao ADP.

O ADP também dispõe de sensores de pressão, temperatura, inclinação e direção. Especificações gerais:

- Equipamento
 - Frequencia de operação: 250 kHz
 - Máximo alcance de perfilagem: 200 m
 - Profundidade mínima: 3,5 m
 - Resolução: 1,0-10 m
 - Distância cega (*blanking distance*¹): 1,5 m
 - Número de células: 30
 - Largura das células: 4 m
- Velocidade
 - Sensor: acústico
 - Acurácia: $\pm\,1$ % da velocidade medida, $\pm\,0.5~{\rm cm/s}$
 - Resolução: 0,1 cm/s
 - Range: \pm 10 m/s
- Bússola/Inclinação
 - Resolução (Direção, Pitch e Roll): 0,1°
 - Acurácia (Direção): $\pm \, 2^\circ$
 - Acurácia (Pitch e Roll):
 $\pm~1^\circ$

¹Região em frente aos transdutores onde nenhuma medida pode ser feita. É uma distância vertical em metros, a partir dos transdutores até a primeira célula.

Estações Meteorológicas

– Bóia Meteorológica

A Figura 2.5 mostra a boia meteorológica utilizada.



Figura 2.5: Bóia meteorológica.

As convenções direcionais da bóia meteorológica são mostradas na Figura 2.6. Ou seja, para obtermos a direção "para onde o vento vai" (conveção oceanográfica), basta somar o ângulo registrado pela bússola da bóia com o ângulo registrado pelo anemógrafo.

- Estação Meteorológica de Arraial do Cabo

Posição:

- Latitude: 22° 56,1′ S
- Longitude: 042° 04,8′ W



Figura 2.6: Convenções direcionais da bóia meteorológica.

Configuração da estação:

| Sensor | "Label" | Unidade |
|---------------------|----------|---------|
| Pressão Atmosférica | BARON | mBar |
| Vento | WIND SPD | nós |
| | WIND DIR | graus |
| Temperatura | AIR TEMP | °C |
| Umidade | VP-KPA | kPa |
| | VPD-KPA | kPa |

2.2 Métodos de Análise

O tratamento dos dados foi realizado no ambiente MATLAB (versão 0 6.5.0.180913a, release 13), a partir de rotinas internas do programa, de outras já consagradas pelo meio acadêmico ou ainda desenvolvidas pelo autor especificamente para este trabalho.

Antes do tratamento inicial, a partir dos dados brutos, plotamos a distribuição temporal (*stickplots*) dos vetores velocidade de corrente das séries disponíveis, para que pudéssemos selecionar os períodos a serem estudados, em função da coerência temporal e espacial dos dados, cujos registros foram contínuos nos correntógrafos de todos os fundeios. Selecionados os períodos, os dados de vento e corrente receberam um tratamento inicial, para o preenchimento de possíveis lacunas causadas por falha de registro ou alteração do intervalo de amostragem (Δt) e para a eliminação de dados espúrios ou "*spikes*" (erros acidentais), resultado de: 1) falhas no equipamento ocasionadas por problemas internos, como oscilações de voltagem; 2) alterações de leitura em virtude de pequenos organismos marinhos que possam ter aderido aos sensores ou interrompido sua leitura; ou 3) pequenos erros aleatórios [*Emery & Thomson*, 2001].

Para a investigação das lacunas, sendo N o número de amostras coletadas, verificamos se o período total de cada série (T) foi igual a $N\Delta t$.

Para a investigação dos "*spikes*" utilizamos o método estatístico de eliminação dos valores dos registros (*x*) que excedessem a média mais duas vezes o desvio padrão $(|x - \bar{x}| > 2\sigma)$, a partir de uma janela móvel (*box-car window*) contendo a média e o desvio padrão de um dia de registros. Os valores eliminados foram interpolados linearmente e o número de interpolações em cada série foi pequeno, em média 2,9 % dos registros. Um exemplo dessa etapa do processamento pode ser visto na Figura 2.7.

Após a recomposição das séries, foi feita a correção da declinação magnética das direções dos vetores velocidade, baseado na Carta Náutica 1508 da DHN: declinação magnética 20° 40′ W (1985), com acréscimo anual de 10′ W. A direção de máxima variância das correntes foi então calculada com a rotina *"rotmajax.m"*², tendo sido quase-paralela à isóbata local, nos três fundeios. Os vetores velocidade foram decom-

²Disponibilizada no *site* do Woods Hole Science Center: *http://woodshole.er.usgs.gov/operations/sea-mat/bobstuff-html/index.html*



Figura 2.7: Exemplo de edição de *"spikes"* na série temporal de velocidades de corrente do fundeio CF50, correntógrafo a 45 m.

postos nessa direção e em sua perpendicular, conforme exemplificado na Figura 2.8. Dessa forma, a componente paralela à topografia foi designada por velocidade longitudinal (VL) e a componente normal por velocidade transversal (VT). Os ângulos de rotação do eixo de referência, a partir do norte verdadeiro, no sentido horário, foram os seguintes:

| Período | Fundeio | Ângulo de rotação | Direção aproximada da isóbata local |
|---------|---------|-------------------|-------------------------------------|
| | CF50 | 111° | 96° |
| I01 | CF100 | 98° | 106° |
| | CF200 | 110° | 125° |
| | CF50 | 119° | 96° |
| V03 | CF100 | 93° | 106° |
| | CF200 | 85° | 125° |
| | CF50 | 102° | 96° |
| I03 | CF100 | 92° | 106° |
| | CF200 | 121° | 125° |



Figura 2.8: Eixos de referência para a decomposição dos vetores velocidade, em cada fundeio (I01).

Em seguida os dados foram filtrados de forma a selecionarmos as frequências de interesse para o estudo. A energia de marés foi retirada por um filtro passa-baixa com frequência de corte de $1/40 \text{ h}^{-1}$, baseado na metodologia proposta por *Walters & Heston* [1982]. O filtro é aplicado, no domínio da frequência, aos coeficientes de Fourier dos dados transformados (Fast Fourier Transform) após a retirada de sua média. Os dados filtrados são obtidos pela transformada inversa dos coeficientes remanescentes. Um exemplo dessa filtragem é apresentado na Figura 2.9. Foi utilizada a rotina "fourfilt.m"³.



Figura 2.9: Exemplo de utilização do filtro passa-baixa na série temporal de velocidades de corrente do fundeio CF100, correntógrafo a 75 m. A linha vermelha representa as séries filtradas.

As médias, desvios-padrão e correlações foram calculadas com rotinas internas do MATLAB.

³Disponibilizada no *site* do Woods Hole Science Center: *http://woodshole.er.usgs.gov/operations/sea-mat/RPSstuff-html/index.html*

Para o cálculo dos níveis de significância das correlações foi utilizada a metodologia proposta por *Sciremammano Jr.* [1979].

As análises espectrais, coerências e fases foram calculadas conforme metodologia apresentada em *Emery & Thomson* [2001] e *Bath* [1974]. Apresentamos a seguir um resumo dessa teoria.

Espectro, Potência e Energia de uma Função Temporal

Seja f(t) uma função temporal, de forma que $F(\omega)$ é sua correspondente função de frequência ou **espectro**. $F(\omega)$ também é chamada de <u>transformada de Fourier</u> de f(t):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt = a(\omega) - ib(\omega) = |F(\omega)|e^{i\Phi(\omega)}$$
(2.1)

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$
(2.2)

onde 2.2 representa a síntese das várias componentes espectrais $(F(\omega))$ contidas na função original f(t). $F(\omega)$ e f(t) formam um par Fourier representado por: $f(t) \leftrightarrow F(\omega)$.

A **potência** é proporcional ao quadrado da amplitude e o espectro correspondente é chamado de *espectro de potência*. No domínio do tempo, a potência média de qualquer função real f(t) é definida pela expressão: $\lim_{T\to\infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |f(t)|^2 dt$, quando esse limite existe. Na prática, T deve ser finito, $|f(t)|^2$ é chamado de potência instantânea de f(t) e a integral $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt$ é a **energia total** de f(t), quando essa integral converge.

A transformação de um registro para o domínio da frequência é chamada de espectro (*spectrum*). O espectro, tal como aplicado em geofísica, é uma quantidade estatística com uma expressão matemática definida, derivada de funções do tempo ou espaço, a partir de certas transformações. O espectro é em geral uma função complexa, que pode ser representada de duas formas:

- $F(\omega) = a(\omega) ib(\omega)$; ou
- $F(\omega) = |F(\omega)|e^{i\Phi(\omega)}$

onde,

$$|F(\omega)| = [a^2(\omega) + b^2(\omega)]^{\frac{1}{2}}$$

e

$$\Phi(\omega) = \tan^{-1}[-\frac{b(\omega)}{a(\omega)}] + 2n\pi, \qquad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Se $a(\omega)$ e $b(\omega)$ são amplitudes, então $|F(\omega)|$ é o <u>espectro de amplitude</u> e $\Phi(\omega)$ o respectivo espectro de fase.

Espectro de Potência ou Densidade Espectral de Potência (PSD⁴)

<u>Teorema de Parseval</u>: estabelece a relação entre a potência de um sinal f(t) e seu espectro $F(\omega)$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega$$

A quantidade real $|F(\omega)|^2$ é chamada de **espectro de potência** ou espectro de energia, ou, mais precisamente **densidade espectral de potência** ou densidade espectral de energia, ou seja, a potência ou energia por intervalo unitário na escala de frequência. Dois sinais com espectros de amplitude idênticos, porém com espectros de fase diferentes terão espectros de potência idênticos.

Na prática, considera-se apenas um intervalo finito T de f(t), assumindo-se f(t) = 0 fora desses limites:

$$\lim_{T \to \infty} \frac{1}{2\pi T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |F(\omega)|^2 d\omega$$
(2.3)

Nesse caso, $\frac{|F(\omega)|^2}{T}$ é chamado de <u>densidade espectral de potência</u> ou periodograma.

O espectro de potência de um sinal pode ser calculado de duas formas:

 Calculando-se o autocorrelação do sinal e então aplicando-se a transformada de Fourier; ou

⁴Power Spectral Density

2. Calculando-se a transformada de Fourier do sinal e então tomando-se o quadrado do seu valor absoluto.

Neste trabalho utilizamos o primeiro método. Sendo $C_{11}(\tau)$ a autocorrelação do sinal, temos:

$$C_{11}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{11}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$
(2.4)

$$E_{11}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{11}(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau$$
(2.5)

onde,

 $E_{11}(\omega) = |F_1(\omega)|^2$ = densidade espectral de potência

e

$$F_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) e^{-i\omega t} dt$$

Temos que: $C_{11}(\tau) \leftrightarrow E_{11}(\omega)$.

Neste trabalho a densidade espectral de potência das séries temporais foi calculada pelo método Welch, com a frequência amostral em ciclos por dia, de forma que cada série foi dividida em 5 seções com 50 % de sobreposição e cada seção foi suavizada com uma janela tipo Hamming. Em seguida foram calculados 5 periodogramas e feita a média.

Graus de liberdade: no espectro de potência, cada frequência corresponde a 2 graus de liberdade, já que, em virtude do teorema de Fourier, são necessárias duas constantes para caracterizar cada componente de frequência numa forma de onda. Como cada estimativa bruta tem 2 graus de liberdade, fazendo-se a média sobre *n* estimativas (método Welch), conduz a novas estimativas com 2*n* graus de liberdade. Dessa forma, trabalhamos com 10 graus de liberdade no cálculo dos espectros.

Coerência (γ)

A coerência é definida em termos do espectro de potência e do espectro de potência cruzado:

$$|\gamma_{12}(\omega)| = \frac{|E_{12}(\omega)|}{|E_{11}(\omega)E_{22}(\omega)|^{\frac{1}{2}}}, \qquad 0 \le |\gamma_{12}(\omega)| \le 1$$
(2.6)

Essa quantidade (γ), em função da sua definição, possui magnitude e fase.

A **coerência** é o espectro da correlação cruzada. Dessa forma, se a correlação cruzada $C_{12}(\tau)$ exibir valores altos em certos *lags* (τ), isso corresponderá a uma máxima coerência $\gamma_{12}(\tau)$ nas correspondentes frequências.

O espectro cruzado contém dois diferentes tipos de informação sobre a dependência entre dois processos:

- O espectro de coerência, que mede a correlação entre dois processos em cada frequência; e
- O espectro de fase, que mede a diferença de fase entre dois processos em cada frequência.

Capítulo 3

Resultados

3.1 Correntes subinerciais

3.1.1 Domínio do tempo

Estatística básica

Nas Tabelas 3.1 a 3.6 são apresentados os primeiros momentos estatísticos dos dados brutos e filtrados das componentes transversais e longitudinais das correntes.

A direção positiva do eixo das componentes transversais representa deslocamentos para o quadrante S-W e o das componentes longitudinais para o quadrante E-S.

Inverno de 2001

Nos três fundeios o valor mínimo de VT foi menor que o de VL, exceto nas proximidades do fundo de CF50 e CF100. Já para o valor máximo, nos fundeios de 50 m e 100 m, VT foi sempre menor que VL, enquanto que, no fundeio de 200 m, os valores máximos da componente normal foram menores que os valores máximos da componente longitudinal apenas nas profundidades intermediárias.

Com a filtragem dos dados, a redução média de variância de VT foi: 37,5% em 50 m, 48,9% em 100 m e 34,1% em 200 m. A redução média de variância de VL foi: 11,2% em 50 m, 11,4% em 100 m e 20,4% em 200 m.
Verão de 2003

Os valores mínimos de VT foram menores que os de VL, exceto próximo do fundo em CF200. Para os valores máximos, VL foi sempre maior, exceto na superfície em CF200.

A redução média de variância de VT foi: 71,2% em 50 m, 38,6% em 100 m e 23,8% em 200 m. A redução média de variância de VL foi: 8,4% em 50 m, 7,9% em 100 m e 13,5% em 200 m.

Inverno de 2003

Os valores mínimos de VT foram sempre menores do que os de VL e os valores máximos de VL foram sempre maiores, exceto na superfície em CF200.

A redução média de variância de VT foi: 71,4% em 50 m, 45,7% em 100 m e 36,1% em 200 m. A redução média de variância de VL foi: 15,3% em 50 m, 8,3% em 100 m e 11,5% em 200 m.

Tabela 3.1: Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (I01). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 .

| Estação | Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | $\overline{VL} \pm dp$ | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | VL'2 |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------------|------------------------|------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|--------|--------|
| CF50/10 | 27/06/01 13:15 | 07/08/01 06:17 | 3909 | 3,7 | -0,03 ± 0,10 | 0,10 ± 0,31 | 0,08 | 0,25 | -0,35 | 0,26 | 0,61 | -0,87 | 1,08 | 1,95 | 0,0101 | 0,0979 |
| CF50/35 | 27/06/01 13:15 | 07/08/01 06:17 | 3909 | 3,0 | 0,08 ± 0,09 | 0,08 ± 0,21 | 0,09 | 0,16 | -0,26 | 0,40 | 0,66 | -0,48 | 0,82 | 1,30 | 0,0087 | 0,0452 |
| CF50/45 | 27/06/01 13:15 | 07/08/01 06:17 | 3909 | 3,4 | -0,05 ± 0,10 | 0,01 ± 0,13 | 0,08 | 0,11 | -0,55 | 0,26 | 0,81 | -0,40 | 0,40 | 0,80 | 0,0108 | 0,0183 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF100/22 | 27/06/01 20:45 | 30/07/01 21:30 | 3171 | 2,6 | 0,07 ± 0,16 | 0,15 ± 0,42 | 0,15 | 0,34 | -0,36 | 0,54 | 0,90 | -0,49 | 1,08 | 1,57 | 0,0274 | 0,1772 |
| CF100/75 | 27/06/01 20:45 | 30/07/01 14:32 | 3144 | 2,7 | -0,04 ± 0,10 | 0,04 ± 0,23 | 0,08 | 0,20 | -0,35 | 0,26 | 0,61 | -0,53 | 0,56 | 1,09 | 0,0092 | 0,0525 |
| CF100/85 | 27/06/01 20:45 | 30/07/01 21:30 | 3171 | 3,1 | -0,06 ± 0,10 | 0,02 ± 0,21 | 0,09 | 0,18 | -0,45 | 0,26 | 0,71 | -0,51 | 0,47 | 0,98 | 0,0107 | 0,0441 |
| CF100/95 | 27/06/01 20:45 | 29/07/01 23:17 | 3083 | 3,4 | -0,10 ± 0,11 | 0,04 ± 0,13 | 0,13 | 0,11 | -0,46 | 0,31 | 0,77 | -0,32 | 0,40 | 0,72 | 0,0100 | 0,0200 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF200/22 | 29/06/01 16:30 | 12/08/01 10:00 | 4198 | 2,8 | 0,10 ± 0,15 | 0,03 ± 0,19 | 0,14 | 0,16 | -0,31 | 0,64 | 0,95 | -0,48 | 0,50 | 0,98 | 0,0216 | 0,0373 |
| CF200/85 | 29/06/01 16:30 | 12/08/01 10:00 | 4185 | 2,5 | 0,07 ± 0,13 | 0,04 ± 0,20 | 0,11 | 0,16 | -0,34 | 0,47 | 0,81 | -0,40 | 0,64 | 1,04 | 0,0166 | 0,0403 |
| CF200/155 | 29/06/01 16:30 | 12/08/01 06:32 | 4198 | 1,6 | 0,00 ± 0,09 | 0,10 ± 0,21 | 0,07 | 0,19 | -0,28 | 0,27 | 0,55 | -0,37 | 0,64 | 1,01 | 0,0086 | 0,0460 |
| CF200/185 | 29/06/01 16:30 | 12/08/01 10:00 | 4198 | 2,3 | 0,13 ± 0,18 | 0,03 ± 0,10 | 0,18 | 0,08 | -0,47 | 0,61 | 1,08 | -0,36 | 0,42 | 0,78 | 0,0337 | 0,0105 |
| CF200/195 | 29/06/01 18:15 | 12/08/01 10:00 | 4191 | 3,5 | 0,07 ± 0,15 | 0,05 ± 0,10 | 0,13 | 0,09 | -0,21 | 0,51 | 0,72 | -0,25 | 0,33 | 0,58 | 0,0223 | 0,0101 |

Tabela 3.2: Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (I01). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 ; % - porcentagem que a variância da série filtrada representa em relação à variância da série original.

| Estação | Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | VL ± | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | % | VL'2 | % |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------------|----------------|------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|--------|-------|--------|------|
| CF50/10 | 27/06/01 13:15 | 07/08/01 06:17 | 3909 | 3,7 | -0,03 ± 0,08 | 0,10 ± 0,30 | 0,06 | 0,25 | -0,23 | 0,16 | 0,38 | -0,75 | 0,98 | 1,73 | 0,0058 | 57,7 | 0,0921 | 94,0 |
| CF50/35 | 27/06/01 13:15 | 07/08/01 06:17 | 3909 | 3,0 | 0,08 ± 0,08 | 0,08 ± 0,21 | 0,09 | 0,16 | -0,09 | 0,31 | 0,40 | -0,35 | 0,70 | 1,05 | 0,0064 | 73,8 | 0,0423 | 93,6 |
| CF50/45 | 27/06/01 13:15 | 07/08/01 06:17 | 3909 | 3,4 | -0,05 ± 0,08 | 0,01 ± 0,12 | 0,06 | 0,09 | -0,30 | 0,09 | 0,39 | -0,26 | 0,27 | 0,53 | 0,0060 | 56,0 | 0,0144 | 78,6 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF100/22 | 27/06/01 20:45 | 30/07/01 21:30 | 3171 | 2,6 | 0,07 ± 0,14 | 0,15 ± 0,41 | 0,13 | 0,33 | -0,22 | 0,37 | 0,59 | -0,42 | 0,98 | 1,39 | 0,02 | 74,2 | 0,1725 | 97,4 |
| CF100/75 | 27/06/01 20:45 | 30/07/01 14:32 | 3144 | 2,7 | -0,04 ± 0,06 | 0,04 ± 0,22 | 0,06 | 0,19 | -0,21 | 0,10 | 0,30 | -0,46 | 0,45 | 0,91 | 0,0040 | 43,2 | 0,0478 | 91,0 |
| CF100/85 | 27/06/01 20:45 | 30/07/01 21:30 | 3171 | 3,1 | -0,06 ± 0,07 | 0,02 ± 0,20 | 0,07 | 0,17 | -0,23 | 0,09 | 0,32 | -0,46 | 0,43 | 0,89 | 0,0043 | 40,5 | 0,0402 | 91,2 |
| CF100/95 | 27/06/01 20:45 | 29/07/01 23:17 | 3083 | 3,4 | -0,10 ± 0,08 | 0,04 ± 0,11 | 0,11 | 0,10 | -0,27 | 0,10 | 0,37 | -0,25 | 0,30 | 0,55 | 0,0060 | 46,5 | 0,0132 | 74,8 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | |
| CF200/22 | 29/06/01 16:30 | 12/08/01 10:00 | 4198 | 2,8 | 0,10 ± 0,11 | 0,03 ± 0,17 | 0,11 | 0,15 | -0,11 | 0,39 | 0,50 | -0,33 | 0,35 | 0,68 | 0,0115 | 53,3 | 0,0308 | 82,6 |
| CF200/85 | 29/06/01 16:30 | 12/08/01 10:00 | 4185 | 2,5 | 0,07 ± 0,09 | 0,04 ± 0,19 | 0,09 | 0,15 | -0,14 | 0,29 | 0,43 | -0,29 | 0,50 | 0,79 | 0,0090 | 54,5 | 0,0353 | 87,6 |
| CF200/155 | 29/06/01 16:30 | 12/08/01 06:32 | 4198 | 1,6 | 0,00 ± 0,07 | 0,10 ± 0,21 | 0,06 | 0,19 | -0,18 | 0,16 | 0,34 | -0,25 | 0,59 | 0,84 | 0,0053 | 60,9 | 0,0439 | 95,3 |
| CF200185 | 29/06/01 16:30 | 12/08/01 10:00 | 4198 | 2,3 | 0,13 ± 0,16 | 0,03 ± 0,08 | 0,16 | 0,07 | -0,16 | 0,55 | 0,71 | -0,23 | 0,18 | 0,41 | 0,0271 | 80,3 | 0,0059 | 56,4 |
| CF200195 | 29/06/01 18:15 | 12/08/01 10:00 | 4191 | 3,5 | 0,07 ± 0,13 | 0,05 ± 0,09 | 0,11 | 0,08 | -0,13 | 0,47 | 0,60 | -0,15 | 0,23 | 0,38 | 0,0180 | 80,6 | 0,0077 | 76,3 |

Tabela 3.3: Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (V03). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 .

| Estação | Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | VL ± dp | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | VL'2 |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|--------|--------|
| CF50/45 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 12,4 | -0,01 ± 0,06 | 0,00 ± 0,15 | 0,05 | 0,13 | -0,25 | 0,26 | 0,51 | -0,39 | 0,59 | 0,97 | 0,0032 | 0,0232 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF100/22,5 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 1,9 | 0,03 ± 0,14 | 0,04 ± 0,32 | 0,10 | 0,22 | -0,51 | 0,63 | 1,13 | -0,62 | 1,66 | 2,27 | 0,0198 | 0,1049 |
| CF100/74,5 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 2,8 | 0,01 ± 0,08 | 0,04 ± 0,19 | 0,07 | 0,15 | -0,24 | 0,32 | 0,56 | -0,41 | 0,69 | 1,10 | 0,0067 | 0,0342 |
| CF100/86,5 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 2,5 | 0,01 ± 0,08 | 0,02 ± 0,17 | 0,07 | 0,14 | -0,28 | 0,34 | 0,62 | -0,45 | 0,61 | 1,06 | 0,0069 | 0,0296 |
| CF100/94,5 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 2,8 | 0,00 ± 0,08 | 0,01 ± 0,14 | 0,07 | 0,12 | -0,26 | 0,32 | 0,58 | -0,35 | 0,50 | 0,86 | 0,0065 | 0,0206 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF200/22 | 13/01/03 18:01 | 15/04/03 18:01 | 4417 | 2,7 | 0,14 ± 0,20 | -0,08 ± 0,22 | 0,19 | 0,19 | -0,42 | 0,71 | 1,13 | -0,81 | 0,57 | 1,38 | 0,0382 | 0,0492 |
| CF200/85 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 3,0 | 0,07 ± 0,11 | 0,03 ± 0,17 | 0,10 | 0,14 | -0,24 | 0,44 | 0,68 | -0,45 | 0,62 | 1,07 | 0,0113 | 0,0304 |
| CF200/155 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 9,3 | 0,07 ± 0.14 | 0,09 ± 0.15 | 0,13 | 0,13 | -0,39 | 0,43 | 0,82 | -0,26 | 0,62 | 0,88 | 0,0208 | 0,0229 |

Tabela 3.4: Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (V03). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 ; % - porcentagem que a variância da série filtrada representa em relação à variância da série original.

| Estação | Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | VL ± dp | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | % | VL'2 | % |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|--------------|------|--------|------|
| CF50/45 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 12,4 | -0,01 ± 0,03 | 0,00 ± 0,15 | 0,03 | 0,12 | -0,08 | 0,08 | 0,16 | -0,29 | 0,44 | 0,72 | 0,0009 | 28,8 | 0,0213 | 91,6 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF100/22,5 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 1,9 | 0,03 ± 0,12 | 0,04 ± 0,32 | 0,08 | 0,22 | -0,32 | 0,52 | 0,84 | -0,58 | 1,50 | 2,09 | 0,0148 | 74,7 | 0,1011 | 96,3 |
| CF100/74,5 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 2,8 | 0,01 ± 0,06 | 0,04 ± 0,18 | 0,05 | 0,15 | -0,16 | 0,19 | 0,35 | -0,34 | 0,54 | 0,87 | 0,0035 | 51,9 | 0,0312 | 91,0 |
| CF100/86,5 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 2,5 | 0,01 ± 0,06 | 0,02 ± 0,16 | 0,05 | 0,14 | -0,16 | 0,18 | 0,33 | -0,35 | 0,42 | 0,77 | 0,0040 | 57,6 | 0,0270 | 91,2 |
| CF100/94,5 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 2,8 | 0,00 ± 0,06 | 0,01 ± 0,14 | 0,05 | 0,12 | -0,17 | 0,17 | 0,34 | -0,27 | 0,36 | 0,63 | 0,0040 | 61,4 | 0,0186 | 89,9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF200/22 | 13/01/03 18:01 | 15/04/03 18:01 | 4417 | 2,7 | 0,14 ± 0,17 | -0,08 ± 0,20 | 0,16 | 0,17 | -0,28 | 0,60 | 0,88 | -0,66 | 0,37 | 1,03 | 0,0280 | 73,3 | 0,0412 | 83,6 |
| CF200/85 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 3,0 | 0,07 ± 0,09 | 0,03 ± 0,17 | 0,09 | 0,13 | -0,11 | 0,29 | 0,40 | -0,34 | 0,53 | 0,87 | 0,0073 | 64,8 | 0,0276 | 90,8 |
| CF200/155 | 13/01/03 18:01 | 05/05/03 06:01 | 5353 | 9,3 | 0,07 ± 0,14 | 0,09 ± 0,14 | 0,13 | 0,12 | -0,28 | 0,36 | 0,64 | -0,17 | 0,55 | 0,72 | 0,0188 | 90,5 | 0,0195 | 85,2 |

Tabela 3.5: Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (I03). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 .

| Estação | Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | VL ± dp | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | VL'2 |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|--------------|--------|
| CF50/10 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 2,6 | -0,01 ± 0,07 | 0,05± 0,17 | 0,06 | 0,14 | -0,29 | 0,31 | 0,60 | -0,40 | 0,57 | 0,97 | 0,0054 | 0,0305 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF100/22,5 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 2,1 | 0,06 ± 0,16 | 0,17 ± 0,45 | 0,14 | 0,33 | -0,48 | 0,62 | 1,10 | -0,47 | 1,82 | 2,29 | 0,0265 | 0,2001 |
| CF100/74,5 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 1,9 | -0,01 ± 0,09 | 0,05 ± 0,25 | 0,07 | 0,19 | -0,38 | 0,31 | 0,69 | -0,57 | 1,07 | 1,65 | 0,0086 | 0,0601 |
| CF100/86,5 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 2,1 | -0,01 ± 0,10 | 0,03 ± 0,22 | 0,08 | 0,17 | -0,43 | 0,36 | 0,79 | -0,59 | 0,81 | 1,40 | 0,0095 | 0,0467 |
| CF100/94,5 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 2,4 | -0,01 ± 0,10 | 0,02 ± 0,18 | 0,08 | 0,14 | -0,44 | 0,36 | 0,80 | -0,47 | 0,59 | 1,05 | 0,0101 | 0,0317 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF200/22 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 3,1 | -0,02 ± 0,16 | -0,05 ± 0,17 | 0,12 | 0,14 | -0,51 | 0,64 | 1,15 | -0,49 | 0,56 | 1,05 | 0,0259 | 0,0279 |
| CF200/85 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 3,4 | -0,01 ± 0,12 | 0,01 ± 0,22 | 0,09 | 0,17 | -0,38 | 0,38 | 0,75 | -0,48 | 0,76 | 1,24 | 0,0134 | 0,0486 |
| CF200/155 | 09/05/03 00:01 | 24/08/03 19:31 | 5175 | 5,5 | 0,01 ± 0,08 | 0,10 ± 0,20 | 0,07 | 0,17 | -0,22 | 0,34 | 0,57 | -0,55 | 0,66 | 1,21 | 0,0069 | 0,0409 |

Tabela 3.6: Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (I03). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 ; % - porcentagem que a variância da série filtrada representa em relação à variância da série original.

| Estação | Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | VL ± dp | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | % | VL'2 | % |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|--------|------|--------|------|
| CF50/45 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 2,6 | -0,01 ± 0,04 | 0,05 ± 0,16 | 0,03 | 0,13 | -0,13 | 0,15 | 0,28 | -0,34 | 0,48 | 0,82 | 0,0016 | 28,6 | 0,0258 | 84,7 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF100/22,5 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 2,1 | 0,06 ± 0,14 | 0,17 ± 0,44 | 0,12 | 0,32 | -0,31 | 0,47 | 0,78 | -0,41 | 1,82 | 2,23 | 0,0195 | 73,6 | 0,1931 | 96,5 |
| CF100/74,5 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 1,9 | -0,01 ± 0,06 | 0,05 ± 0,24 | 0,05 | 0,19 | -0,23 | 0,15 | 0,39 | -0,49 | 0,72 | 1,21 | 0,0038 | 44,1 | 0,0554 | 92,3 |
| CF100/86,5 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 2,1 | -0,01 ± 0,07 | 0,03 ± 0,21 | 0,05 | 0,16 | -0,21 | 0,19 | 0,40 | -0,53 | 0,49 | 1,01 | 0,0046 | 48,0 | 0,0422 | 90,2 |
| CF100/94,5 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 2,4 | -0,01 ± 0,07 | 0,02 ± 0,17 | 0,06 | 0,13 | -0,21 | 0,22 | 0,44 | -0,37 | 0,40 | 0,77 | 0,0052 | 51,6 | 0,0278 | 87,7 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CF200/22 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 3,1 | -0,02 ± 0,14 | -0,05 ± 0,15 | 0,10 | 0,13 | -0,36 | 0,43 | 0,79 | -0,38 | 0,42 | 0,81 | 0,0187 | 72,2 | 0,0221 | 79,5 |
| CF200/85 | 09/05/03 00:01 | 25/08/03 10:31 | 5206 | 3,4 | -0,01 ± 0,09 | 0,01 ± 0,21 | 0,07 | 0,16 | -0,31 | 0,22 | 0,53 | -0,40 | 0,63 | 1,03 | 0,0082 | 60,9 | 0,0449 | 92,4 |
| CF200/155 | 09/05/03 00:01 | 24/08/03 19:31 | 5175 | 5,5 | 0,01 ± 0,06 | 0,10 ± 0,20 | 0,05 | 0,16 | -0,13 | 0,19 | 0,32 | -0,40 | 0,54 | 0,94 | 0,0040 | 58,5 | 0,0383 | 93,6 |

Analisando-se os dados filtrados verificou-se o seguinte:

- A variância da componente do vetor velocidade paralela à batimetria (VL) foi quase sempre maior, exceto nas proximidades do fundo no fundeio de 200 m, no inverno de 2001.
- O valor médio da componente do vetor velocidade normal à batimetriade (VT) foi quase sempre menor que o de VL, exceto próximo ao fundo nos fundeios CF100 e CF200, no inverno de 2001.
- Em geral, as correntes longitudinais são mais intensas e possuem variabilidade temporal com maior energia do que as correntes transversais. Com a filtragem dos dados, a redução da variância foi sempre maior para as componentes normais, indicando que as correntes de maré têm maior influência na direção normal à batimetria. Houve um aumento dessa redução nos períodos de inverno.
- Em todos os fundeios, no verão e no inverno, a corrente paralela média foi positiva, indicando um fluxo preferencial para E-S. As únicas exceções ocorreram no correntógrafo superficial de CF200, no verão e inverno de 2003. Para a corrente transversal média, cujo eixo de referência reflete a direção média dos ventos para a região, em geral o fluxo dominante foi para S-W no verão e para N-E no inverno.

 A intensidade média das correntes filtradas transversais à batimentria diminuiu do largo para a costa, tanto no verão quanto no inverno de 2003. Já as correntes paralelas foram mais intensas na plataforma média em ambas as estações. A média dos valores absolutos para cada componente, considerando-se os períodos de verão e inverno de 2003, são apresentados na Tabela 3.7:

Tabela 3.7:Média dos valores absolutos para cada componente filtrada, nos períodos de verão einverno de 2003.

| | Verão | 2003 | Inverno 2003 | | | | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--|--|--|--|
| Fundeio | $\overline{ VT } (m/s)$ | $\overline{ VL }$ (m/s) | $\overline{ VT }$ (m/s) | $\overline{ VL }$ (m/s) | | | | |
| CF50 | 0,03 | 0,12 | 0,03 | 0,13 | | | | |
| CF100 | 0,06 | 0,16 | 0,07 | 0,20 | | | | |
| CF200 | 0,13 | 0,14 | 0,07 | 0,15 | | | | |

• Em todas as séries o desvio padrão foi maior que a média, indicando que essa medida não é representativa do padrão local de correntes mais frequentes.

A análise dos dados não filtrados praticamente apresentou os mesmos resultados.

Diagramas de Dispersão

A distribuição espacial dos dados não filtrados das correntes é apresentada em diagramas de dispersão (*scatterplots*), nas Figuras 3.1 a 3.8.

Apresentamos a seguir um exame de cada diagrama.

```
Inverno de 2001
```

- **CF50:** exceto para a profundidade intermediária, o fluxo predominante ocorre quase paralelo à direção da isóbata local.
- **CF100:** o fluxo predominante, em toda a coluna d´água, aproxima-se bastante da direção da isóbata local.

CF200: o fluxo predominante, da superfície para o fundo, aproxima-se gradativamente da direção paralela à topografia, até a profundidade de 155 m e passa a fluir quase perpendicular às isóbatas, nas proximidades do fundo.

Verão de 2003

CF50: próximo ao fundo as correntes cruzam as isóbatas na direção SE-NW.

- CF100: em toda a coluna d'água o fluxo está bem próximo da direção da isóbata local.
- **CF200:** na superfície o fluxo predominante ocorre quase perpendicular à isóbata local, vai se aproximando da mesma em direção ao fundo, onde se afasta novamente.

Inverno de 2003

- **CF50:** perto do fundo o fluxo é quase paralelo à topografia.
- **CF100:** de forma geral as correntes fluem quase paralelas às isóbatas.
- **CF200:** exceto nas profundidades mais rasas, as correntes fluem proximamente na direção das isóbatas.



Figura 3.1: Diagrama de dispersão do fundeio CF50 (I01).



Figura 3.2: Diagrama de dispersão do fundeio CF100 (I01).



Figura 3.3: Diagrama de dispersão do fundeio CF200 (I01).



Figura 3.4: Diagrama de dispersão do fundeio CF50 (V03).



Figura 3.5: Diagrama de dispersão do fundeio CF100 (V03).



Figura 3.6: Diagrama de dispersão do fundeio CF200 (V03).



Figura 3.7: Diagrama de dispersão do fundeio CF50 (I03).



Figura 3.8: Diagrama de dispersão do fundeio CF100 (I03).



Figura 3.9: Diagrama de dispersão do fundeio CF200 (I03).

A análise dos diagramas de dispersão mostra a tendência de um fluxo geostrófico dominante em toda a plataforma. Os movimentos mais frequentes ocorreram na direção NW-SE, aproximadamente paralelos às isóbatas locais. Nota-se também, que nas proximidades da superfície as correntes tendem a acompanhar a direção média do vento local (NE-SW), conforme apresentamos na seção 1.2.1. Esse padrão geral do fluxo não apresentou variações sazonais significativas.

No correntógrafo de fundo de CF50, no verão de 2003, verificou-se uma tendência das correntes de cruzarem as isóbatas, dando indícios de eventos de ressurgência costeira.

Stickplots

A distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados (*stickplots*) é apresentada nas Figuras 3.10 a 3.18.

Em todos os períodos, a variabilidade subinercial das correntes fica evidenciada, bem como a correlação visual entre os eventos ocorridos nos diversos níveis de um mesmo fundeio. Essa correlação se degrada um pouco próximo ao fundo, principalmente nos fundeios CF200, que, além da influência da camada limite de fundo, sofrem ação da dinâmica de quebra de plataforma. Essa correlação vertical indica um comportamento fortemente barotrópico para as correntes subinerciais, tanto no inverno quanto no verão. Constata-se, ainda, uma polarização das correntes na direção E-W.

A partir de uma média visual das inversões de corrente ocorridas em todos os períodos e em todas as profundidades, chegou-se a um valor de 4 eventos por mês, que é a mesma média de frentes frias que atingiram o litoral do Rio de Janeiro, como pode ser visto na Tabela 3.15. Esse fato sugere uma correlação entre o vento e a corrente, que pode também ser observada nos gráficos, quando comparamos os vetores tensão de cisalhamento do vento e os vetores velocidade de corrente.



Figura 3.10: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF50 (I01).



Figura 3.11: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF100 (I01).



Figura 3.12: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF200 (I01).



Figura 3.13: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF50 (V03).



Figura 3.14: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF100 (V03).



Figura 3.15: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF200 (V03).



Figura 3.16: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF50 (I03).



Figura 3.17: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF100 (I03).



Figura 3.18: Distribuição temporal dos vetores velocidade de corrente e dos vetores tensão de cisalhamento do vento filtrados do fundeio CF200 (I03).

<u>Médias</u>

A média do vetor velocidade do vento e dos vetores velocidade da corrente filtrados são apresentados nas Figuras 3.19 a 3.21.

Inverno de 2001

A direção média do vento foi para SW. Para as correntes, a direção média ficou assim distribuída: no fundeio de 50 m, próximo à superfície, a direção média foi para E, na profundidade intermediária para SE e no fundo para NE. No fundeio de 100 m, próximo à superfície, a direção média foi para SE e nas profundidades intermediárias e no fundo para NE. No fundeio de 200 m, exceto para a profundidade de 95 m, onde a direção média foi para SE, no restante da coluna de água a direção média ocorreu para S.

Verão de 2003

A direção média do vento foi para SW. Para as correntes, a direção média ficou assim distribuída: no fundeio de 50 m, próximo ao fundo a direção média ocorreu para NE. No fundeio de 100 m, próximo à superfície, a direção média foi para SE e nas profundidades intermediárias e no fundo para E. No fundeio de 200 m, na superfície a direção média foi para SW e nas profundidades intermediária e no fundo a direção média ocorreu para SE.

Inverno de 2003

A direção média do vento foi para SW. Para as correntes, a direção média ficou assim distribuída: no fundeio de 50 m, próximo ao fundo a direção média foi para E. No fundeio de 100 m, próximo à superfície, a direção média foi para SE e nas profundidades intermediárias e no fundo para NE. No fundeio de 200 m, na superfície a direção média foi para NW, na profundidade intermediária para NE e no fundo a direção média ocorreu para SE.



Figura 3.19: Médias do vetor velocidade do vento e dos vetores velocidade da corrente filtrados (I01). Abreviaturas: **S** - superfície; I_1 , I_2 e I_3 - profundidades intermediárias; **F** - fundo.



Figura 3.20: Médias do vetor velocidade do vento e dos vetores velocidade da corrente filtrados (V03). Abreviaturas: **S** - superfície; I_1 , I_2 e I_3 - profundidades intermediárias; **F** - fundo.



Figura 3.21: Médias do vetor velocidade do vento e dos vetores velocidade da corrente filtrados (I03). Abreviaturas: **S** - superfície; I_1 , I_2 e I_3 - profundidades intermediárias; **F** - fundo.

Pela análise dos gráficos, não ocorreu variação sazonal da direção predominante dos ventos para SW. Um exame da direção média da corrente na superfície, entre os fundeios CF100 e CF200, sugere a ocorrência de um meandro ou vórtice ciclônico nessa camada, em especial no inverno de 2003. Além disso, o fundeio CF200 é o que apresenta as maiores variações sazonais na direção média das correntes, enquanto que nos fundeios CF50 e CF100 essas variações são bem pequenas.

Rosas de Distribuição de Correntes

As Figuras 3.22 a 3.30 apresentam as Rosas de Distribuição das correntes em classes de 22,5°, para cada período.

Inverno de 2001

- **CF50:** próximo à superfície as correntes mais frequentes ficaram polarizadas na direção SE-NW, aproximadamente paralelas à isóbata local. Na profundidade intermediária as correntes mais frequentes apontaram para o quadrante E-S, seguidas daquelas que fluiram para o quadrante S-W. No fundo as correntes com maior frequência fluíram para o quadrante NW-NE, cruzando as isóbatas em direção ao continente.
- **CF100:** próximo à superfície as correntes mais frequentes fluíram para E, seguidas por aquelas que apontaram para o quadrante S-W, cruzando perpendicularmente as isóbatas. Nas profundidades intermediárias, o fluxo ficou polarizado na direção SE-NW, aproximadamente paralelo à topografia e próximo ao fundo as correntes mais frequentes tiveram direção predominante para o quadrante N-E, cruzando as isóbatas no sentido oposto ao segundo grupo de correntes mais frequentes da superfície.
- **CF200:** exceto na profundidade intermediária, onde o fluxo ficou polarizado na direção quase paralela à topografia, no restante da coluna d´água as correntes mais frequentes fluíram perpendicularmente às isóbatas, para o quadrante S-W.

Verão de 2003

- **CF50:** nas proximidades do fundo as correntes mais frequentes ficaram polarizadas na direção NW-SE, cruzando as isóbatas.
- **CF100:** próximo à superfície as correntes mais frequentes cruzaram a isóbata local apontando para o quadrante S-W, seguidas das que fluiram para E. No restante da coluna d´água as correntes mais frequentes ficaram polarizadas na direção NW-SE, quase paralela à topografia.
- CF200: em todas as profundidades as correntes mais frequentes fluem para o quadrante SW-SE. Próximo à superfície, perpendiculares à topografia no rumo SW. Na profundidade intermediária, aproximadamente paralelas à topografia, na direção SE e em menor número seguindo para SW. Próximo ao fundo o fluxo é quase paralelo à topografia, em direção SE.

Inverno de 2003

- **CF50:** próximo ao fundo as correntes mais frequentes aproximam-se da direção paralela à topografia.
- **CF100:** próximo à superfície as correntes mais frequentes cruzaram a isóbata local em direção ao quadrante NE-SE, seguidas das que fluiram para o quadrante S-W. No restante da coluna d´água verificou-se uma polarização das correntes mais frequentes na direção NW-SE, aproximadamente paralelas à topografia.
- **CF200:** as correntes mais frequentes, próximo à superfície, apontaram para o quadrante N-W, convergindo para a costa. Nas profundidades intermediária e próximo ao fundo as observações ficaram polarizadas na direção NW-SE, porém com rumos mais frequentes invertidos, para NW e SE respectivamente. Em todas as profundidades as correntes mais frequentes ficaram aproximadamente paralelas às isóbatas.

- Inverno de 2001:



Figura 3.22: Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF50 (I01). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.23: Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF100 (I01). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.24: Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF200 (I01). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.

- <u>Verão de 2003</u>:



Figura 3.25: Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF50 (V03). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.26: Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF100 (V03). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.27: Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF200 (V03). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.

- Inverno de 2003:



Figura 3.28: Rosas de distribuição de correntes filtradas, em classes de 22,5°, do fundeio CF50 (I03). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.29: Rosas de distribuição de correntes filtradas, em classes de 22,5°, do fundeio CF100 (I03). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.30: Rosas de distribuição de correntes em classes de 22,5°, do fundeio CF200 (I03). O gráfico superior apresenta os dados brutos e o inferior os filtrados. Na coluna da esquerda temos as médias das velocidades para cada classe de direção e na coluna da direita o número de observações no período, para cada classe de direção. A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.

Em resumo, na maioria dos gráficos nota-se um aumento da polarização das correntes filtradas na direção paralela à topografia (NW-SE), que foi a direção mais frequente das correntes em toda a plataforma. Vale ressaltar que no fundeio CF100 verificou-se correntes fluindo para E, mais intensas nos períodos de inverno, provavelmente devido à influência das frentes frias.

Os movimentos na superfície tenderam a acompanhar a direção média dos ventos para SW, com exceção do fundeio CF50, em I01 e CF200 em I03. No caso do fundeio CF200 as correntes na direção NE-SW, apesar de menos frequentes, foram as mais intensas. Já para CF50 as correntes superficias seguiram a direção NW-SE dominante na região.

No inverno de 2001, o comportamento das correntes sugere eventos de ressurgência. Verificamos correntes próximas ao fundo deslocando-se em direção à costa em CF50 e CF100 e correntes superficiais com sentido inverso em CF100. Outro indício de ressurgência, conforme já observado nos diagramas de dispersão, ocorre nas proximidades do fundo em CF50, no verão de 2003, onde nota-se um aumento de correntes cruzando as isóbatas em direção à costa em relação ao inverno do mesmo ano.

Não ocorreram variações sazonais nos sentidos predominantes das correntes em CF100, cuja tendência marcante foi o deslocamento paralelo à topografia.

Diagramas Vetoriais Progressivos

Os Diagramas Vetoriais Progressivos das correntes filtradas, para cada período, são apresentados nas Figuras de 3.31 a 3.39. As correntes apresentaram as seguintes características para cada fundeio:

CF50: ocorreu grande variabilidade nos deslocamentos observados próximo ao fundo.

- **CF100:** os deslocamentos aproximaram-se da direção paralela à batimetria local, principalmente no verão, com direção predominante variando do quadrante E-S no verão para o quadrante E-N no inverno.
- **CF200:** nas camadas superficiais ocorreu grande variabilidade nos deslocamentos observados entre os períodos. Mais ao fundo houve pouca variação sazonal e o

deslocamento predominante ocorreu quase paralelo às isóbatas, em direção ao quadrante E-S.

- <u>Inverno de 2001</u>:



Figura 3.31: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF50 (I01). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.32: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF100 (I01). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.33: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF200 (I01). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.
- <u>Verão de 2003</u>:



Figura 3.34: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF50 (V03). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.35: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF100 (V03). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.36: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF200 (V03). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.





Figura 3.37: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF50 (I03). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.38: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF100 (I03). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.



Figura 3.39: Diagrama vetorial progressivo de correntes filtradas, do fundeio CF200 (I03). A linha pontilhada em vermelho representa a direção aproximada da isóbata local.

De forma geral, observou-se uma maior ocorrência de deslocamentos para o quadrante E-S, aproximando-se da direção paralela às isóbatas. Constatamos um fluxo reverso entre as camadas superficiais dos fundeios CF100 e CF200, no inverno de 2003, reforçando a idéia da presença de um vórtice ou meandro ciclônico na região, conforme já havíamos visto nos gráficos das médias.

Aqui novamente aparecem indícios de ressurgência no inverno de 2001, com deslocamentos reversos entre a camada intermediária e o fundo em CF50 e entre a superfície e as demais camadas em CF100. No verão de 2003, em CF50, o comportamento das correntes no fundo igualmente traz essa evidência.

Correlações em cada fundeio

As correlações entre as componentes de velocidade num mesmo fundeio são apresentadas nas Figuras de 3.40 a 3.45.



- <u>Inverno de 2001</u>:

Figura 3.40: Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (I01), em cada fundeio, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.41: Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I01), em cada fundeio, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



- <u>Verão de 2003</u>:

Figura 3.42: Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (V03), em cada fundeio, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.43: Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (V03), em cada fundeio, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



- <u>Inverno de 2003</u>:

Figura 3.44: Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (I03), em cada fundeio, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.45: Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I03), em cada fundeio, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.

Da análise das correlações num mesmo fundeio verificamos que as correntes paralelas são mais correlacionadas entre si do que as correntes normais. Para estas últimas, correlações significativas ocorreram, na maior parte das vezes, apenas entre os correntógrafos mais ao fundo.

De uma forma geral, constatamos uma liderança das correntes do fundo para a superfície. Para as componentes paralelas tivemos que: em CF50 todas as profundidades estavam em fase; em CF100 a defasagem entre as correntes de fundo e superfície variou aproximadamente entre 5h e 10h; e em CF200 a liderança do fundo ficou entre 6h e 13h.

Correlações entre os fundeios

As correlações das componentes da corrente entre os fundeios são apresentadas nas Figuras 3.46 a 3.51.

- Inverno de 2001:



Figura 3.46: Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (I01), entre os fundeios, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.47: Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I01), entre os fundeios, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.

- Verão de 2003:



Figura 3.48: Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (V03), entre os fundeios, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.49: Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (V03), entre os fundeios, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.

- Inverno de 2003:



Figura 3.50: Correlações entre as componentes de velocidade normais à batimetria (I03), entre os fundeios, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.51: Correlações entre as componentes de velocidade paralelas à batimetria (I03), entre os fundeios, com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.

A correlação entre as componentes paralelas dos fundeios é maior do que entre as componentes normais, com uma tendência de liderança das correntes dos fundeios mais rasos para os mais profundos.

A correlação entre as componentes normais foi pequena ou inexistente. As maiores correlações apareceram entre os correntógrafos mais ao fundo dos fundeios CF100 e CF200, no verão e inverno de 2003. Também foi possível verificar, no inverno de 2001, uma liderança das componentes normais das correntes, em profundidades intermediárias de CF100 e CF200, sobre as correntes de fundo de CF50. Essa liderança inverteu-se da costa para o largo no verão de 2003. Dessa forma, temos indícios de ressurgência no inverno de 2001, conforme já apontado anteriormente e subsidência no verão de 2003.

3.1.2 Domínio da frequência

Autoespectros

Os espectros de potência das componentes das correntes filtradas, medidas em cada fundeio, nos períodos de verão e inverno de 2003 são apresentados nas Figuras 3.52 a 3.57.



- Verão de 2003:

Figura 3.52: Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF50 (V03).







Figura 3.54: Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF200 (V03).

- Inverno de 2003:



Figura 3.55: Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF50 (I03).



Figura 3.56: Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF100 (I03).



Figura 3.57: Espectro de energia das correntes medidas no fundeio CF200 (I03).

As informações contidas nos espectros foram resumidas na Tabela 3.8, onde as oscilações mais energéticas presentes em cada série foram divididas em três faixas de período:

Tabela 3.8: Faixas de período com oscilações energéticas das componentes de velocidade filtradas, no inverno e verão de 2003. Abreviaturas: **Prof.** - profundidade; **Comp.** - componente; **CL** - comp. longitudinal; **CT** - comp. transversal.

| Período | Fundeio | Prof. (m) | Comp. | Periodos Curtos (2 - 4 dias) | Períodos Médios (4,5 – 7,5 dias) | Períodos Longos (8 - 11 dias) |
|---------|---------|--------------|-------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| | CF50 | 45 | CL | 2-2,5 | 1.50 | 9-11 |
| | | 22 | CL | | 4,5 - 5 | 10 – 11 |
| | CE100 | 75 | CL | - | <mark>4,5 – 5</mark> | <u>8 – 11</u> |
| | CF 100 | 85 | CL | - | 4,5 - 5 | 8 – 11 |
| 2 | | 95 | CL | 14 | 4,5 – 5 | 8-11 |
| | 2 | 22 | CL | - | 5-6 | |
| | CF200 | 85 | CL | 2-2,5 | - | - |
| V03 | | 155 | CL | 170 | 6,5 - | 11 |
| V03 | CF50 | 45 | СТ | - | - | 10 – 11 |
| | | 22 | CT | 4 - | - 5 | - |
| | CE100 | 75 | CT | - | <mark>4,5 – 5</mark> | 8 – 11 |
| | | 85 | СТ | - | <mark>4</mark> ,5 – 5 | 8 – 11 |
| | | 95 | CT | - | 4,5 – 5 | 8 – 11 |
| | CF200 | 22 | CT | - | - | - |
| | | 85 | CT | - | 4,5 – 5,5 | - |
| 8 | | 155 | CT | - | 4,5 - 5 | 1 |
| | CF50 | 45 | CL | 2-2,5 | 5 - | - 10 |
| 1 23 | | 22 | CL | <mark>2 - 2</mark> ,5 | 4,5 - 5,5 | iii - |
| | CE100 | 75 | CL | 2-3 | 4,5 - 5,5 | - |
| | CF100 | 85 | CL | 2-2,5 | 4,5 – 5,5 | 17 |
| | | 95 | CL | 2 – 2,5 | 4,5 – 5,5 | - |
| 3 | | 22 | CL | 2-2,5 | (i=) | 8 – 9 |
| | CF200 | 85 | CL | 2-2,5 | - | 8 – 9 |
| 103 | | 155 | CL | 2-3 | 5-6 | 12 |
| 105 | CF50 | 45 | СТ | 3,5 - 4 | - | - |
| 0 | | 22 | CT | 3,5 - | - 5,5 | - |
| | CE100 | 75 | CT | 2 - 2,5 | - | 8-9 |
| | CF100 | 85 | CT | <mark>2,5 – 3</mark> ,5 | - | 8-9 |
| 8 | | 95 | CT | - | - | 8-9 |
| | | 22 | CT | 2-3 | - | - |
| | CF200 | 85 | CT | 2-3 | - | - |
| | | 155 | СТ | 2 - 3/3 - 4 | 6 - | - 9 |

A análise dos resultados obtidos nos autoespectros das séries de corrente nos

mostra que, para as componentes longitudinais, os períodos médios de oscilação (4,5 a 7,5 dias) estiveram presentes em todos os fundeios, tanto no inverno quanto no verão. A exceção ocorreu em CF50, no verão. Já os períodos curtos (2 a 4 dias) foram mais frequentes no inverno e os períodos longos (8 a 11 dias) no verão.

Para as componentes transversais, os períodos curtos praticamente só ocorreram no inverno e os períodos médios foram mais frequentes no verão. Já os períodos longos tiveram a mesma frequencia de ocorrência em ambas estações.

De forma geral temos que os períodos longos de oscilação das correntes foram mais frequentes durante o verão, em toda a plataforma continental e os períodos curtos no inverno, provavelmente devido à intensificação das frentes frias.

Verificou-se ainda, que a energia das oscilações das componentes de velocidade longitudinais é sempre maior, pelo menos uma ordem de grandeza, do que a das componentes transversais.

Coerências e fases

Os espectros de coerência e de fase das componentes das correntes filtradas, em cada fundeio e entre os fundeios, para os períodos de verão e inverno de 2003 são apresentados nas Figuras 3.58 a 3.67. A análise dos gráficos é apresentada a seguir.

- <u>Verão de 2003</u>

Coerências e fases nos fundeios

CF100: para as componentes longitudinais encontramos coerências significativas entre todos os correntógrafos, em todas as faixas de períodos (curtos, médios e longos). Entre a superfície e o fundo destaca-se um pico de coerência alta (0,8), com período aproximado de 4 dias, defasagem de 7h e liderança do fundo sobre a superfície.

Para as componentes transversais, coerências altas em todas as faixas de períodos só ocorrem entre os dois correntógrafos mais ao fundo. Entre a superfície e o fundo verifica-se um pico de coerência média (0,7), com período de 7 dias, defasagem de 22h e liderança do fundo sobre a superfície. **CF200:** para as componentes longitudinais, entre a superfície e o fundo encontramos coerências altas apenas para os períodos longos, com um pico no período de 9 dias, coerência de 0,8, diferença de fase de 1 dia e 17h e liderança do fundo sobre a superfície. Entre os demais correntógrafos verificaram-se coerências elevadas em todas as faixas de períodos.

Para as componentes transversais só houve coerências significativas entre os dois correntógrafos mais ao fundo e nas faixas de períodos curtos e longos.

Coerências e fases entre os fundeios

CF50 X CF100: o espectro de coerência foi calculado para dois níveis de profundidade próximos (45m X 75m) e apresentou, para as correntes paralelas, coerência alta em todas as faixas de períodos, sendo possível destacar um pico de maior coerência (0,9), com período de 2 dias, defasagem de 5h e liderança do fundeio CF50.

Para as correntes transversais não houve coerências entre as correntes.

CF50 X CF200: entre as componentes de velocidade longitudinais, para dois níveis de profundidade próximos (45m X 85m), foi encontrada coerência em todas as faixas de períodos. A maior coerência (0,9) foi verificada no período aproximado de 5 dias, defasagem de 5,5h e liderança de CF50.

Para as correntes transversais houve apenas um pico de coerência média (0,7), com período de 2 dias, defasagem de 2,6h e liderança de CF50.

CF100 X CF200: entre as componentes longitudinais da corrente verificaram-se coerências entre todos os níveis de profundidade; contudo, os correntógrafos mais ao fundo foram os que apresentaram coerências mais elevadas em todas as faixas de períodos, com a maior coerência (0,9) tendo ocorrido no período de aproximadamente 3 dias, defasagem de 11h e liderança de CF100.

Para as correntes transversais, os correntógrafos mais ao fundo também foram os que apresentaram as maiores coerências, destacando-se um pico com período de 4 dias, defasagem de 2,8h e liderança de CF200. Não houve coerências entre os níveis superficiais.

- Inverno de 2003

Coerências e fases nos fundeios

CF100: para as componentes longitudinais encontramos coerências significativas entre todos os correntógrafos e em todas as faixas de períodos. Entre a superfície e o fundo destaca-se um pico de alta coerência (0,9), com período de 2 dias, defasagem de 4h e liderança do fundo sobre a superfície.

Entre as componentes tranversais, como no verão, só encontramos coerências para todas as faixas de frequências nos correntógrafos mais ao fundo. Entre a superfície e o fundo encontramos dois picos com alta coerência (0,8), um com período de 3 dias e defasagem de 19h e o outro com período de 5 dias e defasagem de 1 dia e 15h, ambos com liderança do fundo sobre a superfície.

CF200: para as componentes longitudinais encontramos coerências significativas entre todos os correntógrafos e em todas as faixas de períodos. A maior coerência entre a superfície e o fundo (0,8) ocorreu no período aproximado de 4 dias, defasagem de 1,4h e liderança da superfície.

Entre as componentes transversais, as coerências concentraram-se nas faixas de períodos médios e longos. Entre a superfície e o fundo a maior coerência encontrada foi para o período de 7 dias, defasagem de 3 dias e 3,4h e liderança do fundo sobre a superfície.

Coerências e fases entre os fundeios

CF50 X CF100: para as componentes de velocidade longitudinais, a coerência entre os níveis de profundidade próximos (45m X 75m) apresentou coerência em todas as faixas de períodos, sendo possível destacar um pico de maior coerência (0,9) com período de 2 dias, defasagem de 4h e liderança de CF50.

Nas componentes transversais não houve coerências significativas.

CF50 X CF200: as componentes paralelas da corrente, entre os níveis de profundidade próximos (45m X 85m) apresentou coerência em todas as faixas de períodos. Dois

picos de maior coerência podem se destacados: o primeiro, com coerência de 0,9, ocorreu no período aproximado de 9 dias, com defasagem de 15,4h. O segundo, com coerência de 0,7, ocorreu no período de 2 dias, com defasagem de 9h. Ambas oscilações foram lideradas por CF50.

Nas componentes transversais não houve coerências significativas.

CF100 X CF200: para as componentes longitudinais ocorreram coerências altas entre todos os níveis e em todas as faixas de períodos. A maior coerência (0,9) ocorreu entre os correntógrafos mais ao fundo, no período de 7 dias, defasagem de 6h e a segunda maior coerência (0,9) ocorreu entre os correntógrafos do nível intermediário, no período de 2 dias e defasagem de 7,3h. Ambas oscilações foram lideradas por CF100.

Para as componentes tranversais apenas os correntógrafos mais ao fundo apresentaram coerências em todas as faixas de períodos, com a maior coerência tendo ocorrido no período de 7 dias, defasagem de 17,5h e liderança de CF100.

- Verão de 2003:



Figura 3.58: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas no fundeio CF100 (V03).



Figura 3.59: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas no fundeio CF200 (V03).



Figura 3.60: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF50 e CF100 (V03).



Figura 3.61: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF50 e CF200 (V03).



Figura 3.62: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF100 e CF200 (V03).

- Inverno de 2003:



Figura 3.63: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas no fundeio CF100 (I03).



Figura 3.64: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas no fundeio CF200 (I03).



Figura 3.65: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF50 e CF100 (I03).



Figura 3.66: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF50 e CF200 (I03).



Figura 3.67: Espectros de coerência e de fase entre as correntes medidas nos fundeios CF100 e CF200 (I03).

Num apanhado geral das coerências e fases para as correntes subinerciais, constatamos que as coerências entre as componentes paralelas da corrente foram maiores que as das componentes normais. As maiores coerências, para ambas componentes, ocorreram nos períodos curtos e médios, de 2 a 7 dias. Para as componentes transversais só apareceram coerências entre os correntógrafos mais ao fundo dos fundeios CF100 e CF200.

Nos fundeios CF100 e CF200 a liderança das correntes ocorreu do fundo para a superfície. Verificou-se um aumento das coerências no inverno, principalmente para as componentes transversais. Entre os fundeios a liderança das correntes ocorreu da costa para o largo.

3.2 Vento

3.2.1 Domínio do tempo

Estatística básica

Nas Tabelas 3.9 a 3.14 são apresentadas estatísticas descritivas dos dados brutos e filtrados das componentes transversais e longitudinais do vento. O eixo das componentes transversais do vento aponta na direção do quadrante S-W e o das componentes longitudinais na direção do quadrante E-S.

A análise dos dados mostra que os ventos seguem o padrão médio da região, apresentado na seção 1.2.1. Os valores médios das componentes indicam que a direção predominante das transversais foi para SW e das longitudinais para NW, tanto no verão quanto no inverno.

Do verão para o inverno de 2003, verifica-se uma mudança expressiva no comportamento do vento local. No verão, a componente transversal é mais intensa e possui maior variância. No inverno esse quadro inverte-se e, além disso, a variância da componente longitudinal é maior que a da componente transversal no verão. Esse cenário ilustra a mudança da direção predominante do vento do verão para o inverno, quando o mesmo passa a soprar do quadrante E-SE, somado à intensificação das frentes frias.

A filtragem dos dados de vento resultou numa redução média da variância de

22,2% para as componentes transversais e de 37,5% para as componentes longitudinais. Essa redução relativamente baixa indica que a variabilidade do vento está concentrada na faixa subinercial.

- Inverno de 2001

Tabela 3.9: Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (I01). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 .

| Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | $\overline{\text{VT}} \pm \text{dp}$ | $\overline{\mathrm{VL}} \pm \mathrm{dp}$ | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | VL'2 |
|----------|----------|-------------------|--------------|--------------------------------------|--|------|------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|--------------|--------|
| 28/06/01 | 12/08/01 | 2180 | 3,03 | 1,97 ± 4,59 | -0,94± 3.08 | 4,36 | 2,62 | -11,63 | 10,33 | 21,96 | -7,10 | 10,29 | 17,40 | 21,0448 | 9,4920 |

Tabela 3.10: Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (I01). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 ; % - porcentagem que a variância da série filtrada representa em relação à variância da série original.

| Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | VL ± dp | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | % | VL'2 | % |
|----------|----------|-------------------|--------------|------------|------------|------|------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|--------------|-------|--------|-------|
| 28/06/01 | 12/08/01 | 2180 | 3,03 | 1,97 ± | -0,94 ± | 4,14 | 2,30 | -8,43 | 9,16 | 17,59 | -4,58 | 8,87 | 13,45 | 18,3557 | 87,22 | 6,4584 | 68,04 |

- <u>Verão de 2003</u>

Tabela 3.11: Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (V03). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 .

| Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | $\overline{\text{VT}} \pm \text{dp}$ | $\overline{\mathrm{VL}} \pm \mathrm{dp}$ | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | VL'2 |
|----------|----------|-------------------|--------------|--------------------------------------|--|------|------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|---------|--------|
| 13/01/03 | 05/05/03 | 447 | 1,57 | 2,40 ± 3 31 | -0,57 ± 1 46 | 3,30 | 1,23 | -5,95 | 11,14 | 17,10 | -6,25 | 4,32 | 10,57 | 10,9343 | 2,1381 |

Tabela 3.12: Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (V03). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 ; % - porcentagem que a variância da série filtrada representa em relação à variância da série original.

| Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | VL ± dp | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | % | VL'2 | % |
|----------|----------|-------------------|--------------|-------------|--------------|------|------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|------|--------------|-------|--------|-------|
| 13/01/03 | 05/05/03 | 447 | 1,57 | 2,40 ± 3.01 | -0,57 ± 0.86 | 3,14 | 0,85 | -5,55 | 8,67 | 14,22 | -2,70 | 1,63 | 4,34 | 9,0643 | 82,90 | 0,7356 | 34,40 |

- Inverno de 2003

Tabela 3.13: Primeiros momentos estatísticos dos dados brutos (I03). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** - diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 .

| Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | $\overline{\text{VT}} \pm \text{dp}$ | $\overline{\mathrm{VL}} \pm \mathrm{dp}$ | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | VT '2 | VL'2 |
|----------|----------|-------------------|--------------|--------------------------------------|--|------|------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|--------------|---------|
| 09/05/03 | 25/08/03 | 5206 | 2,55 | 0,71± 2.92 | -1,19± 4,52 | 2,41 | 3,72 | -8,23 | 10,78 | 19,01 | -13,12 | 12,67 | 25,79 | 8,5013 | 20,4087 |

Tabela 3.14: Primeiros momentos estatísticos dos dados filtrados (I03). Identificação das colunas: % interp. - porcentagem de dados interpolados; \overline{VT} e \overline{VL} - valores médios das séries em m/s; **dp** - desvio padrão; $\overline{|VT|}$ e $\overline{|VL|}$ - médias dos valores absolutos; **mín** e **máx** - valores mínimo e máximo; **Amp.** diferença entre mín e máx; VT'^2 e VL'^2 - variância em m^2/s^2 ; % - porcentagem que a variância da série filtrada representa em relação à variância da série original.

| Início | Fim | Nº de amostras | % interp. | VT ± dp | VL ± dp | VT | VL | VT (mín) | VT (máx) | Amp. | VL (mín) | VL (máx) | Amp. | V T '2 | % | VL'2 | % |
|----------|----------|-------------------|--------------|--------------|---------------|------|------|-------------|-------------|-------|----------|-------------|-------|---------------|-------|---------|-------|
| 09/05/03 | 25/08/03 | 5206 | 2,55 | 0,71± 232 | -1,19± 417 | 1,90 | 3,37 | -5,88 | 6,46 | 12,34 | -12,14 | 11,91 | 24,05 | 5,3689 | 63,15 | 17,3528 | 85,03 |

Frentes frias

A partir dos dados obtidos no Boletim Climanálise (seção 3.1 - sistemas frontais e frontogênese) do *site* do CPTEC, montou-se a Tabela 3.15, apresentando as frentes frias que, nos períodos em estudo, chegaram ao Rio de Janeiro e Cabo Frio:

Tabela 3.15:Relação das frentes frias que chegaram ao Rio de Janeiro e Cabo Frio nos períodos emestudo (Fonte: Climanálise).

| Devíade | Land | Da | ata | Nº da frente | Destade | Land | Da | ata | Nº da frente | Destade | Land | Da | ata | Nº da frente |
|---------|-------|-------|-------|--------------|---------|-------|---------|-------|--------------|---------|-------|-----|-------|--------------|
| Periodo | Local | mês | dia | nomês | Periodo | Local | mês | dia | nomês | Periodo | Local | mês | dia | nomês |
| | | | 19 | 1 | | | | 1-5 | 1 | | | | 2-3 | 1 |
| | RJ | JUN | 20-21 | 2 | | | | 7 | 2 | | RJ | MAI | 6 | 2 |
| | | | 26-27 | 3 | | RJ | JAN | 11 | 3 | | | | 23-24 | 3 |
| | CE | ILINI | 21 | 1 | | | | 25-26 | 4 | | | | 2-3 | 1 |
| | | JUN | 27 | 2 | | | | 29 | 5 | | CF | MAI | 6-7 | 2 |
| | | | 6 | 1 | | CE | IAN | 7-8 | 1 | | | | 24 | 3 |
| 101 | | l | 12 | 2 | | 0F | JAN | 11-12 | 2 | | | | 5 | 1 |
| | nu | JUL | 22 | 3 | | RJ | FEV | 18 | 1 | | | | 8 | 2 |
| | | | 28 | 4 | | CF | FEV | - | 0 | | RJ | JUN | 12 | 3 |
| | CE | | 22 | 1 | 1/02 | | | 14-15 | 1 | | | | 14 | 4 |
| | | JOL | 28 | 2 | 003 | RJ | MAR | 17 | 2 | | | | 21-22 | 5 |
| | RJ | AGO | - | 0 | | | | 22 | 3 | | | | 12 | 1 |
| | CF | AGO | - | 0 | | CE | MAR | 17-18 | 1 | | CF | JUN | 14-15 | 2 |
| | | | | | | 0F | IVI/ALL | 22-23 | 2 | | | | 22 | 3 |
| | | | | | | | | 2 | 1 | 103 | | | 10 | 1 |
| | | | | | | RJ | ABR | 5-6 | 2 | | RJ | JUL | 27 | 2 |
| | | | | | | | | 10-11 | 3 | | | | 30-31 | 3 |
| | | | | | | | | 2-3 | 1 | | CE | | 10-11 | 1 |
| | | | | | | CF | ABR | 5-6 | 2 | | 0 | JUL | 30-31 | 2 |
| | | | | | | | | 11 | 3 | | | | 7-8 | 1 |
| | | | | | | | | | | | | | 9 | 2 |
| | | | | | | | | | | | RJ | AGO | 15-16 | 3 |
| | | | | | | | | | | | | | 24-25 | 4 |
| | | | | | | | | | | | | | 28 | 5 |
| | | | | | | | | | | | | | 7-8 | 1 |
| | | | | | | | | | | | | | 9-10 | 2 |
| | | | | | | | | | | | CF | AGO | 16 | 3 |
| | | | | | | | | | | | | | 25 | 4 |
| | | | | | | | | | | | | | 28-29 | 5 |

Verifica-se na Tabela 3.15 que, no inverno de 2003, houve um aumento das frentes frias que chegaram ao litoral do Rio de Janeiro em relação ao verão do mesmo ano, com a média mensal aumentando de 3 para 4.

Correlações: tensão de cisalhamento do vento X corrente

As correlações entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes em cada fundeio são apresentadas nas Figuras 3.68 a 3.76.

- Inverno de 2001:



Figura 3.68: Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.69: Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (I01), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.70: Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada fundeio (I01), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



- <u>Verão de 2003</u>:

Figura 3.71: Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.72: Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (V03), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.73: Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada fundeio (V03), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.

- Inverno de 2003:



Figura 3.74: Correlações entre as componentes normais à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (I03), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.75: Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e da corrente, em cada fundeio (I03), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.



Figura 3.76: Correlações entre as componentes paralelas à batimetria da tensão de cisalhamento do vento e as componentes da corrente normais à batimetria, em cada fundeio (I03), com os respectivos níveis de significância a 95 %. A legenda de cada gráfico mostra a profundidade dos correntógrafos correlacionados.

Nas correlações entre as componentes normais e paralelas do vento e das correntes, notamos um aumento para as componentes paralelas, em especial no inverno de 2003. Quando houve correlação, a liderança em geral foi do vento.

A correlação entre as componentes paralelas do vento e as componentes transversais da corrente apresentou um sinal inverso entre a superfície e o fundo, nos fundeios CF100 e CF200, no inverno de 2003. Esse sinal pode estar ligado a eventos de ressurgência ou subsidência.

3.2.2 Domínio da frequência

Autoespectros

Os espectros de energia da tensão de cisalhamento do vento medida em 2003 são apresentados nas Figuras 3.77 e 3.78.


Figura 3.77: Espectros de energia da tensão de cisalhamento do vento (V03).



Figura 3.78: Espectros de energia da tensão de cisalhamento do vento (I03).

No verão de 2003 a energia das componentes transversais do vento (direção NE-SW) foi maior do que a das componentes longitudinais (direção NW-SE), pelo menos uma ordem de grandeza. No inverno do mesmo ano esse quadro inverte-se e as componentes longitudinais passam a ser mais energéticas, como já havíamos visto na estatística básica. Os períodos curtos de oscilação (2 a 4 dias) são os mais frequentes, ou seja, ocorrem tanto no verão como no inverno para ambas componentes.

Coerências e fases: tensão de cisalhamento do vento X corrente

As coerências e fases entre as componentes transversais e longitudinais da tensão de cisalhamento do vento e das correntes em cada fundeio, no verão e inverno de 2003 são apresentadas nas Figuras 3.79 a 3.84.

A seguir apresentamos a análise dos gráficos:

- <u>Verão de 2003</u>

Vento X CF50: entre as componentes longitudinais do vento e da corrente no fundo verifica-se um pico de coerência média (0,7), com período aproximado de 13 dias e liderança do vento sobre a corrente de 1 dia e 19h.

Para as componentes transversais destaca-se um pico de coerência elevada (0,8), período de 9 dias, com o vento liderando a corrente em 7,5h.

Vento X CF100: entre as componentes longitudinais verificamos picos de coerência alta em todas as faixas de períodos, sempre com a liderança do vento. A maior coerência (0,9) ocorreu com o correntógrafo mais ao fundo, no período de 5 dias e liderança do vento em 7,7h.

Entre as componentes tranversais também encontramos coerência entre o vento e os correntógrafos, praticamente nos mesmos períodos das outras componentes, mas a liderança é mais frequente da corrente sobre o vento. A maior coerência (0,8) ocorreu com o correntógrafo mais raso, no período aproximado de 2 dias e liderança da corrente em 12,6h.

Vento X CF200: entre as componentes longitudinais temos picos com coerência ele-

vada em todas as faixas de períodos. As maiores coerências ocorrem com os correntógrafos mais ao fundo, na faixa de 4,5-5 dias. A maior coerência (0,9) foi com o correntógrafo mais profundo, com período de 5 dias e o vento liderando em 18,5h.

Para as componentes transversais só há coerências com os correntógrafos mais ao fundo, nos períodos médios e longos e maiores coerências nos períodos de 3 a 5 dias, com liderança da corrente.

- Inverno de 2003

- Vento X CF50: entre as componentes longitudinais ocorre um pico de coerência significativa (0,8), com período de 7 dias e o vento liderando a corrente em 1h.
 Para as componentes transversais destaca-se um pico de coerência média (0,7), período de 6 dias e o vento liderando a corrente em 1 dia e 19h.
- Vento X CF100: entre as componentes longitudinais encontramos coerências nos períodos curtos e médios. A maior coerência (0,8) ocorre com o correntógrafo superficial, no período aproximado de 4 dias e a corrente liderando em 1 dia e 17h. Não há coerência entre as componentes transversais.
- **Vento X CF200:** para as componentes longitudinais existe coerência nos períodos médios e longos, com o vento liderando a corrente.

Entre as componentes transversais só houve coerência significativa com o correntógrafo superficial, no período aproximado de 3 dias e liderança da corrente em 8h.

- <u>Verão de 2003</u>



Figura 3.79: Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes no fundeio CF50 (V03).



Figura 3.80: Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes no fundeio CF100 (V03).



Figura 3.81: Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes no fundeio CF200 (V03).

- Inverno de 2003



Figura 3.82: Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes no fundeio CF50 (I03).



Figura 3.83: Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes no fundeio CF100 (I03).



Figura 3.84: Espectros de coerência e fase entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes no fundeio CF200 (I03).

Em resumo, temos que as coerências entre as componentes paralelas do vento e da corrente foram mais frequentes e maiores do que entre as componentes transversais. Para as coerências mais elevadas o vento, em geral, liderou a corrente entre as componentes longitudinais e a liderança da corrente sobre o vento foi mais frequente entre as componentes transversais.

Houve bastante redução das coerências no período de inverno, principalmente para as componentes transversais, o que já era esperado, visto que o vento passa a soprar preferencialmente de E-SE, aproximadamente paralelo à topografia.

Capítulo 4

Discussão

Esse trabalho baseou-se na análise de séries temporais de correntógrafos, em especial nos períodos de verão e inverno de 2003, para a caracterização das correntes subinerciais ao largo de Cabo Frio, na porção norte da PCSE brasileira, bem como a análise e correlação dos padrões de vento local com os registros de correntes na região. Infelizmente, por problemas ocorridos nos correntógrafos mais rasos dos fundeios na PCI, as correntes superficiais próximas à costa tiveram sua descrição prejudicada.

Como não dispúnhamos de dados hidrográficos termohalinos para todo o período em estudo, para efeito de análise, dividimos a plataforma em PCI, PCM e PCE, baseado na posição geográfica dos fundeios, seguindo o modelo sugerido por *Castro* [1996].

4.1 Correntes mais frequentes

Para facilitar a visualização dos resultados apresentamos esquematicamente, nas Figuras 4.1 e 4.2, as correntes subinerciais mais frequentes. Essas direções basearamse nos resultados apresentados na Seção 3.1.1, a partir das rosas de distribuição de correntes.



Figura 4.1: Correntes subinerciais mais frequentes no inverno. Identificação das abreviaturas: **S** - superfície, **I** - profundidade intermediária (I) e **F** - fundo.



Figura 4.2: Correntes subinerciais mais frequentes no verão. Identificação das abreviaturas: **S** - superfície, **I** - profundidade intermediária (I) e **F** - fundo.

Durante o inverno, o sentido predominante das correntes na PCI e na PCM é para o quadrante E-S (Figura 4.1). Fato semelhante foi também observado na PCI da parte central da PCSE por diversos autores, tais como *Castro* [1990b], *Valente* [1999], *Castro* [1996] e *Dottori & Castro* [2009]. Esse resultado foi também modelado numericamente por *Coelho* [2008]. A explicação é que pulsos sucessivos, frequentes e intensos, de ventos provenientes do quadrante sul somam-se aos efeitos baroclínicos, devidos às descargas estuarinas, como forçantes para a circulação que aponta para N-E na parte central da PCSE. Devido à mudança de orientação da linha de costa, nas proximidades de Cabo Frio, essas correntes, essencialmente geostróficas, acompanham as isóbatas, fluindo para E-S.

Na parte central da PCSE, entretanto, as correntes mais frequentes deixam a costa à sua esquerda apenas na PCI. A extensão dessas correntes para a PCM, observada ao largo de Cabo Frio (isóbata de 100 m, Figura 4.1), é surpreendente. Uma possível explicação é a pequena largura da plataforma continental, pois a distância entre as isóbatas de 50 m e de 100 m é de cerca de 24 km. Ao largo de Ubatuba, por exemplo, a distância entre as isóbatas de 50 m e 100 m é de 70 km. Em outras palavras, a circulação sobre a isóbata de 100 m ao largo de Cabo Frio é muito mais afetada pelas correntes da PCI do que ao largo de Ubatuba.

Ainda durante o inverno, as correntes mais frequentes na PCE (isóbata de 200 m, Figura 4.1), seguem o que é esperado para o fluxo da CB nas camadas superficial e intermediária: paralelo às isóbatas deixando a costa à sua direita. Nas proximidades do fundo, entretanto, o movimento mais frequente tem sentido inverso, acompanhando os fluxos próximos ao fundo observados na PCI e na PCM.

Durante o verão, o sentido predominante das correntes na PCM e na PCE mostra divergência da costa (Figura 4.2). Na PCI, as observações próximas ao fundo mostram convergência à costa. A predominância dos ventos E-NE nessa época do ano aponta para a possibilidade de ocorrência de ressurgência costeira, o que poderia explicar a predominância de correntes convergentes à costa na camada de fundo da PCI.

De qualquer forma, os vetores apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as correntes mais frequentes em cada nível e em cada posição. Isso não quer dizer, entretanto, que as correntes indicadas ocorram simultaneamente em cada época do ano.

Apresentamos na Tabela 4.1 o resumo das correntes subinerciais mais frequentes, incluindo, para o período do verão, os resultados obtidos por *Coelho* [2008].

Tabela 4.1: Resumo das direções mais frequentes das correntes na PC no inverno (esquerda) e verão (direita). Identificação das abreviaturas: **P** - profundidades; **S** - superfície; **I** - intermediária; **F** - fundo; **S1** - sentido mais frequente; **I1** - intensidade em m/s; **S2** - 2° sentido mais frequente; **I2** - intensidade em m/s; **S3** - sentido da corrente média modelada por *Coelho* [2008]; **I3** - intensidade em m/s

| PCI | | | | | | PCI | | | | | | |
|-----|------------|------------|------------|------|---|-----|------------|------|------------|------|------------|------|
| Р | S 1 | I1 | S2 | I2 | I | P | S 1 | I1 | S 2 | I2 | S 3 | I3 |
| S | SE | 0,35 | NW | 0,30 | S | S | - | - | - | - | Е | - |
| Ι | SE | 0,35 | W | 0,10 | I | I | - | - | - | - | Е | - |
| F | SE | 0,20 | NW | 0,15 | F | F | NW | 0,13 | SE | 0,18 | Е | - |
| | | | | | | | | | | | | |
| РСМ | | | | | | РСМ | | | | | | |
| Р | S 1 | I1 | S 2 | I2 | I | P | S 1 | I1 | S2 | I2 | S 3 | I3 |
| S | SE | 0,40 | SW | 0,20 | S | S | SW | 0,20 | SE | 0,20 | SW | 0,20 |
| Ι | SE | 0,25 | NW | 0,25 | I | I | SE | 0,20 | NW | 0,15 | SE | 0,15 |
| F | SE | 0,25 | NW | 0,25 | F | F | SE | 0,15 | NW | 0,15 | SE | 0,15 |
| | | | | | | | | | | | | |
| РСЕ | | | | | | РСЕ | | | | | | |
| Р | S 1 | I 1 | S2 | I2 | I | P | S 1 | I1 | S2 | I2 | S 3 | I3 |
| S | NW | 0,20 | - | - | S | S | SW | 0,35 | SE | 0,20 | SW | 0,30 |
| Ι | NW | 0,20 | SE | 0,40 | Ι | I | SE | 0,25 | SW | 0,20 | SW | 0,15 |
| F | SE | 0,30 | NW | 0,15 | F | F | SE | 0,25 | NW | 0,15 | SW | 0,08 |

Analisando-se a direção das correntes subinerciais mais frequentes, verificamos uma predominância do escoamento para o quadrante E-S em ambas as estações do ano. Nas proximidades da superfície, no verão, as correntes tendem a seguir o rumo do vento típico da região nesse período. No inverno essa direção, em função da maior incidência de frentes frias, é alterada, apesar de não inverter totalmente. Esses resultados aproximam-se bastante daqueles obtidos por *Coelho* [2008] e descritos na Seção 1.2.3, principalmente na PCM.

A segunda direção mais frequente das correntes subinerciais foi para noroeste, principalmente nas profundidades intermediárias e no fundo, na PCE e PCM. Como essa direção aponta para a região costeira, esses movimentos podem estar relacionados a eventos de ressurgência costeira. Esse resultado indica que o núcleo da ressurgência pode ocorrer a W de CF, conforme apontado por *Ikeda et al.* [1974], *Ikeda* [1976], *Maglioca et al.* [1979], *Miranda* [1982] e *Rodrigues & Lorenzzetti* [2001].

Os indícios de um vótice ciclônico superficial em frente a CF, no inverno (Figura 4.1), verificado também em diversos resultados do Capítulo 3, está em conformidade com os resultados obtidos por diversos autores, que apontaram uma intensa atividade vortical na região, conforme apresentado na Seção 1.2.2. *Campos* [1995] atribuiu a ocorrência de vórtices e meandros da CB à mudança de orientação da linha de costa e ao gradiente batimétrico existente na região Sudeste. Segundo ele, ao passar por Cabo Frio, onde ocorre a mudança na orientação da linha de costa, a CB continuaria a fluir por inércia em regiões mais profundas. Seguindo os princípios da conservação de vorticidade potencial, a CB deve meandrar ciclonicamente. Essa rotação ciclônica da corrente pode ser observada em dados hidrográficos [*Signorini*, 1978], em imagens termais da superfície do oceano provenientes de satélites [*Lorenzzetti & Stech*, 1994; *Mello Filho*, 2006] e em resultados de modelos [*Cirano*, 1995; *Coelho*, 2008].

4.2 Variabilidade Subinercial

Com a filtragem das séries temporais verificou-se que a influência das correntes de maré nas componentes de corrente normais à batimetria variou entre 44,5 % e 45,6 %, estando bem próximo aos valores encontrados por *Alves* [1992] (40-50 %) e *Castro* [1996] (43 %) para a parte central da PCSE. Já as correntes subinerciais contribuíram entre 87,0 % e 90,1 % da variância das componentes de corrente paralelas à batimetria, também se aproximando dos valores encontrados por aqueles autores. Dessa forma, verificamos que a variabilidade subinercial domina o fluxo das correntes na região, principalmente na direção paralela à batimetria.

As correntes paralelas foram mais intensas e com variabilidade temporal com maior energia do que as correntes normais, resultado também observado por *Castro* [1996], *Dottori & Castro* [2009] e outros, na parte central da PCSE. Esses resultados estão também de acordo com modelos teóricos de correntes geradas pelo vento na PC,

como o de Clarke & Brink [1985], por exemplo.

As componentes de corrente paralelas apresentaram, em média, um fluxo preferencial para o quadrante E-S, tanto no inverno quanto no verão. Já as componentes de corrente normais, cujo eixo de referência reflete a direção média dos ventos para a região (Figura 2.8), em geral o fluxo dominante foi para SW no verão e para NE no inverno, acompanhando o regime dos ventos, com a intensificação das frentes frias no inverno.

A intensidade típica das correntes normais subinerciais aumentou de 0,03 m/s próximo à costa para 0,10 m/s na quebra da PC. As correntes paralelas foram mais intensas na PCM e as intensidades características ficaram entre 0,16 e 0,20 m/s. As diferenças de intensidade das correntes paralelas entre as regiões da PC é responsável por gerar variações da vorticidade relativa e, consequentemente, movimentos verticais. Essa dinâmica influencia nos processos de ressurgência e subsidência costeiras. *Castelão & Barth* [2006] verificaram a contribuição significativa do bombeamento de Ekman ao fenômeno da ressurgência, em função do rotacional da tensão de cisalhamento do vento negativo junto à costa durante todo o ano, com valores máximos no verão e mínimos no outono.

O fluxo paralelo à topografia, na direção NW-SE, dominou os movimentos em toda a plataforma, em especial na PCM e em profundidades intermediárias. Esse escoamento longitudinal na PC indica a existência de um balanço geostrófico na direção normal à costa, ou seja, o equilíbrio entre as componentes horizontais das forças de gradiente de pressão e de coriolis. O balanço geostrófico na direção normal à topografia foi também verificado por *Castro* [1996], *Stech* [1990], *Stech & Lorenzzetti* [1992], *Coelho* [2008] e *Dottori & Castro* [2009] em diversas partes da PCSE.

Nas proximidades da superfície observamos, frequentemente, correntes acompanhando a direção média do vento local (NE-SW). Na PCI, entretanto, tal fato não foi observado, provavelmente por influência da topografia costeira. O fundeio da PCI esteve situado numa região de acentuada curvatura da costa, que passa da orientação zonal (W-E) para, essencialmente, NW-SE (Figura 4.1). A isóbata de 50 m, sobre a qual foram instalados os fundeios, acompanha essa brusca mudança de orientação da linha de costa. Dessa forma, a corrente costeira, com direção predominante para N- E, citada em registros observacionais desde *Matsuura* [1975] e resultados de modelos, desde *Caldas* [1978], fica evidenciada na porção norte da PCSE, em toda largura da PC, pricipalmente no inverno. No entanto, essa corrente costeira, ao chegar próximo a Arraial do Cabo (RJ), tem sua direção modificada para SE, como pode ser observado nas Figuras 4.1 e 4.2. A intensificação da corrente costeira na PCSE, no inverno, foi descrita por *Coelho* [2008] e apresentada neste trabalho na Seção 1.2.1. Segundo o autor, que modelou as etapas da subsidência costeira em função da passagem das frentes frias, ocorreu transporte de deriva do vento em direção à costa, na camada superficial (0-10 m) e transporte de compensação ao longo da coluna d'água, havendo empilhamento de água na região costeira. Dessa forma, a força de gradiente de pressão barotrópica desenvolvida implicou na formação e intensificação do jato costeiro em direção a menores latitudes.

As correntes apresentaram as seguintes características por região da PC:

- PCI: ocorreu grande variabilidade nos deslocamentos observados próximo ao fundo, porém a característica principal foram as correntes cruzando as isóbatas, ora em direção à costa, ora rumo ao oceano, sugerindo uma dinâmica típica de ressurgência e subsidência costeiras.
- **PCM:** os deslocamentos aproximaram-se da direção paralela à topografia local, com sentido predominante para o quadrante E-S.
- **PCE:** nas camadas superficiais ocorreu grande variabilidade nos deslocamentos observados entre os períodos. Mais ao fundo houve pouca variação sazonal e o deslocamento predominante ocorreu quase paralelo às isóbatas, em direção ao quadrante E-S.

Analisaremos a seguir os principais resultados obtidos da análise espectral entre as séries temporais de correntes.

Nos fundeios, as correntes paralelas foram mais correlacionadas entre si do que as correntes normais, que apresentaram correlação, em geral, apenas entre as correntes mais ao fundo. Verificou-se uma tendência de liderança, entre 5h e 13h, das correntes de fundo. Entre os fundeios, as correntes paralelas também apresentaram maior correlação do que as correntes normais, com a liderança, em geral, ocorrendo da costa para o largo. As maiores correlações entre as componentes normais ocorreram entre os níveis mais profundos dos fundeios CF100 e CF200.

Os espectros de potência mostraram que a energia das oscilações das componentes paralelas da velocidade são muito maiores do que a das componentes normais. De forma geral, para estas últimas, os períodos longos de oscilação (8 a 11 dias) foram mais frequentes durante o verão e os períodos curtos (2 a 4 dias) no inverno.

Para as correntes paralelas, os períodos médios (4,5 a 7,5 dias) foram os mais frequentes. Os períodos curtos tiveram maior ocorrência no inverno e os longos no verão.

Para as correntes normais, os períodos curtos praticamente só ocorreram no inverno e os períodos médios no verão. Já a faixa de períodos longos aparece com frequencia em ambas estações do ano.

As maiores coerências, para ambas componentes das correntes, foram verificadas nos períodos curtos e médios, de 2 a 7 dias.

4.3 Influência do vento nas correntes observadas

Os ventos seguiram o padrão médio da região, com o sentido predominante variando de SW, no verão, a NW, no inverno.

Diferentemente do que ocorre na parte central da PCSE, onde diversos autores verificaram uma alta correlação das correntes locais com os ventos predominantes [*Kvinge*, 1967; *Castro*, 1985, 1990a; *Miranda & Castro*, 1995; *Fontes*, 1995], na porção norte da PCSE a correlação das correntes com o vento foi baixa, de forma que, conforme observado por *Castro* [1985] e *Castro & Lee* [1995], parte da variabilidade subinercial das correntes nessa região é provavelmente forçada pela propagação de OPC com períodos entre 6 e 12 dias. *Stech & Lorenzzetti* [1992] também indicaram que parte da variabilidade subinercial das correntes não é explicada apenas pelos ventos locais, tendo sido corroborados por *Castro & Lee* [1995], que verificaram que nas partes central e norte da PCSE as flutuações costeiras do nível do mar são melhor correlacionadas com os ventos localizados mais ao sul e que ocorreram mais cedo no tempo, indicando a importância das forçantes remotas para a PCSE. Além dessas observações, *Castro et al.* [2006] afirmaram que, em função da presença da costa, a resposta das águas da PC à forçante do vento não é direta e os autores verificaram que o tempo necessário para que o ajuste geostrófico ocorra é de 10 h a 20 h.

Cabe ressaltar que os correntógrafos mais superficiais ficaram a um nível de 10 m, na PCI e de 22 m nas PCM e PCE, fato que também pode ter influência na baixa correlação encontrada, dado que tais níveis são profundos o suficiente para não haver influência da dinâmica de Ekman.

Verificou-se uma maior correlação entre as componentes paralelas do vento e da corrente, que reduziu da superfície para o fundo. A liderança, em geral, foi do vento.

A variabilidade dos ventos ficou concentrada na banda subinercial, com períodos mais frequentes na faixa curta de 2 a 4 dias. As maiores coerências ocorreram entre as componentes paralelas do vento e da corrente, nos períodos médios e longos, de 4 a 13 dias.

4.4 Influência da Corrente do Brasil nas correntes observadas

Conforme apresentado na Seção 1.2.2, a CB está presente na parte mais externa da PCSE, fluindo para SW. Na região de estudo, de acordo com *Paviglione & Miranda* [1985], o núcleo principal dessa corrente está próximo à borda da PC no verão e se afasta dela no inverno. *Mello Filho* [2006] também obsevou esse comportamento, verificando que no verão e no outono há uma tendência da frente interna da CB localizar-se a oeste da isobatimétrica de 200 m, penetrando dessa forma a PC e, no inverno, numa posição intermediária das isobatimétricas de 200 e 1000 m, já fora da PC. Neste trabalho não observamos correntes fluindo para SW durante o inverno, com excessão da PCM, próximo à superfície. Já no verão, na PCE, é possível observar correntes frequentes na direção SW, na superfície e profundidades intermediárias, indicando uma provável influência da CB. Conforme já discutido anteriormente, a forte atividade vortical próximo à CF é pricipalmente provocada pela passagem da CB ao largo da região. Os vórtices ciclônicos gerados têm influência até a PCM, contribuindo para os movimentos na direção SE.

Capítulo 5

Conclusões

- A variabilidade subinercial domina o fluxo das correntes na região, principalmente na direção paralela à batimetria.
- Como no restante da PCSE, verificou-se um balanço geostrófico na direção normal à topografia, sendo responsável por um fluxo paralelo às isóbatas, em especial na PCM e nas profundidades intermediárias afastadas das camadas limite.
- Verificou-se que a corrente costeira forçada por processos baroclínicos e pelo vento, típica da parte central da PCSE, atinge o extremo norte da plataforma continental, induzindo um fluxo mais frequente com sentido SE, nas camadas intermediária e de fundo, principalmente no inverno.
- A formação de vórtices ciclônicos em frente a Cabo Frio ficou evidenciada neste trabalho, corroborando diversos estudos anteriores e apontando a Corrente do Brasil como importante forçante dos movimentos nas regiões da PCM e PCE.
- Houve baixa correlação do vento local com as correntes, exceto próximo à superfície, evidenciando a importância das forçantes remotas na dinâmica da região.
 O sentido predominante das correntes para o quadrante E-S, não acompanhando a direção média do vento, difere daquele encontrado em outros estudos para a

parte central da PCSE, onde o sentido predominante foi para SW.

 Evidências de eventos de ressurgência/subsidência apareceram ao longo de todos os períodos. Diversas características da região, como a abrupta mudança da orientação da linha de costa, de NE-SW para E-W, a topografia de fundo, os meandros e vórtices da CB e o rotacional da tensão de cisalhamento do vento, que é negativo junto à costa durante todo o ano, favorecem o fenômeno da ressurgência costeira nas proximidades de CF, com ocorrência preferencial a W desta localidade.

5.1 Considerações Finais

Os resultados apresentados neste trabalho poderão ser úteis na consolidação dos conhecimentos sobre a dinâmica da porção norte da PCSE brasileira.

Um estudo das variações subinerciais das correntes nos períodos de primavera e outono, bem como de toda a série anual das correntes na PCI, ainda é necessário a fim de se fechar o ciclo sazonal das características da circulação nessa região.

As observações oceanográficas *in situ*, apesar de demandarem uma logística robusta e cara, são fundamentais na avaliação e validação de modelos numéricos e feições oceânicas obtidas a partir de imagens de satélites. O Programa Nacional de Bóias, iniciado em 2008, com a participação de diversas instituições nacionais, dentre elas o IOUSP, com a previsão de lançamento de sete bóias meteoceanográficas ao longo da costa do Brasil e o convênio firmado entre a Marinha do Brasil e o Ministério da Ciência e Tecnologia, com a compra do Navio Hidroceanográfico Cruzeiro do Sul e a implantação do Projeto Laboratório Nacional Embarcado, são iniciativas que vêm robustecer a continuidade da pesquisa observacional oceanográfica brasileira, em meio ao *boom* ocorrido nas áreas de modelagem e observação por satélites.

Referências Bibliográficas

- Allard, P., 1955: Anomalies dans temperatures de leau de mer observees au Cabo Frio (Bresil). *Bull. Inf. Com. Cent. Oceanogr. Etude Cotes*, 7 (2), 58–63.
- Alves, M. A., 1992: Correntes de maré e inerciais na plataforma continental ao largo de Ubatuba (SP). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 162 pp.
- Bath, M., 1974: *Spectral Analysis in Geophysics*. Elsevier, Amsterdam, primeira edição, 563 pp.
- Brink, K. H., 1991: Coastal-trapped waves and wind-driven currents over the continental shelf. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23, 389–412.
- Caldas, M. J., 1978: Características da estrutura e da circulação das águas da plataforma continental entre Cabo Frio e Ilha de Santa Catarina em janeiro de 1968. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 94 pp.
- Campos, E. D. J., D. Velhote, & I. C. A. Silveira, 2000: Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. *Geophys. Res. Lett.*, 27(6), 751–754.
- Campos, E. J. D., 1995: Estudos da Circulação Oceânica no Atlântico Tropical e na Região Oeste do Atlântico Subtropical Sul. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 114 pp.
- Campos, E. J. D., S. S. Godoi, Y. Ikeda, L. V. Nonato, & J. E. Gonçalves, 1994: Summertime thermohaline structure of the Brazil Current region between Santos (SP) and Rio de Janeiro (RJ). *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 42, 1–18.

- Campos, E. J. D., J. E. Gonçalves, & Y. Ikeda, 1995: Water mass structure and geostrophic circulation in the South Brazil Bight - summer of 1991. J. Geophys. Res., 100(C9), 18.537–18.550.
- Campos, E. J. D., Y. Ikeda, B. M. Castro Filho, S. A. Gaeta, J. A. Lorenzzetti, & M. R. Stevenson, 1996: Experiment studies circulation in the western south atlantic. EOS, *Transactions, American Geophysical Union*, 77(27), 253–259.
- Cartwright, D. E., R. D. Ray, & B. V. Sanchez, 1991: Oceanic tide maps and spherical harmonic coefficients from Geosat altimetry. *NASA Tech. Memo*, 104544, 75.
- Castelão, R. M. & J. A. Barth, 2006: Upwelling around Cabo Frio, Brazil: the importance of wind stress curl. *Geophys. Res. Lett.*, 33, 1–4.
- Castelão, R. M., E. J. D. Campos, & J. L. Miller, 2004: A modelling study of coastal upwelling driven by wind and meanders of the Brazil Current. *J. Coastal Res.*, 20(3), 662–671.
- Castro, B. M., In prep.: Hidrodinâmica da Plataforma Contiental.
- Castro, B. M., 1985: Subtidal response to wind forcing in the south Brazil bight during winter. Tese de Doutorado, University of Miami, Florida, 211 pp.
- Castro, B. M., 1990a: Relatório do 5° ano. Subprojeto Oceanografia Física do Projeto Utilização Racional dos Ecossistemas Costeiros da Região Tropical Brasileira: Estado de São Paulo. *Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo*.
- Castro, B. M., 1990b: Wind driven currents in the Channel of São Sebastião: winter, 1979. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, *38*(2), 111–132.
- Castro, B. M., 1996: Correntes e Massas de Água da Plataforma Continental Norte de São Paulo. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 248 pp.
- Castro, B. M. & T. Lee, 1995: Wind Forced Sea Level Variability On The Southeast Brazilian Shelf. J. Geophys. Res., 100(8), 16.045–16.056.

- Castro, B. M., J. A. Lorenzzetti, I. C. A. Silveira, & L. B. Miranda, 2006: Estrutura termohalina e circulação na região entre o cabo de são tomé (rj) e o chuí (rs). In O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil. EDUSP, São Paulo, 11–120.
- Castro, B. M. & L. B. Miranda, 1998: Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S. *The Sea*, 11, 209–251.
- Castro, B. M., L. B. Miranda, & S. Miyao, 1987: Condições Hidrográficas na Plataforma Continental ao Largo de Ubatuba: Variações Sazonais e em Média Escala. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 35(2), 135–151.
- Castro, B. M. & J. R. G. B. Moreira, 1994: Current measurements in the Santos continental margin. *Southwest Atlantic Physical Oceanography Workshop*, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.
- Cirano, M., 1995: Utilização de Modelo Numérico no Estudo Diagnóstico da Circulação Oceânica na Bacia de Santos. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 116 pp.
- Clarke, A. J. & K. H. Brink, 1985: The response of stratified, frictional flow of shelf and slope waters to fluctuating large-scale, low-frequency wind forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 15(4), 439–453.
- Coelho, A. L., 2008: Resposta da Plataforma Continental Sudeste a ventos sazonais e sinóticos de verão: estudos numéricos. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 188 pp.
- DHN, 1957: Estudo das condições oceanográficas entre cabo frio e vitória, durante o outono (abril-maio). In Relatório dos Cruzeiros Oceanográficos do NE Almirante Saldanha. Diretoria de Hidrografia e Navegação, Rio de Janeiro, DG–06–II e DG–06–III.
- Dottori, M. & B. M. Castro, 2009: The response of the São Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. *Ocean Dynamics*, *59*(4), 603–614.

- Emery, W. J. & R. E. Thomson, 2001: *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier Scientific Publ., Amsterdam, 638 pp.
- Emilsson, I., 1962: As correntes marítimas no Canal de São Sebastião. *Cienc. Cult.*, 14(4), 269–270.
- Emílsson, I., 1961: The shelf and coastal waters off Southern Brazil. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, *17*(2), 101–112.
- Evans, D. & S. R. Signorini, 1985: Vertical structure of the Brazil Current. *Nature*, *315*, 48–50.
- Fontes, R. F. C., 1995: As correntes no Canal de São Sebastião. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 159 pp.
- Franchito, S. H., V. B. Rao, J. L. Stech, & J. A. Lorenzzetti, 1998: The effect of coastal upwelling on the sea-breeze circulation at Cabo Frio, Brazil: a numerical experiment. *Annales Geophysicae*, 16, 866–881.
- Gill, A. E. & E. Schumann, 1974: The Generation of Long Shelf Waves by the Wind. *J. Phys. Oceanogr.*, *4*, 83–90.
- Hidaka, K., 1972: Oceanography of Upwelling. *Journal of Physical, Human and Regional Geociences, Geoforum*, 11, 0–21.
- Ikeda, Y., 1976: Variações em escala média da temperatura e da salinidade do mar na região entre a Baía de Guanabara e Cabo Frio (17/08 a 26/08/1971). Bolm. Inst. Oceanogr., 25, 221–280.
- Ikeda, Y., L. B. Miranda, & N. Rock, 1974: Observations on Stages of Upwelling in the Region of Cabo Frio (Brazil), as Conducted by Continuous Surface Temperature and Salinity Measurements. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 23, 33–46.
- Johannessen, O. M., 1968: Note on some hydrographical and current observations from three positions on the Brazilian shelf in the region of Cabo Frio-Santos 1966. *Contrções. Inst. Oceanogr. Univ. S. Paulo, Sér. Ocean. Fís.*, 10, 1–8.

- Kampel, M., J. A. Lorenzzetti, & C. L. Silva JR., 1997: Observação por satélite de ressurgências na costa S-SE brasileira. VII Congresso Latino Americano de Ciências do Mar -COLACMAR, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 38–40.
- Kousky, V., 1979: Frontal Influences on Northeast Brazil. *Mon. Weather. Rev.*, 107(9), 1140–1153.
- Kvinge, T., 1967: On the special current and water level variations in the channel of São Sebastião. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, *16*(1), 23–28.
- Lorenzzetti, J. A. & J. L. Stech, 1994: Southwestern Atlantic Surface Features as Observed From AVHRR Images During Project COROAS (1992-1994). *South Western Atlantic Physical Oceanography Workshop*, IOUSP, São Paulo.
- Lorenzzetti, J. A. & K. . Tanaka, 1990: Uso de um Modelo Numérico para o Estudo da Ressurgência Costeira em Cabo Frio (RJ) à Passagem de Frentes Frias. *VI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Salvador.
- Luedemann, E. F., 1979: Contribuição ao estudo das correntes de superfície sobre a plataforma continental do estado de São Paulo, Brasil (Lat. 24° 00′ S 25° 10′ S até Long. 45° 40′ W). *Bolm. Inst. Oceanogr.*, *28*(2), 47–53.
- Maglioca, A., L. B. Miranda, & S. R. Signorini, 1979: Physical and chemical aspects of transient stages of upwelling at southwest of Cabo Frio (Lat. 23° S - Long. 042° W). *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 28(2), 37–46.
- Mascarenhas, A. S., L. B. Miranda, & N. J. Rock, 1971: A study of oceanographic conditions in the region of cabo frio. In Fertility of the sea. J. D. Costlow, Gordon and Breach, N. Y., 285–308.
- Matsuura, Y., 1975: A Study of Surface Currents in the Spawning Area of Brazilian Sardine. *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 24, 31–44.
- Matsuura, Y., 1996: A probable cause of recruitment failure of Brazilian Sardine (Sardinella aurita) population during the (1974/75) spawning season. *South African Journal of Marine Sciences*, 17, 29–35.

- Matsuura, Y., 1998: Brazilian Sardine (Sardinella brasiliensis) spawning in the southeast bight over the period 1976/93. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 46(1), 33–43.
- Mazzini, P. L. F., 2009: Correntes subinerciais na plataforma continental interna entre Peruíbe e São Sebastião: observações. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 112 pp.
- Mello Filho, W. L., 2006: Observação de feições oceanográficas de superfície na costa sudeste brasileira através de imagens termais do sensor AVHRR/NOAA. Dissertação de Mestrado, Institito Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 85 pp.
- Mesquita, A. R. & J. Harari, 1987: Harmonic Constants of Tides and Currents of the Southern Brazilian Shelf. *Aciesp*, *54*(*II*), 415–422.
- Miranda, L. & B. M. Castro, 1979: Condições do movimento geostrófico das águas adjacentes a Cabo Frio (RJ). *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 28(2), 79–83.
- Miranda, L. B., 1982: Análise de Massas de Água de Plataforma Continental e da Região Oceânica Adjacente: Cabo de S. Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP). Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 194 pp.
- Miranda, L. B., 1985: Forma da correlação T-S de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabe de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP). *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 33(2), 105–119.
- Miranda, L. B. & B. M. Castro, 1995: Variabilidade da circulação e do transporte de volume no Canal de São Sebastião (SP): outono de 1980. *Publção. Esp. Inst. Oceanogr., São Paulo, 11, 1–9.*
- Miranda, L. B., A. S. Mascarenhas, Y. Ikeda, T. A. Rago, & P. L. Cacciari, 1985: Resultados preliminares da estrutura térmica e do campo de velocidades amostradas durante o cruzeiro oceanográfico Transcobra III. *Relatório de cruzeiros, Ser.: N/Oc Prof. Besnard*, 6, 1–13.

- Oliveira, A. S., 1986: Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.
- Paviglione, A. M. & L. B. Miranda, 1985: Nota sobre a variação sazonal de circulação geostrófica na borda da plataforma continental: Cabo de São Tomé (RJ) e Baía de Guanabara (RJ). *Bolm. Inst. Oceanogr.*, 33(1), 55–68.
- Rezende, J. H. M., 2003: Intrusões da Água Central do Atlântico Sul na Plataforma Continental Sudeste durante o verão. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 120 pp.
- Rodrigues, R. F., 1973: Upwelling at Cabo Frio (Brazil). Dissertação de Mestrado, Naval Posgraduate School Monterray, California, 89 pp.
- Rodrigues, R. R. & J. A. Lorenzzetti, 2001: A numerical study of the effects of botton topography and coastline geometry on the southeast brazilian coastal upwelling. *Cont. Shelf Researsh*, 21, 371–394.
- Samuels, B. & M. Cox, 1987: Data set atlas for ocean modeling. Ocean Model, 75, 1–3.
- Sciremammano Jr., F., 1979: A suggestion for the presentation of correlations and their significance levels. *J. Phys. Oceanogr.*, *9*, 1273–1276.
- Signorini, S. R., 1978: On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. *Deep-Sea Res.*, 25(5), 481–490.
- Smith, R. L., 1968: Upwelling. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Ver., 6, 11–46.
- Souza, M. C. A., 2000: A Corrente do Brasil ao largo de Santos: medições diretas. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 169 pp.
- Souza, R. B. & I. S. Robinson, 2004: Lagrangian and satellite observations of the Brazilian coastal current. *Cont. Shelf Researsh*, 24, 241–262.
- Stech, J. L., 1990: Um estudo comparativo da dinâmica da circulação de inverno entre as plataformas continentais das costas sudeste do Brasil e dos Estados Unidos

utilizando um modelo numérico. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 227 pp.

- Stech, J. L. & J. A. Lorenzzetti, 1992: The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. *J. Geophys. Res.*, *97*(*C6*), *9507–9520*.
- Stevenson, M. R., D. Dias-Brito, J. L. Stech, & M. Kampel, 1998: How do cold water biota arrive in a tropical bay near Rio de Janeiro, Brazil ? *Cont. Shelf Researsh*, 18, 1595–1612.
- Stramma, L., Y. Ikeda, & R. G. Peterson, 1990: Geostrophic transport in the Brazil Current north of 20°S. *Deep-Sea Res.*, 37(12), 1875–1886.
- Valente, M. H. M., 1999: Circulação na plataforma interna do litoral norte do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 153 pp.
- Valentin, J. L., D. L. André, & S. A. Jacob, 1987: Hydrobiology in the Cabo Frio (Brazil) upwelling: two-dimensional structure and variability during a wind cycle. *Cont. Shelf Researsh*, 7(1), 77–88.
- Walters, R. A. & C. Heston, 1982: Removing tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filters. *J. Phys. Oceanogr.*, *12*, 112–115.
- Zembruscki, S., 1979: Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In PROJETO REMAC. Geomorfologia da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. PETROBRAS. CENPES. DINTEP (Série REMAC no. 7), Rio de Janeiro, 129–177.