

TÉCNICA DE INTERFEROMETRIA SAR E MODELAGEM HIDRODINÂMICA
PARA AVALIAÇÃO DE LOCAIS ADEQUADOS AO APROVEITAMENTO DA
ENERGIA DAS CORRENTES DE MARÉ

Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Oceânica,
COPPE, da Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Oceânica.

Orientador: Segen Farid Estefen

Rio de Janeiro
Novembro de 2011

TÉCNICA DE INTERFEROMETRIA SAR E MODELAGEM
HIDRODINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DE LOCAIS ADEQUADOS AO
APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS CORRENTES DE MARÉ

Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Segen Farid Estefen, Ph.D.

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

Prof. Audalio Rebelo Torres Junior, D.Sc.

Prof. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez, D.Sc.

Prof. Maamar El-Robrini, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2011

Ferreira, Rafael Malheiro da Silva do Amaral

Técnica de interferometria SAR e modelagem
hidrodinâmica para avaliação de locais adequados ao
aproveitamento da energia das correntes de maré/ Rafael
Malheiro da Silva do Amaral Ferreira.– Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2011.

XV, 173 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Segen Farid Estefen

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Oceânica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 155-165.

1. Energia das correntes. 2. Radar de abertura sintética.
3. Modelagem hidrodinâmica. 4. Baía de São Marcos. I.
Estefen, Segen Farid. II. Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III.
Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela certeza que Ele está sempre comigo, inclusive nos momentos de maior apreensão.

Agradeço ao professor Segen Estefen por me apresentar o desafio da pesquisa e confiar na minha determinação em apresentar os resultados.

Agradeço ao professor Roland Romeiser por compartilhar o seu profundo conhecimento sobre as técnicas SAR e InSAR para detecção de parâmetros oceânicos e pela excelente recepção e apoio na minha estada na RSMAS/ Universidade de Miami.

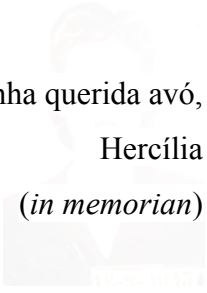
Um especial agradecimento aos professores Otto Rotunno e Audalio Torres pelas sugestões e recomendações prestadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Professor Paulo César Rosman pelas valiosas lições de engenharia costeira e pela cessão de dados pertinentes ao estudo de caso desta tese.

Também agradeço a participação na banca examinadora e envolvimento nesta pesquisa os professores Osvaldo Saavedra e Maamar El-Robrini.

Agradeço o apoio e o suporte financeiro da agência brasileira CAPES e da norte-americana Fulbright, especialmente durante o estágio de doutorado cursado nos Estados Unidos.

À minha família um agradecimento especial, e uma homenagem à minha avó Hercília Cavicchini de Azevedo, que no seu infinito conhecimento do mundo, me ensinou a ler, estimulou minha curiosidade, me aproximou dos assuntos da natureza e me tornou um homem ético. Muito obrigado.



À minha querida avó,
Hercília
(*in memoriam*)

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

TÉCNICA DE INTERFEROMETRIA SAR E MODELAGEM
HIDRODINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DE LOCAIS ADEQUADOS AO
APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS CORRENTES DE MARÉ

Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira

Novembro/2011

Orientador: Segen Farid Estefen

Programa: Engenharia Oceânica

O recente interesse na conversão da energia das correntes para geração de eletricidade, no contexto das energias renováveis, tem demandado uma avaliação mais rigorosa dos locais favoráveis a esse tipo de aproveitamento. O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para a identificação de locais adequados ao aproveitamento da energia das correntes, baseada na obtenção de dados por técnicas de modelagem hidrodinâmica e de interferometria de imagens de radar de abertura sintética (InSAR). A baía de São Marcos, localizada no estado do Maranhão, foi utilizada como estudo de caso para avaliação do potencial energético das correntes, para a qual os campos de corrente foram obtidos, primeiramente, através de modelo hidrodinâmico bi e tridimensional. Em seguida, a técnica de interferometria *along-track* SAR (ATI-SAR) para detecção das correntes oceânicas foi simulada através de um modelo numérico de imageamento SAR, combinando diferentes condições ambientais e parâmetros de radar. Os resultados indicam que a técnica ATI-SAR, por apresentar excelentes valores de correlação e regressão, é promissora para medições de correntes superficiais e avaliação dos locais favoráveis ao seu aproveitamento energético. Assim como foi demonstrada a possibilidade de elaboração de mapas de densidade energética das correntes, a partir dos campos de correntes obtidos, tornando essa metodologia de avaliação mais realista.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SAR INTERFEROMETRY TECHNIQUE AND HYDRODYNAMIC MODELING
FOR TIDAL CURRENT POWER SITE ASSESSMENT

Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira

November/2011

Advisor: Segen Farid Estefen

Department: Ocean Engineering

The recent interest in current power conversion for electricity generation, in the context of renewable energy, has demanded a more rigorous site assessment process, which supports this kind of activity. The work aims to present a methodology for identification of suitable sites for tidal current power harnessing, based on data obtained by hydrodynamic modeling and synthetic aperture radar interferometry (InSAR). The São Marcos bay, located in Maranhão state, Brazil, was chosen as a case study to evaluate the potential energy of the observed currents, for which the current fields were obtained first through two-and and three-dimensional hydrodynamic model. Then, the technique of SAR along-track interferometry (ATI-SAR) for ocean currents retrieval was simulated through a SAR imaging numerical model by combining different environmental conditions and radar parameters. The results indicate that ATI-SAR technique, due to have presented excellent values of correlation and regression, is promising to measure surface currents and to evaluate favorable sites related to energy exploitation. Also, it was demonstrated the possibility of mapping tidal currents energy density, from the current fields obtained, making this assessment methodology more realistic.

ÍNDICE

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xv
1- Introdução	1
1.1- Objetivos	4
1.2- Estrutura do trabalho	5
2- Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica	7
2.1- Potencial da Energia das Correntes	7
2.2- Metodologias para avaliação do recurso das correntes	16
2.3- Técnicas para identificação dos locais adequados ao aproveitamento das correntes	17
2.4- Técnicas de Sensoriamento Remoto para detecção de correntes e parâmetros do mar	19
2.5- Interferometria SAR	33
2.6- Técnicas de modelagem hidrodinâmica de circulação	40
3- Metodologia	43
3.1- Interferometria <i>along-track</i> SAR como ferramenta de identificação	45
3.2- Técnicas de Modelagem Hidrodinâmica	55
3.3- Avaliação do potencial energético das correntes	69
4- Estudo de caso: Baía de São Marcos	72
4.1- Características gerais	72
4.2- Dados ambientais	74
5- Modelagem hidrodinâmica da Baía de São Marcos	83
5.1- Domínio de modelagem e malha de elementos finitos	84
5.2- Condições de contorno e condições iniciais	88
5.3- Simulações	89
5.4- Calibração do modelo	91
5.5- Apresentação dos resultados	99
6- Resultados da interferometria <i>along-track</i> SAR	118

6.1-	Dados de entrada no modelo M4S	118
6.2-	Simulações para fortes correntes de vazante	121
6.3-	Simulações para fortes correntes de enchente	134
6.4-	Considerações sobre o monitoramento das correntes por SAR orbital	138
6.5-	Considerações sobre a variabilidade das correntes ao longo da profundidade	140
7-	Mapeamento do potencial energético das correntes	143
8-	Conclusões	150
8.1-	Síntese do trabalho	150
8.2-	Conclusões	152
8.3-	Recomendações	153
9-	Referências bibliográficas	155
	Anexo 1	166
	Anexo 2	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração de escoamento hidráulico em um volume de controle	9
Figura 2: Variação da velocidade da corrente de acordo com a profundidade.....	13
Figura 3: Geometria utilizada nos difusores da turbina Tocardo (KIRKE, 2005)	15
Figura 4: Método do fluxo a partir do Relatório BLACK AND VEATCH (2004)	16
Figura 5: Ferramentas para medição de parâmetros oceânicos (Fonte: BADDOUR, 2004).....	18
Figura 6: Geometria do imageamento SAR (SPRING, 1996).....	24
Figura 7: Ilustração da ressonância Bragg entre o sinal de radar e as ondas capilares ..	26
Figura 8: Formação dos padrões de onda (<i>wavelike patterns</i>) nas imagens SAR.....	28
Figura 9: Missão SRTM – ônibus Endeavour dotado de duas antenas operando nas bandas X e C.....	31
Figuras 10: (a) TerraSAR-X, banda X, duas antenas, ATI é um modo experimental...	32
Figura 11: Geometria básica da interferometria <i>along-track</i> SAR.....	34
Figura 12: Fluxograma do processo interferométrico	36
Figura 15: Fluxograma das ferramentas de modelagem hidrodinâmica e interferometria <i>along-track</i> SAR utilizadas na tese	47
Figura 16: Fluxograma das etapas do processo de modelagem numérica computacional (Fonte: Adaptado de ROSMAN, 2011).....	56
Figura 17: Transformação de coordenada sigma.....	57
Figura 18: Constantes semidiurnas e tempo mínimo para inclusão na análise harmônica	65
Figura 19: Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil (Fonte: GOOGLE, 2010)	73
Figura 20: Carta náutica nº 412 – Baía de São Marcos e proximidades do Terminal da Ponta da Madeira e Itaqui.....	75
Figura 21: Curva típica de maré para os dias 1 a 3 de setembro de 2010 obtida através do módulo de previsão de marés do SisBaHiA a partir das constantes harmônicas da FEMAR	78
Figura 22: Curva típica de maré para o mês de setembro de 2010.....	79
Figura 23: Carta de correntes de maré para os portos de São Luís e Itaqui 2 horas antes da preamar no marégrafo de São Luís (Fonte: DHN, 1962)	80
Figura 24: Velocidade média mensal para 1997 no litoral norte brasileiro.....	81

Figura 25: Área considerada como domínio na modelagem e pontos de interesse.....	84
Figura 26: Malha de elementos finitos	85
Figura 27: Batimetria considerada no modelo e malha de elementos finitos.....	86
Figura 28: Rugosidade considerada no modelo.....	87
Figura 29: Estações maregráficas utilizadas no modelo (Adaptado de GOOGLE, 2010)	88
Figura 30: Série temporal de elevações de maré previstas pelas constantes da FEMAR e modeladas para os nós equivalentes a Ponta da Madeira	92
Figura 31: Série temporal de elevações de maré previstas pelas constantes da FEMAR e modeladas para os nós equivalentes a Itaquí	92
Figura 32: Pontos de calibração retirado da carta de correntes de maré	94
Figura 33: Comparação entre as séries temporais de corrente para o nó 5863, em vermelho, sintetizado a partir da carta de correntes da Marinha e, em azul, resultados do modelo	95
Figura 34: Diagrama de dispersão do valor absoluto das velocidades das correntes: Carta de correntes de maré x Modelo	96
Figura 35: Comparação entre as séries temporais de intensidade de corrente para o nó 4547, em vermelho, sintetizado a partir da carta de correntes da Marinha e, em azul, resultados do modelo	97
Figura 36: Comparação entre a elipse de maré para o nó 4547, em azul contínuo, e as direções aproximadas constantes das cartas de correntes da Marinha em pontos azuis. 97	
Figura 37: Diagrama de dispersão do valor absoluto das velocidades das correntes: Carta de correntes de maré x Modelo	98
Figuras 38: Elipses de maré para o interior - P4 (a) e a desembocadura – P3 (b) da baía de São Marcos.....	100
Figura 39: Série temporal de elevação da maré na desembocadura P3 e interior P4 da baía de São Marcos.....	101
Figura 40: Característica de maré mista próxima à região portuária P4 e P5	101
Figura 41: Instantes selecionados para apresentação das Figuras 39-42, correspondentes a enchente (azul) e vazante (verde) para condições de sizígia e quadratura	102
Figura 42: Campo de correntes típico da maré vazante.....	103
Figura 43: Campo de correntes típico da maré enchente.....	104
Figura 44: Amplificação das velocidades de corrente na região portuária P4	105
Figura 45: Intensidade da velocidade da corrente em função da variação de maré	106

Figura 46: Velocidades ao longo da profundidade do nó localizado na desembocadura	107
Figura 47: Variação das velocidades da corrente na profundidade ao longo de três ciclos de maré	108
Figura 48: Influência da orientação do vento, (a) a favor (b) contra, na circulação ao longo da profundidade	109
Figura 49: Comparação das correntes de maré considerando situações de vento permanente e uniforme de 8 m/s e direção de 45° e sem vento	110
Figura 50: Prisma de maré junto à confluência dos rios Pindaré e Mearim P6	111
Figura 51: Prisma de maré na desembocadura na estação P3	112
Figura 52: Escoamento residual ao longo de 1 mês sem considerar descargas fluviais	113
Figura 53: Escoamento residual ao longo de 1 mês considerando as vazões de cheia dos rios Mearim e Pindaré	114
Figura 54: Comparação entre as simulações somente com maré e com a combinação dos forçantes para uma série temporal de velocidades de corrente no ponto 4	116
Figura 55: Diferenças no campo de velocidades entre a simulação da combinação das forçantes (vetores em vermelho) e aquela utilizando somente a maré (vetores em preto)	117
Figura 56: Área selecionada da baía de São Marcos para as simulações no M4S	119
Figura 57: Campo de correntes de entrada (em m/s) na direção de visada do radar após os processos de reamostragem e suavização	120
Figura 58: (a) Velocidades Doppler (em m/s) (b) Velocidades Doppler incluindo artifícios SAR (em m/s)	122
Figura 59: Interferograma com a diferença de fase ATI (em radianos)	123
Figura 60: Efeitos de promediação sobre os pixels (a) janela 3x3 em um ciclo de repetição (b) janela 3x3 em 5 ciclos (c) janela 3x3 em 10 ciclos	125
Figura 61: Efeitos resultantes da filtragem para a imagem com 60° de ângulo de incidência (a) 1 ciclo (b) 5 ciclos e (c) 10 ciclos (em m/s)	125
Figura 62: Incremento da correlação para diferentes escalas de filtragem (a) direção x (em pixels) (b) direção y (em pixels)	126
Figura 63: Fase interferométrica para 3 metros de baseline ATI e 30° de ângulo de incidência (em m/s)	128
Figura 64: Simulação para velocidade do vento de 10 m/s e direção NE (em m/s)	129
Figura 65: 30° de incidência e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos	131

Figura 66: 60° de incidência e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 por 10 ciclos.....	131
Figura 67: 60° de incidência e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos.....	131
Figura 68: 30° de incidência e vento de 6 m/s SE filtrado 3x3 por 5 ciclos	131
Figura 69: 60° de incidência e vento de 6 m/s SE filtrado 3x3 por 5 ciclos	132
Figura 70: 30° de incidência e 10 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos	132
Figura 71: 60° de incidência e vento de 6 m/s SE filtrado 3x3 por 10 ciclos	132
Figura 72: 60° de incidência e vento de 10 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos.....	132
Figura 73: Baseline ATI de 3,0 m, 30° e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos	134
Figura 74: Fortes correntes associadas à maré enchente obtida no SisBaHiA.....	135
Figura 75: Correntes derivadas para 30° de ângulo de incidência e vento de 6 m/s durante a maré enchente (em m/s).....	136
Figura 76: Estatística para 30 e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 através de 5 ciclos...	137
Figura 77: Estatística para 60 e vento 6 m/s NE filtrado 3x3 através de 5 ciclos	137
Figura 78: Imagens disponíveis no site oficial do TerraSAR-X para a área de interesse	138
Figura 79: Ciclo de maré na baía de São Marcos e instantes de imageamento TerraSAR- X sobre a área	139
Figura 80: Perfil de velocidade ao longo da profundidade conforme a lei de potência	140
Figura 81: Mapa de densidade energética para a maré enchente a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico.....	144
Figura 82: Mapa de densidade energética para a maré vazante a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico.....	145
Figura 83: Mapa de densidade energética para a estufa de maré a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico.....	146
Figura 84: Séries temporais de densidade energética para os pontos P4 e P7.....	147
Figura 85: Detalhe das séries temporais de densidade energética para três ciclos de maré	147
Figura 86: Mapa de densidade energética derivado da técnica ATI-SAR para as fortes correntes de vazante	148
Figura 87: Mapa de densidade energética derivado da técnica ATI-SAR para as fortes correntes de enchente	149
Figura 88: Padrão de escoamento na Baía de São Marcos com direções do vetor velocidade da corrente obtidas no SisBaHiA e fator de correção para velocidade absoluta.....	169

Figura 89: Estimativa da velocidade da corrente por ATI-SAR em função da direção da corrente, considerando o deslocamento do satélite TerraSAR-X.....	169
Figura 90: Modos de transmissão da antena AS e DRA do satélite TerraSAR-X	171
Figura 91: Constelações de satélites para interferometria (a) Carrossel interferométrico (b) Pêndulo interferométrico (Fonte: ROMEISER <i>et al.</i> , 2002)	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Razão entre a velocidade média de acordo com a profundidade e a velocidade superficial	14
Tabela 2: Algumas aplicações de Sensoriamento Remoto aos oceanos.....	20
Tabela 3: Bandas utilizadas no sensoriamento por radar	21
Tabela 4: Histórico de missões satelitares para observações do oceano	23
Tabela 5: Valores de rugosidade equivalente de fundo para diferentes materiais.....	66
Tabela 6: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica da Ponta da Madeira, (MA), listadas por duração de seu período.....	76
Tabela 7: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Alcântara (MA), listadas por duração de seu período	77
Tabela 8: Coeficientes para a correção da velocidade das correntes em relação à amplitude da maré no marégrafo de São Luís	81
Tabela 9: Vazões fluviais do sistema Mearim-Grajaú e Pindaré.....	82
Tabela 10: Constantes harmônicas obtidas para Ponta da Madeira e Itaqui	93
Tabela 11: Parâmetros de Radar usados	121
Tabela 12: Resumo dos resultados estatísticos para diferentes ângulos de incidência e processos de filtragem	133
Tabela 13: Lista das 9 imagens adquiridas e sua relação com a carta de correntes de maré	139
Tabela 14: Estimativa de geração elétrica (kW) por cada turbina instalada em pontos da baía de São Marcos.....	153

1. INTRODUÇÃO

O interesse no desenvolvimento tecnológico das energias renováveis, verificado especialmente nos últimos trinta anos, é decorrente da necessidade de, simultaneamente, atender ao crescimento da demanda mundial de energia e evitar maiores impactos ambientais causados pela geração de energia. As energias renováveis se apresentam como alternativas ao modelo existente, baseado em combustíveis fósseis e têm como características o fato de serem não poluentes e possuir um ciclo de reposição curto comparado às necessidades humanas. Entre estas fontes renováveis, a energia das correntes vem recebendo investimentos significativos nos últimos 20 anos em determinados países, como o Reino Unido, Canadá, Noruega, Holanda, Itália entre outros (LEWIS *et al.*, 2011).

A energia das correntes, embora conhecida e utilizada em moinhos de maré distribuídos nos litorais do Reino Unido, França e Espanha desde 1100 d.C., foi abandonada após a era da Revolução Industrial, quando houve a introdução de combustíveis fósseis mais baratos e práticos na sua utilização (FERREIRA, 2007). Em 1973, foi promovido um grande estudo de viabilidade sobre a energia das correntes nos EUA, o MacArthur Workshop (STEWART, 1974), provavelmente como consequência da Crise do Petróleo verificada naquele ano. Em seguida, entre 1976 e 1979, um programa, liderado pelo Centro de Pesquisa da General Electric (GEC), foi iniciado no Reino Unido visando à exploração da energia das correntes para a geração de eletricidade.

Dois programas com o objetivo de avaliar o potencial energético das correntes na Europa foram lançados em 1993, o relatório ETSU (ETSU, 1993) e, em 1996, o programa JOULE II (EUROPEAN COMMISSION, 1996). Ambos os relatórios selecionaram locais adequados à exploração energética das correntes e estimaram o potencial a partir da proposição de dois diferentes métodos.

Os fluxos de massa d'água, verificados em regiões fluviais, costeiras e marinhas, podem ser ocasionados por diferentes fenômenos, como a variação das marés, a diferença de densidade, a tensão do vento, as correntes residuais da propagação de ondas ou o escoamento fluvial (JOHNSON & EAGLESON, 1966). No tocante ao aproveitamento energético das correntes, estas devem apresentar velocidades superiores a 1 m/s, com o objetivo de alcançar a viabilidade econômica. Neste sentido, as correntes de maré, especialmente na região norte do Brasil, configuram-se como as mais adequadas para geração de eletricidade em virtude de apresentarem maiores intensidades no escoamento.

Existem, basicamente, duas formas de aproveitamento da energia das marés: utilizando a subida e descida do nível do mar, para extrair sua energia potencial ou empregando o fluxo e refluxo das marés para extrair a energia cinética das correntes, similarmente às turbinas eólicas. Diferentemente do modo convencional de extração da energia das marés, através da construção de barragem, o aproveitamento da energia das correntes reduz, significativamente, as restrições ambientais e econômicas provenientes do primeiro conceito. A produção de energia, através desse segundo conceito, é bem menor se comparada a uma hidrelétrica convencional, devido ao fato de não introduzir diferença de energia potencial, de modo que, somente a energia cinética é extraída. Entretanto, os custos relativos à construção, à operação e à manutenção são consideravelmente menores, comparados às barragens, associados a menores mudanças ambientais introduzidas, o que justifica a sua disseminação como fonte alternativa de energia.

Os condicionantes básicos para a seleção de locais adequados à exploração de correntes são a velocidade de pico da corrente e suas feições morfológicas. Em termos de conversão mecânica da energia das correntes por meio de turbinas, a magnitude da corrente desempenha um papel preponderante, independente do fenômeno natural responsável pela sua gênese. Uma verificação rápida aponta para as correntes de maior magnitude aquelas provocadas pela maré. Durante a propagação da onda de maré na plataforma continental e na zona costeira, ocorre sua amplificação ocasionada por efeitos de batimetria, afunilamento e ressonância.

No panorama brasileiro, o aproveitamento energético das correntes, manifestadas em suas águas costeiras e interiores, é mais desejável, em um primeiro momento, do que aquelas verificadas em mar aberto. Na maioria dos casos, especialmente na parte setentrional do país, essas correntes em águas interiores são provocadas pelas marés. Adicionalmente, existem vantagens relacionadas à proximidade do mercado, devido ao fato de grande parte da população estar concentrada na região litorânea.

Atualmente, existe uma diversidade de protótipos para a conversão da energia das correntes, que podem ser classificados em três grupos: turbina de eixo horizontal, turbina de eixo vertical e hidrofólio oscilante (BRYDEN, 1997; ROURKE *et al.*, 2010) . A tecnologia para conversão de energia das correntes vem sendo desenvolvida e/ou adaptada partindo de conhecimento e experiência em aproveitamentos hidráulicos e eólicos, além das atividades desempenhadas na indústria *offshore*. O aproveitamento da energia das correntes consiste na instalação de dispositivos submersos, na desembocadura de estuários e canais de maré, de forma semelhante à conversão de energia eólica.

As diversas concepções propostas para a conversão da energia das correntes podem ser divididas em três grandes grupos: as turbinas de eixo horizontal (fluxo axial), as turbinas de eixo vertical ou Darrieus (fluxo cruzado) e o hidrofólio oscilante. Este último tipo de conversor baseia-se na impulsão de hidrofólios, a partir da força de empuxo ocasionada pelo escoamento (CHARLIER, 2003; BRYDEN, 1997). Os cilindros hidráulicos são acionados pelo movimento oscilatório e, então, pressurizam o fluido de operação, acionando, por sua vez, a unidade geradora.

A energia gerada por esses dispositivos pode ser convertida em energia elétrica ou mecânica, sendo aproveitada como força motriz em máquinas ou, ainda, podendo ser empregada na dessalinização e tratamento da água em processos de osmose reversa.

A produção de água potável pode atender a usos domésticos, industriais e agrícolas. Para o uso doméstico, os padrões de qualidade exigido na água são os mais restritivos, no qual a energia é despendida mais na pressurização da água contra a membrana do que na vazão. A maior demanda de água em processos industriais é compensada por menores restrições de qualidade, liberando a energia para o tratamento de maiores vazões. Finalmente, no uso agrícola, os grandes volumes requeridos para a irrigação são obtidos no processo de dessalinização, utilizando membranas mais grosseiras e possibilitando grande produção de água tratada.

A energia é considerada um dos principais vetores de desenvolvimento econômico e social, uma vez que, participa em todas as fases de produção de bens e serviços e permite suportar todas as necessidades básicas do conforto da vida moderna. Segundo PEREIRA *et al.* (2008), a proporção de domicílios sem acesso a energia elétrica no Brasil em 2005 era de 97,2%. A maior parte desta população vive em comunidades isoladas e zonas rurais, o que prejudica o suprimento de eletricidade nos moldes convencionais. Estas restrições conduzem a que estas famílias despendam parcela significativa de sua renda em combustíveis fósseis ou utilizem técnicas arcaicas e ineficientes de energia (PEREIRA *et al.*, 2008).

Por outro lado, as regiões que apresentam carência de eletricidade apresentam uma relativa abundância de recursos alternativos e renováveis de energia, como a energia solar, eólica, hidráulica, das marés e da biomassa. Em termos do aproveitamento da energia das correntes, existem potencialidades de sua utilização em comunidades isoladas distribuídas pelo território brasileiro. Essas comunidades estão concentradas na região amazônica, estados do Amapá, Pará e Maranhão. A partir dos vieses sociais que a discussão energética e ambiental assume o acesso a uma energia de qualidade é uma das condições necessárias para o desenvolvimento sustentável. A diversificação da matriz energética, principalmente

realizada com fontes renováveis de energia, apresenta-se como uma solução para o suprimento à grande parcela da população carente de energia. A geração descentralizada associada ao pequeno porte das unidades geradoras, como no caso das turbinas de correntes, configura-se como uma forma adequada de suprimento em domicílios pulverizados em comunidades remotas na região amazônica e litoral nordeste do país.

Considerando o aproveitamento das correntes como um recurso energético que apresenta variabilidade de local para local, faz-se necessário o mapeamento da densidade energética das correntes sobre a região de interesse. Estes mapas podem ser produzidos através de modelos numéricos que estimam a circulação hidrodinâmica ou, de uma forma alternativa, através de mapas derivados do processamento ATI-SAR. As vantagens da utilização do sensoriamento remoto para inferir o campo das correntes na metodologia proposta estão associadas à alta resolução espacial, ao baixo custo de aquisição das imagens comparada a uma campanha de medição *in situ* e a possibilidade de obtenção de dados, mesmo em locais com acesso remoto.

A larga cobertura espacial e temporal, características dos satélites de observação da Terra, possibilita a ampla utilização dos seus dados derivados para levantamento dos recursos energéticos em extensas linhas de costa e regiões estuarinas. No processo de identificação e mapeamento de locais adequados ao aproveitamento energético dos mares, os dados provenientes de sensoriamento remoto podem ser entendidos como uma primeira abordagem, que estima o potencial energético e localiza pontos prioritários para levantamentos posteriores mais específicos. O processamento de dados de sensoriamento remoto conjuntamente a técnicas de modelagem são atividades que, devido ao seu caráter de “escritório”, podem contribuir na agilização do levantamento dos recursos energéticos do mar, dispensando, em um primeiro momento, campanhas demoradas e custosas para produção de informações necessárias a este levantamento.

1.1- OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para a identificação de locais adequados ao aproveitamento da energia das correntes, baseada na obtenção de dados por técnicas de modelagem hidrodinâmica e processamento interferométrico de imagens de radar de abertura sintética (InSAR). A região da Baía de São Marcos, localizada no Estado do Maranhão, foi utilizada como estudo de caso para a aplicação da metodologia proposta, assim estimando o potencial energético das correntes ali verificadas.

1.2- ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 introduz aspectos sobre o aproveitamento energético das correntes de maré, marinhas e fluviais, abrangendo a sua evolução histórica, possibilidades de aplicação no Brasil e no mundo e a descrição da conversão do recurso energético. Os objetivos e a estrutura da tese são o objeto dos itens subsequentes.

No Capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica das metodologias propostas para avaliação de locais adequados ao aproveitamento da energia das correntes e das técnicas utilizadas para a obtenção de dados oceanográficos, com ênfase na velocidade de correntes e batimetria. A fundamentação teórica da modelagem hidrodinâmica e da modelagem de imagens SAR para detecção do campo de correntes são também objeto do Capítulo 2.

Uma metodologia para a avaliação de locais adequados à exploração da energia das correntes é proposta no Capítulo 3. Esta se baseia na obtenção dos campos de corrente através da técnica de interferometria *along-track* SAR e da modelagem hidrodinâmica. Em seguida, os campos de correntes locais obtidos são transformados em mapas de densidade energética, indicando as áreas prioritárias para um levantamento *in situ* mais detalhado, que possam ser candidatas à implantação de dispositivos conversores de energia das correntes.

O Capítulo 4 apresenta a Baía de São Marcos como estudo de caso para aplicação desta metodologia. A escolha deste estuário se deve principalmente em virtude das fortes correntes de maré observadas, o que a torna a melhor região brasileira com vistas à exploração da corrente como fonte energética. Neste capítulo também são apresentados os principais dados ambientais da baía, incluindo batimetria, marés, ventos, vazões fluviais entre outros.

A modelagem hidrodinâmica da Baía de São Marcos foi tema do Capítulo 5. Foi empregado o modelo SisBaHiA em diferentes cenários de simulação, considerando a modelagem bidimensional em planta (2DH) e tridimensional (3D) e diferentes mecanismos de forçante na circulação da baía, tais como, marés, ventos e vazões fluviais de afluentes e a combinação destes.

No Capítulo 6, a técnica de interferometria SAR para detecção de correntes foi simulada no modelo M4S. Estas simulações tiveram como principal objetivo determinar se condições ambientais usuais de vento e de correntes e a influência dos parâmetros de radar permitem a obtenção de imagens SAR adequadas à técnica ATI-SAR. O estudo de caso também foi a Baía de São Marcos e os parâmetros de radar foram baseados naquele existente no satélite TerraSAR-X. Ao final, considerações sobre o uso da técnica ATI-SAR, incluindo

vantagens e limitações, e sua aplicabilidade na metodologia de avaliação de locais para exploração de energia das correntes é discutida.

O Capítulo 7 apresenta como avaliar o potencial energético das correntes, através da aplicação à Baía de São Marcos. São apresentados mapas de densidade da energia das correntes obtidos com os resultados da modelagem hidrodinâmica, através do SisBaHiA, e das simulações da técnica ATI-SAR, através do modelo M4S. Estes mapas são de grande valia para indicar áreas para um levantamento local mais detalhado, com vistas à instalação de dispositivos conversores de energia.

A síntese do trabalho e as principais conclusões alcançadas figuram no Capítulo 8. As recomendações para trabalhos futuros e, especialmente, as características promissoras da técnica ATI-SAR para medição de correntes oceânicas também são tema do Capítulo 8. Finalmente, no Capítulo 9, estão listadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. POTENCIAL DA ENERGIA DAS CORRENTES

A energia das correntes configura-se como uma fonte alternativa que tem como característica o fato de ser renovável e limpa, ou seja, não se esgota e não produz resíduos ou quaisquer emissões ao ambiente. Muitas fontes de energia ocorrem nos oceanos em diferentes formas: ondas, marés, correntes marinhas, gradientes térmicos e de salinidade entre outras.

Os recursos energéticos dos oceanos são comprovadamente fontes viáveis de exploração. A água do mar é, em média, 1.000 vezes mais densa do que o ar (considerando os pesos específicos da água do mar em 1.030 kg/m^3 e do ar 1 kg/m^3), o que significa que há maior concentração de energia nas correntes. A energia das correntes tem um potencial estimado em 5 TW (ISAACS & SEYMOUR, 1973; LEWIS *et al.*, 2011), o qual é da mesma ordem do consumo mundial atual. As correntes favoráveis ao aproveitamento energético podem ser marinhas, estuarinas ou fluviais (CHARLIER, 2003), enquanto sua origem pode ser classificada em originadas pela maré (*tidal currents*) ou não relacionadas com a maré (*nontidal currents*) (PONTES & FALCÃO, 2001).

As correntes de maré são formadas a partir da energia dissipada pelas marés, consequência do fluxo de massas d'água entre regiões com defasagem na maré. As correntes não originadas pela maré são resultado de um processo complexo que envolve a absorção desigual de energia do sol pelo oceano e atmosfera e redistribuição desta energia do Equador em relação aos Pólos, provocando grandes fluxos bem definidos. Ainda, diferenças de temperatura e salinidade locais podem contribuir no movimento das correntes, assim como efeitos de batimetria e estreitamento entre ilhas e canais pode aumentar a velocidade de escoamento destas correntes (PONTES & FALCÃO, 2001).

Embora o potencial mundial das correntes seja considerável somente parte deste potencial pode ser convertido, em virtude da dispersão da energia em mar aberto. Devido a este motivo, os locais mais favoráveis à exploração energética são caracterizados por grandes intensidades de corrente, que devem ser investigados a cada caso. Somado a estes fatores, o potencial energético das correntes é proporcional ao cubo da velocidade, o que implica que o benefício da geração é bastante sensível à variação da velocidade da corrente em cada ponto investigado. Esta situação mais favorável pode ser encontrada em locais próximo a linha de costa, em estuários ou canais entre ilhas e continente, onde o estreitamento da topografia local aumenta o escoamento hidráulico, concentrando a energia.

Os métodos propostos para a avaliação do potencial energético das correntes consideram sítios favoráveis à investigação com velocidades superiores a 1,5 m/s, quando possui caráter senoidal relacionado às marés, ou superiores a 1,0 m/s, quando não possuem caráter oscilatório (PONTES & FALCÃO, 2001; FRÖBERG, 2006; BERR, 2008).

Alguns estudos foram conduzidos em países europeus acerca da avaliação de locais favoráveis ao aproveitamento das correntes. O relatório ETSU produzido no Reino Unido em 1993, estimou o potencial europeu em 58 TWh/ano, e foi sucedido pelo relatório JOULE II em 1996 na União Européia, que corrigiu o potencial para 48 TWh/ano (ETSU, 1993; EUROPEAN COMMISSION, 1996). Foram identificadas 106 localidades promissoras para desenvolvimento da tecnologia de exploração das correntes. Outros locais também foram identificados na China, Filipinas, Japão, Austrália, norte da África e América do Sul (PONTES & FALCÃO, 2001; FRÖBERG, 2006). PONTES & FALCÃO (2001) comentam sobre as incertezas na caracterização de locais favoráveis e sugerem o desenvolvimento de métodos de avaliação baseados em modelos numéricos de circulação 3D associados a dados coletados de longo termo.

A diferença principal da energia das correntes em relação aos aproveitamentos hidráulicos consagrados como as usinas hidrelétricas e maremotrizes está na exploração de apenas a energia cinética contida no escoamento, sem introduzir artificialmente diferenças de energia potencial através de barragens. Este esquema considerado como convencional possui impactos ambientais significativos (GORLOV, 2001), principalmente quando o barramento é realizado no trecho estuarino de um rio, onde a variação de maré mantém a permanência de nutrientes e possibilita a criação de um complexo ecossistema, incluindo a reprodução de espécies da fauna e flora de ambos os ambientes fluviais e costeiros. Desta forma, a exploração de fluxos hidráulicos livres, através da deposição de conversores ou turbinas no leito, vem sendo adotado como uma forma alternativa de geração de energia.

A energia potencial pode ser definida como a energia contida num corpo de massa m que esteja a uma altura h do campo gravitacional de aceleração g , conforme a equação:

$$E_p = mgh \quad (1)$$

A energia cinética, por sua vez, pode ser definida como a energia despendida no movimento de um corpo de massa m com uma velocidade v , de acordo com a equação:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

Uma comparação entre o recurso da energia potencial e cinética das marés pode ser encontrada em BROOKS (2006). A potência disponível da energia cinética de um fluxo d'água com massa ρQ que passa em uma área A é dado pela Equação 3. Enquanto a potência disponível pela energia potencial para o mesmo fluxo d'água é dado pela Equação 4.

$$P_{EC} = \frac{\rho Q v^2}{2} = \frac{\rho A |v|^3}{2} \quad (3)$$

$$P_{EP} = \rho g Q h = \rho g A v h \quad (4)$$

Para efeito de comparação, considerando o peso específico da água ρ de 1000 kg/m³, a potência disponível por unidade de área em uma corrente de 1 m/s será de 500 W/m². Por outro lado a potência disponível em uma queda de 5 metros e a velocidade do fluxo de 1 m/s será de 5×10^4 W/m², resultando em duas ordens de grandeza a mais que no caso da energia cinética.

Para a dedução do potencial energético presente no escoamento em um canal, considerou-se o volume de controle descrito na Figura 1.

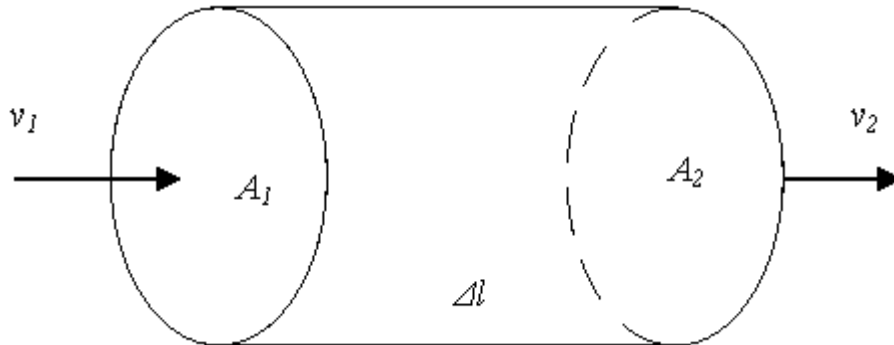


Figura 1: Ilustração de escoamento hidráulico em um volume de controle

onde Δl é o deslocamento da partícula fluida ao longo do canal, A_1 e A_2 são as áreas transversais e h_1 e h_2 são a altura do nível da água nos pontos 1 e 2, respectivamente.

A lei da conservação da energia aplicada nas duas seções resulta em:

$$mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} + p_1V_1 = mgh_2 + \frac{mv_2^2}{2} + p_2V_2 \quad (5)$$

Substituindo a massa m por ρV , que é o peso específico do fluido multiplicado pelo volume e, sucessivamente, o volume V pela área da seção transversal multiplicado pelo deslocamento $A\Delta l$, tem-se:

$$\rho g A_1 \Delta h_1 + \frac{1}{2} \rho A_1 \Delta v_1^2 + p_1 A_1 \Delta l = \rho g A_2 \Delta h_2 + \frac{1}{2} \rho A_2 \Delta v_2^2 + p_2 A_2 \Delta l \quad (6)$$

Como Δl pode ser reescrito como o produto da velocidade pelo tempo $v \Delta t$, tem-se:

$$\rho g A_1 v_1 \Delta t h_1 + \frac{1}{2} \rho A_1 v_1 \Delta t v_1^2 + p_1 A_1 v_1 \Delta t = \rho g A_2 v_2 \Delta t h_2 + \frac{1}{2} \rho A_2 v_2 \Delta t v_2^2 + p_2 A_2 v_2 \Delta t \quad (7)$$

Considerando que o fluido é incompressível, isto é, $v_1 A_1 = v_2 A_2$, pode-se dividir todos os termos pelo produto $v A$. Os termos serão também divididos pelo peso específico ρ e pelo intervalo de tempo Δt .

$$g h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = g h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + \frac{p_2}{\rho} \text{ ou reagrupando,} \quad (8a)$$

$$g(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho} = 0 \quad (8b)$$

Em um escoamento ambiental, onde o fluido está submetido à pressão atmosférica, isto é, $p_1 = p_2 = p_{atm}$, e pelo princípio dos vasos comunicantes, a diferença entre os níveis h_2 e h_1 é desprezível, restará apenas o 2º termo da equação, relativo à energia cinética.

Retornando as Equações 2 e 3, pode-se enunciar as fórmulas de energia e potência das correntes hidráulicas em um canal (Equações 9a e 9b).

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} \rho A \Delta t (v_2 - v_1)^3 \quad (9a)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A (v_2 - v_1)^3 \quad (9b)$$

Devido à condição do fator de velocidade estar elevado ao cubo significa que a variação deste é bastante sensível na determinação da potência. Para alcançar a viabilidade técnico-econômica da instalação destas turbinas, é desejável a identificação de locais onde a velocidade da corrente seja adequada.

Na conversão da energia hidráulica das correntes em energia mecânica das turbinas, apenas parte da potência teórica descrita na Equação 9b pode ser extraída, devido às perdas inerentes ao processo. O limite máximo de extração da energia cinética de um fluido é conhecido como Lei de Betz, a qual é amplamente difundida na literatura sobre aproveitamentos eólicos. Desta forma, a equação da potência resulta em:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (10)$$

onde,

C_p é o coeficiente de potência, que representa a fração que é efetivamente extraída da potência hidráulica teórica que passa na área transversal da turbina.

ρ é a massa específica do fluido (água do mar $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$)

A é a área transversal da turbina

v é a velocidade da corrente

Entretanto, a velocidade em um escoamento ambiental varia tanto no espaço quanto no tempo, de forma que esta variabilidade deve ser levada em conta na estimativa do potencial energético. Outro fato é relativo à própria limitação física da conversão da energia hidráulica em energia mecânica de um dispositivo conversor de correntes. Na literatura específica sobre energia eólica, o limite máximo de extração da energia cinética de um fluido é conhecido como Lei de Betz.

A massa fluida m de um escoamento permanente no volume de controle V , com velocidade constante v_1 na entrada e v_2 na saída, pode ser calculada conforme a Equação 11.

$$m = \rho A \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (11)$$

Substituindo (11) em (10) resulta na Equação 12.

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_2 - v_1)^3 \quad (12)$$

Lembrando que a potência referente ao fluxo não perturbado P_o através da mesma área A , sem interceptação do rotor de uma turbina, é calculada através da Equação 13.

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (13)$$

Finalmente, a razão entre as Equações 7 e 8 correspondente à fração da energia extraída em relação à energia total de um fluxo não perturbado será dado pela Equação 14.

$$(P / P_o) = \frac{1}{2} (1 - (v_2 - v_1)^2) (1 + (v_2 / v_1)) \quad (14)$$

Este limite foi enunciado por Betz como sendo $\frac{16}{27}$ ou 59,3% para um disco atuador simples, isto é, corresponde à área total por onde passa o fluxo hidráulico (DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, 2009). Portanto, o sistema conversor de energia das correntes deve ser projetado de forma que possa aumentar a velocidade do fluxo da água e, assim, otimizar a potência gerada.

Desta forma, a potência disponível na energia das correntes é expressa conforme descrito na Equação 15.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (15)$$

onde, C_p é o coeficiente de potência, que representa a fração que é efetivamente extraída da potência hidráulica teórica que passa na área transversal da turbina.

Variação da velocidade de acordo com a profundidade

A velocidade das correntes varia de acordo com a profundidade devido à fricção com o fundo. Geralmente, é utilizada uma equação de decaimento exponencial apresentada na Equação 16 (FRÖBERG, 2006; EPRI, 2006).

$$v(z) = \left(\frac{z}{h} \right)^{1/\alpha} v_{pico} \quad (16)$$

onde, z é a coordenada da profundidade

h é a profundidade total

v_{pico} é a velocidade superficial da corrente

α é um parâmetro que depende do regime do escoamento

Para regimes de escoamento mais turbulentos o parâmetro α tende a ser maior, ao passo que, para escoamentos laminares este tende a ser menor. Nos estudos de avaliação do recurso energético das correntes o valor de α foi escolhido entre o intervalo de 7 e 10. Na Figura 2, um gráfico de variação da velocidade da corrente de acordo com a profundidade, utilizando a lei de potência de 1/7, é apresentado.

De qualquer forma, a utilização da Equação 16 trata-se de uma aproximação muito usada na literatura sobre aproveitamento da energia das correntes, uma vez que, os dispositivos conversores não são instalados na superfície, outrossim, em profundidades médias, nas quais é necessário o conhecimento do decaimento da velocidade. A hipótese de estuário bem misturado também é considerada nesta aproximação, pois esta supõe um decaimento homogêneo da velocidade da corrente desde a superfície até o fundo, situação que não aconteceria para estuários estratificados, causado por efeitos da intrusão salina.

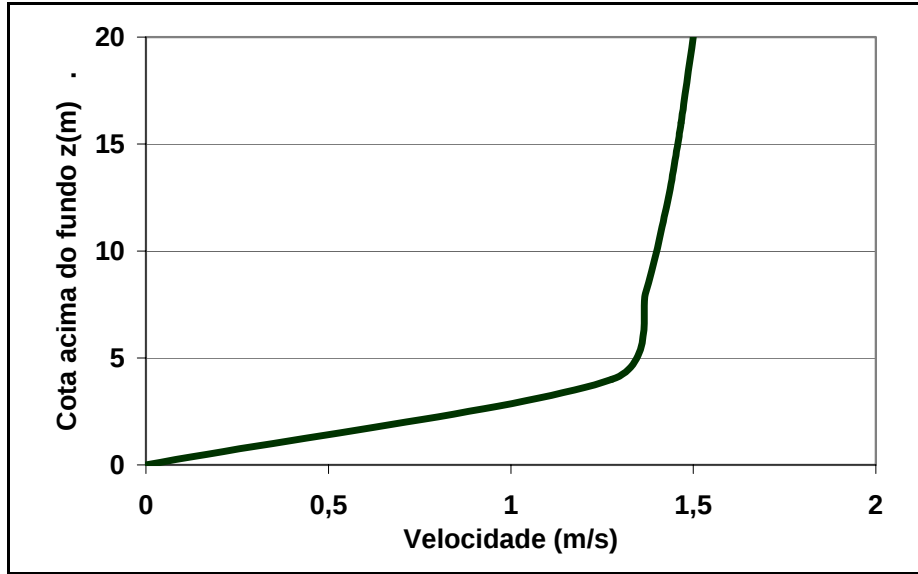


Figura 2: Variação da velocidade da corrente de acordo com a profundidade

A velocidade média pode ser calculada a partir da integração ao longo da coluna d'água dividida pela coluna d'água. Então, substituindo o numerador pela Equação 16, resulta na Equação 17(a).

$$\bar{v} = \frac{\int_0^h v(z) dz}{\int_0^h dz} = \frac{\int_0^h v_{pico} \left(\frac{z}{h} \right)^{1/\alpha} dz}{\int_0^h dz} \quad (17a)$$

Realizando a integração resulta na Equação 17b.

$$\bar{v} = \frac{v_{pico}}{h^{1/\alpha+1}} \left[z^{1/\alpha+1} \frac{1}{1/\alpha+1} \right]_0^h = \frac{v_{pico}}{h^{1/\alpha+1}} h^{1/\alpha+1} \frac{1}{1/\alpha+1} = v_{pico} \frac{\alpha}{1+\alpha} \quad (17b)$$

A potência hidráulica presente nas correntes é proporcional ao cubo da velocidade, portanto, para uma estimativa precisa deve-se calcular a média da velocidade cúbica. Através da Equação 18, a integração da velocidade ao cubo de acordo com a profundidade é realizada.

$$\overline{v^3} = \frac{\int_0^h v^3(z) dz}{\int_0^h dz} = \frac{\int_0^h v_{pico}^3 \left(\frac{z}{h} \right)^{3/\alpha} dz}{\int_0^h dz}$$

$$\overline{v^3} = \frac{v_{pico}^3}{h^{3/\alpha+1}} \left[z^{3/\alpha+1} \frac{1}{3/\alpha+1} \right]_0^h = \frac{v_{pico}^3}{h^{3/\alpha+1}} h^{3/\alpha+1} \frac{1}{3/\alpha+1} = v_{pico}^3 \frac{\alpha}{3+\alpha} \quad (18)$$

Tabela 1: Razão entre a velocidade média de acordo com a profundidade e a velocidade superficial

α	$V_{\text{média}}$	$V^3_{\text{média}}$
5	83,3%	62,5%
6	85,7%	66,7%
7	87,5%	70,0%
8	88,9%	72,7%
9	90,0%	75,0%
10	90,9%	76,9%

No desenvolvimento de turbinas eólicas, é demonstrado que a instalação de dutos difusores cria o artifício de melhorar a queda de pressão entre as regiões a montante e a jusante da hélice da turbina, fazendo com que a velocidade de escoamento aumente. Este duto de diâmetro variável quando instalado a jusante da turbina irá atuar como um difusor, reduzindo a pressão de jusante e assim aumentando a queda de pressão. Este artifício resultará em um aumento da velocidade de montante para jusante da turbina, fornecendo assim um aumento da potência gerada.

No caso do duto de diâmetro variável a ser instalado à montante da turbina, este atuará como um concentrador de fluxo, fazendo com que uma grande área contendo uma maior quantidade de energia seja concentrada em uma área menor, porém com uma velocidade maior. Neste sentido, os custos da turbina de diâmetro menor com difusor de diâmetro maior são reduzidos em comparação a uma equivalente utilizando somente o diâmetro maior.

A principal vantagem entre as turbinas de fluxo livre, com a carcaça (duto) e com carcaça e difusores (duto com diâmetro variável) está relacionada às eliminações das perdas de energia hidráulica obtida pela separação dos fluxos que passa internamente e externamente à turbina.

Diversos estudos foram propostos para o aumento da eficiência da conversão das turbinas de corrente. DARRIEUS (*apud* KIRKE, 2005) propôs a colocação de difusores para otimizar a velocidade do fluxo. KIRKE (2005) afirma que através da instalação de difusores maiores eficiências de conversão da ordem de 90% podem ser obtidas, ultrapassando até mesmo o limite de Betz.

A queda de pressão desejada depende da forma geométrica do duto e do escoamento externo a ele. Este conceito foi amplamente explorado no projeto holandês da turbina Tocardo (TOCARDO, 2009). A Figura 3 ilustra a geometria utilizada nos difusores desta turbina.

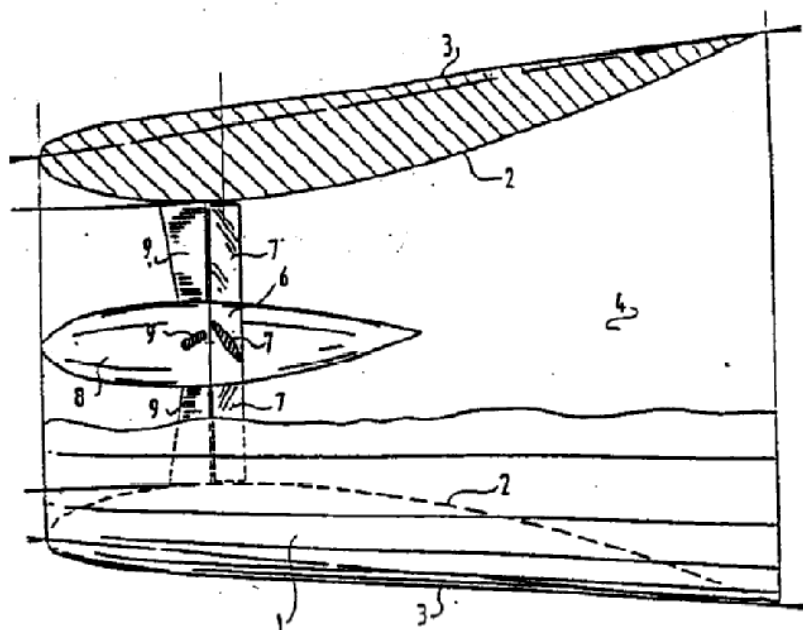


Figura 3: Geometria utilizada nos difusores da turbina Tocado (KIRKE, 2005)

Outro estudo conduzido por RIEGLER (*apud* KIRKE, 2005) estima a relação de variação da área do difusor para obter o coeficiente de potência máximo como sendo 1,96, o que representa 3,3 vezes o limite de Betz. Este fato pode ser explicado pela comparação entre uma turbina de fluxo livre com uma maior área e uma turbina de área 1,96 vezes menor dotada de difusores para obter esta maior área.

Embora a colocação de dutos e difusores apresente uma maior eficiência de conversão, por outro lado, representa maiores custos de material, fabricação e instalação. Portanto, é desejável realizar uma investigação técnico-econômica, confrontando o acréscimo de energia gerada com os custos associados à colocação dos dutos. Os resultados deste estudo podem apresentar como sendo mais favorável a utilização de dutos até um determinado diâmetro, tornando mais vantajoso a turbina de fluxo livre para diâmetros maiores. O mesmo raciocínio é válido para utilização de dutos para baixas velocidades de corrente, tornando-os dispensáveis para velocidades maiores conforme ilustrado na Figura 3 retirado do estudo de KIRKE (2005).

2.2- METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO RECURSO DAS CORRENTES

Existe escassez de material (publicações) disponível sobre a avaliação do recurso energético das correntes. Os primeiros métodos foram propostos pela ETSU e no programa JOULE II, que tinham como principal objetivo levantar o potencial de diferentes fontes alternativas de energia no continente europeu (ETSU, 1993; EUROPEAN COMISSION, 1996). A abordagem destes métodos teve uma maior ênfase na quantidade possível de conversores mecânicos a serem instalados em um dado local, também conhecido como *farm method*, e não levavam em conta seus aspectos hidrográficos e ambientais. Pode ser observada uma considerável inspiração na teoria dos aproveitamentos eólicos no desenvolvimento dessas metodologias, pela razão de estimar o potencial através da disposição de conversores considerando seus espaçamentos longitudinais e paralelos, característicos da teoria de turbinas eólicas.

Outra abordagem é descrita em BLACK AND VEATCH (2004), que considera a recuperação total do fluxo hidráulico para sucessivas conversões de energia. O limite de extração de energia devido à dinâmica do fluido e às restrições ambientais foi traduzido neste método através de um fator, chamado de Fator de Impacto Significativo - SIF (*Significant Impact Factor*). Para esta avaliação este fator foi arbitrado em 20%, ou seja, somente esta fração do potencial da energia das correntes pode ser extraída em um corpo d'água.

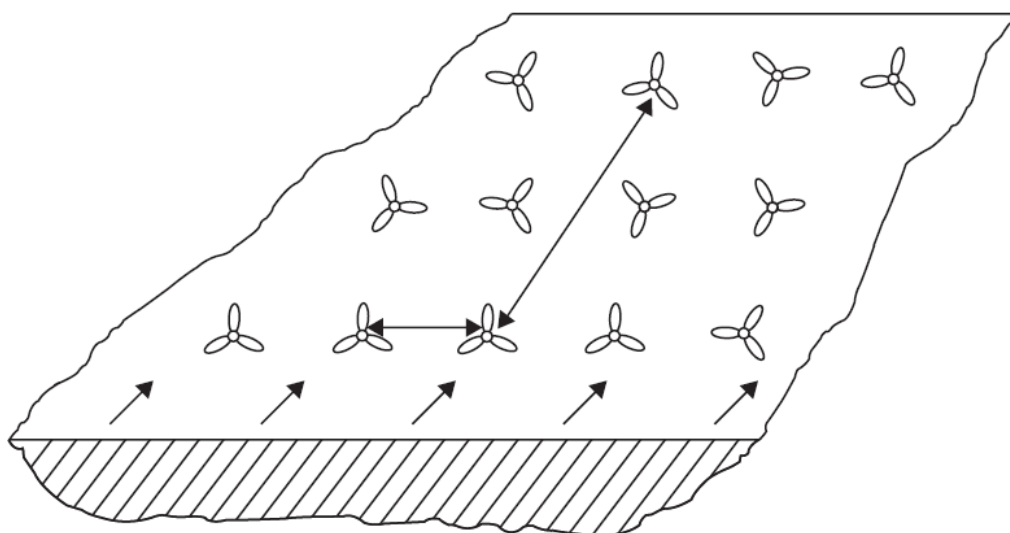


Figura 4: Método do fluxo a partir do Relatório BLACK AND VEATCH (2004)

Para uma avaliação minuciosa do potencial energético das correntes, devem ser introduzidos conceitos provenientes da própria dinâmica dos fluidos, da eficiência dos conversores e das restrições ambientais e econômicas.

Ao longo do processo de avaliação de locais para o aproveitamento energético das correntes diferentes fatores devem ser levados em consideração, relativos a aspectos físicos, ambientais e socioeconômicos. Dentre os aspectos físicos, aqueles mais imprescindíveis são a velocidade da corrente, a batimetria e a geomorfologia da região, que orientará a definição das áreas de seção transversal para instalação dos dispositivos conversores da energia das correntes. Adicionalmente, o aproveitamento energético carregará consigo transformações ambientais, tanto no tocante à oceanografia física, como mudanças no padrão de circulação e na qualidade de água, como relacionados a impactos ecológicos nas espécies da fauna e flora do local em questão. Em vários ecossistemas costeiros e fluviais existem várias áreas de proteção ambiental e têm seu uso restringido visando à conservação desses. Conjuntamente, os usos de ordem socioeconômica, especialmente a navegação, a pesca e a recreação, devem ser considerados em uma análise extensiva de projetos para este tipo de aproveitamento energético.

De fato, o processo de avaliação de locais para o aproveitamento das correntes como fonte de eletricidade apresenta um caráter multidisciplinar, conforme pode ser notado em publicações recentes como DEFNE *et al.* (2011,1), DEFNE *et al.* (2011,2) e WALKINGTON & BURROWS (2009). Desde a renovação do interesse em explorar as correntes para abastecimento de energia a partir de 1973 até meados da década de 2000, os trabalhos realizados tinham somente como enfoque a avaliação do potencial energético das correntes, produzindo estimativas confiáveis para orientar o desenvolvimento dessa tecnologia.

2.3- TÉCNICAS PARA IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS ADEQUADOS AO APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS CORRENTES

Para a caracterização dos locais adequados a exploração da energia do mar, podem ser utilizadas as técnicas de levantamento *in situ* e análise de dados oceanográficos, modelagem hidrodinâmica e sensoriamento remoto. Segundo BADDOUR (2004), a medição de dados oceanográficos com o objetivo de avaliação do recurso energético dos oceanos pode ser classificada em:

- i. medições *in situ*;
- ii. medições por sensoriamento remoto.

Entre as técnicas de sensoriamento remoto estão aquelas que usam o laser ou radar, tanto em plataformas satelitares, aeroembarcadas, navais ou ainda fixas em terra.

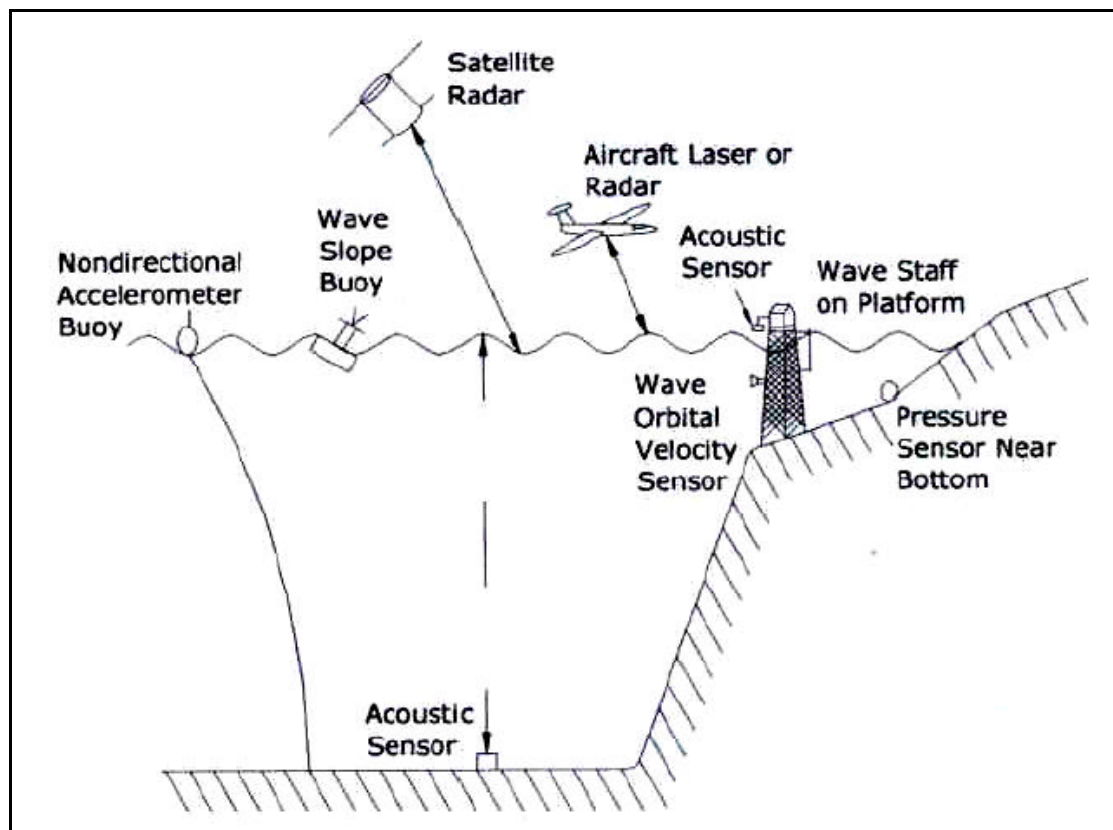


Figura 5: Ferramentas para medição de parâmetros oceânicos (Fonte: BADDOUR, 2004)

As técnicas de levantamento *in situ* empregam equipamentos de medição especializados, que devem ser instalados no local de interesse associados a uma campanha. Para a medição de altura e direção das ondas, os equipamentos atualmente mais utilizados são a bóia direcional, o perfilador acústico de efeito Doppler (ADCP), sensores de pressão e radares *in situ*, como por exemplo o sistema WaMoS. Entre aqueles para medição da maré, estão os marégrafos analógicos (bóia e contrapeso), com sensores de pressão, elétricos e ultrassom entre outras tecnologias. Na medição de correntes costeiras e estuarinas, são empregados medidores mecânicos, magnéticos, sensores acústicos simples e ADCP's. As vantagens da medição *in situ* residem no fato de haver contato entre o instrumento e o parâmetro físico avaliado, permitindo alcançar maiores níveis de precisão e sendo adotados como a verdade de campo. Suas desvantagens estão associadas à campanha para instalação e manutenção do equipamento em campo, ao custo do equipamento dedicado à medição específica e a sua limitada cobertura espacial (e temporal) de pontos localizados.

A modelagem numérica de escoamentos ambientais necessita de alguns parâmetros locais para estabelecer os parâmetros sob investigação. Geralmente, tais modelos recebem como condições de contorno e condições iniciais dados de batimetria e forçantes como dados de maré, de vento e ocasionalmente contribuições de rios, evaporação, precipitação etc. Por sua vez, fornecem como resultado os campos de correntes bi ou tridimensional e as elevações do nível d'água. Naturalmente, a precisão destes modelos está associada à qualidade dos dados de entrada, como também na habilidade do analista em ter conhecimento prévio da região em estudo e da implementação dos fenômenos nas equações governantes do modelo.

No campo do sensoriamento remoto dos oceanos, os Radares de Abertura Sintética (SAR) configuram-se como os mais utilizados para a detecção de movimentos na superfície do mar, tal como ondas, correntes e ventos. Geralmente, as técnicas de processamento SAR baseiam-se na inferência dos parâmetros do mar a partir da radiação eletromagnética retroespalhada e retornada ao radar. A detecção de ondas por SAR é obtida por funções de transferência aplicadas ao espectro dos valores de seção reta de radar (σ_0) para determinar o espectro de ondas oceânicas presentes naquela imagem. As correntes superficiais são melhor detectadas pela interferometria de duas imagens SAR, explorando a componente de fase, ao invés do processamento convencional da amplitude. A diferença de fase está relacionada com a velocidade da corrente superficial.

Ainda podem ser destacados os radares altímetros para medição do nível do mar e, como consequência, através de processamentos adicionais, a altura das ondas e as componentes de maré.

2.4 – TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA DETECÇÃO DE CORRENTES E OUTROS PARÂMETROS DO MAR

As técnicas de sensoriamento remoto constituem-se em um meio prático e confiável para a produção de dados ambientais que sirvam para a caracterização direta da região em estudo, seja para a entrada de dados em modelações, calibração ou validação destes modelos. As vantagens econômicas também devem ser consideradas em comparação com o levantamento *in situ*, que prevê campanhas com custos proporcionais a sua abrangência espacial, cobertura temporal e sofisticação dos equipamentos empregados. O sensoriamento remoto, a partir de satélites já em órbita, representa menores custos relacionados somente à aquisição da imagem, diferentemente daqueles embarcados em aeronaves, no qual os custos

do sobrevôo e a locação dos sensores remotos se configuram como custos adicionais que limitam esta alternativa.

A grande cobertura espacial e temporal, características dos satélites de observação da Terra, possibilita a ampla utilização dos seus dados derivados para o levantamento dos recursos energéticos em extensas linhas de costa e regiões estuarinas. No processo de identificação e mapeamento de locais adequados ao aproveitamento energético dos mares, os dados provenientes de sensoriamento remoto podem ser entendidos como uma primeira abordagem, que estima o potencial energético e localiza pontos prioritários para levantamentos posteriores mais específicos. O processamento de dados de sensoriamento remoto conjuntamente a técnicas de modelagem são atividades que, devido ao seu caráter de escritório, podem contribuir na agilização do levantamento dos recursos energéticos do mar, dispensando, em um primeiro momento, campanhas demoradas e custosas para produção de informações necessárias a este levantamento.

As aplicações de sensoriamento remoto aos oceanos são diversas, destacando-se a detecção de florescimento de algas, na faixa do visível, temperatura da superfície do mar e de topo de nuvem, no infravermelho e vento, ondas e correntes, na faixa das microondas (JOHANNESSEN *et al.*, 2000; SOUZA, 2008). Tais aplicações estão esquematizadas na Tabela 2.

Tabela 2: Algumas aplicações de sensoriamento remoto aos oceanos

Aplicação	Deteção de	Princípio físico	Plataforma orbital
Florescimento de algas	Concentração de Clorofila-a	Assinatura espectral dos componentes da água (água pura, material dissolvido, material particulado e fitoplâncton);	MODIS (visível)
Temperatura da superfície do mar & Temperatura de topo de nuvem	Radiação eletromagnética emitida pela água e atmosfera	Medição da radiação eletromagnética emitida que é proporcional a temperatura	NOAA e GOES (infravermelho)
Vento	Obtenção da magnitude e direção do vento	Algoritmo calcula a magnitude do vento conforme intensidade do sinal refletido (Escaterometria)	Quikscat (microondas)
Ondas	Obtenção da altura, direção e espectro de ondas	Medição da distância entre o satélite e a superfície do mar (Altimetria), intensidade da imagem de radar (NRCS)	Topex/Poseidon, GFO, Jason e Envisat (microondas)

O radar é o principal sistema de sensoriamento remoto que opera na faixa das microondas. As ondas de radar estão na faixa de 0,05 a 40 GHz, equivalentes de 6 m a 0,75 cm. Inicialmente foram utilizadas para detecção de embarcações e, posteriormente, aviões durante as grandes guerras. Atualmente, o radar pode ser embarcado em plataformas áreas ou espaciais (satélite), além de aplicações baseadas em terra.

O termo RADAR é um acrônimo de RAdio Detection And Ranging e teve o auge de sua utilização durante a 2ª Guerra Mundial, quando foi aperfeiçoado servindo a interesses militares. A denominação das bandas por letras aleatórias derivam do sigilo das aplicações militares. As bandas utilizadas no sensoriamento por radar, que correspondem a uma faixa de frequência das microondas, estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Bandas utilizadas no sensoriamento por radar

Banda de Radar	Comprimento de onda - λ (cm)	Frequência - f (MHz)
P	136-77	220-390
UHF	100-30	300-1000
L	30-15	1000-2000
S	15-7.5	2000-4000
C	7.5-3.75	4000-8000
X	3.75-2.40	8000-12500
Ku	2.40-1.67	12500-18000
K	1.67-1.18	18000-26500
Ka	1.18-0.75	26500-40000

Os sistemas de radar podem ser classificados como imageadores e não imageadores. Entre os imageadores estão os de:

- antena rotatória;
- radares de visada lateral de abertura real (*side looking* RAR);
- radares de visada lateral de abertura sintética (SAR).

Por outro lado, aqueles chamados de não imageadores incluem os escaterômetros, os espectrômetros e os altímetros.

O termo SAR é utilizado para os radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar*), os quais atualmente configuram-se como o padrão entre os radares embarcados em plataformas orbitais. A necessidade de se obter imagens de alta resolução espacial causou o

aparecimento do SAR. A resolução de azimute nos radares, diferentemente da resolução de alcance (*range*), é limitada pelo padrão de radio direcional: a largura total na máxima metade do lóbulo principal da antena. Esta largura pode ser aumentada com a abertura da antena na direção de azimute (HEIN, 2004).

Uma comparação entre as resoluções de sistemas sensores pode ser encontrada em NOVO (2008): em sensores óticos, a resolução angular é a razão entre o comprimento de onda e a abertura do sistema coletor e, assim sendo, a resolução espacial é o produto entre a resolução angular e a distância entre o sensor e o objeto. À medida que a altitude aumenta, a resolução espacial diminui, a menos que o tamanho do sistema coletor aumente. Para os sensores que operam nas faixas do visível e do infravermelho, onde o comprimento de onda é pequeno, os sistemas coletores são modestos. Porém para sensores que operem na faixa das microondas, onde as ondas são 100.000 vezes maiores, a solução é aumentar a abertura da antena.

Portanto, a abertura sintética do sistema coletor no SAR baseia-se em um artifício, desenvolvido por Wiley na década de 1950, no qual, ao invés de ser construída uma antena complexa de centenas de metros, apenas uma simples antena é instalada, imageando o alvo durante um tempo de sobrevôo e, assim, perfazendo a chamada antena efetiva. A integração coerente do sinal ao longo do sobrevôo, realizado virtualmente, compõe a imagem do alvo. Desta forma, utilizando o histórico Doppler no sinal retroespalhado através da plataforma em movimento, é possível criar uma imagem equivalente a uma imageada por uma antena muito maior do que aquela existente.

Desde o advento do SAR, estes passaram a ser bastante utilizados em comparação com os radares de abertura real (RAR), configurando-se como o padrão entre os radares imageadores. Como explanado anteriormente, a resolução de azimute nos sensores SAR recebeu uma melhora significativa em função do aumento da antena efetiva obtido pelo artifício da abertura sintética, enquanto os sistemas RAR são limitados em sua resolução azimutal. Em relação à resolução de alcance, ambos os sistemas RAR e SAR determinam-a a partir da largura de banda do sinal transmitido.

Os dados provenientes do SAR são atualmente considerados os mais favoráveis para obter informações sobre as variáveis oceânicas. As aplicações do SAR relacionadas com a interpretação de dados oceânicos abrangem: detecção de derramamento de óleos, detecção de navios, mapeamento de feições oceânicas, medição de altura e direção de ondas, medição de vento e medição de correntes.

O histórico do sensoriamento remoto dos oceanos via plataformas orbitais tem o seu marco inicial com as missões GEOS-3 de 1975 que apresentou uma performance modesta e a Seasat da NASA em 1978, que apresentou erros de 10 cm na altimetria porém 50 cm a 1 m na determinação da órbita. Sucessivamente, foram lançadas as missões Geosat da US Navy em 1985, que foi a primeira missão de performance satisfatória, elaborando um mapa detalhado do geóide marinho até 72° de latitude e de 1986 a 1990, o Geosat ficou destinado a estudos científicos sobre os oceanos. Em 1992, foi a vez da missão Topex/ Poseidon (CNES e NASA) dedicada a estudos oceânicos. O sensor GPS embarcado estava em fase experimental, enquanto o Doris possuía o mesmo objetivo de determinação precisa da órbita. A agência espacial europeia (ESA) lançou os satélites ERS-1, ERS-2 (1991) e Envisat (2002) com radares altímetros embarcados, além dos radares imageadores. A missão Envisat foi concebida com um apelo em compreender o meio ambiente e as mudanças climáticas. Por último, o Jason-1 foi lançado para suceder a missão exitosa do Topex-Poseidon em 2001, e será substituído pelo Jason-2.

Tabela 4: Histórico de missões satelitares para observações do oceano

Satélite/sensor	Lançamento	Banda	Polarização	Resolução espacial (m)
Seasat/SAR	1978	L	HH	25
Shuttle/SIR-A	1981	L	HH	40
Shuttle/SIR-B	1984	L	HH	17-58
Almaz-1/SAR	1991	S	HH	10-30
ERS1/2/SAR	1991/95	C	VV	30
JERS-1/SAR	1992	L	HH	18
SIR-C/XSAR	1994	C-L-X	multi	15-45
Radarsat/SAR	1995	C	HH	8-100
Envisat/ASAR	2002	C	multi	30-1000
Radarsat-2/SAR	2003	C	multi	3-100
ALOS/PALSAR	2004	L	multi	10-100

Devido ao artifício da antena de abertura sintética, a imagem final SAR é composta por uma série de visadas ou *looks*, que são promediados para aumento da resolução espacial.

Cada visada corresponde a um pulso emitido e recebido e compõe um simples imageamento do alvo. Na imagem final, várias visadas do mesmo alvo são combinados através do processo *multilook*, no qual o histórico Doppler de cada visada possibilita a reconstituição da imagem. Um esquema da geometria do imageamento SAR é apresentado na Figura 6.

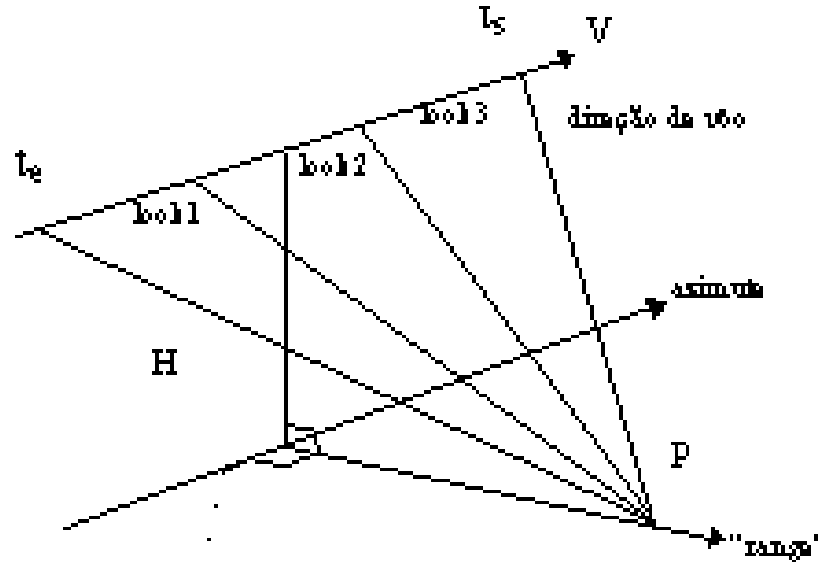


Figura 6: Geometria do imageamento SAR (SPRING, 1996)

Durante o imageamento, reflexões aleatórias fazem aparecer uma espécie de ruído na imagem, proporcional a intensidade do sinal. Este ruído recebe o nome de Speckle e causa um efeito visual de textura granulosa que pode dificultar a interpretação das imagens de radar, reduzindo a separabilidade entre os objetos da cena. Existem dois métodos para diminuir o ruído Speckle: a filtragem e o processamento *multilook*.

Cada visada é considerada estatisticamente independente entre si, possibilitando que através do processamento *multilook*, este ruído seja atenuado ao passo que o sinal é reforçado. Desta forma, a razão sinal-ruído da imagem final é aumentada, sendo proporcional a raiz quadrada do número de visadas. Entretanto, o processamento *multilook* provoca uma degradação na resolução em azimuth, uma vez que as imagens de cada visada possuem uma largura de banda menor que a largura total, conforme Equação 19.

$$B_{look} = B_D \cdot n_{look} \quad (19)$$

onde n_{look} é igual ao número de visadas (*looks*).

A resolução em azimuth, nesse caso, torna-se n_{look} vezes menor que a imagem de apenas uma visada.

As imagens SAR apresentam seus dados em formato complexo, ou seja, são registradas as amplitudes e fases do sinal retroespalhado do radar. Seja U_q e U_i as

componentes real e imaginária, então, A será a amplitude do pixel e α a fase do pixel complexo. As componentes U_q e U_i são codificadas em 16 bits, logo 32 bits para sua representação.

O nível de processamento bruto (*raw data*) corresponde aos dados brutos, a partir do qual deve ser executada, basicamente, a inversão Doppler e a separação dos dados por quadro (ou imagem), os coeficientes de correção são armazenados para correções futuras. Este nível de processamento não costuma ser utilizado por usuários finais, por se tratar de um tratamento essencial para transformar dados eletrônicos em imagens de satélite. As imagens *Single Look Complex* correspondem à separação nos vários visadas (*looks*) que compuseram a imagem final. Esse nível é mandatório para efetuar o processamento da Interferometria SAR (InSAR) devido ao fato das imagens ainda estarem separadas por *look* e ainda conservarem o sinal de fase além da amplitude do sinal.

O nível multivisadas (*multilook*) corresponde ao último processamento da imagem voltada para a utilização de usuários finais. Este processamento engloba a transformação das coordenadas *slant* (inclinada), próprio do radar, para coordenadas *ground* (solo) e, então, convertidas em coordenadas geográficas. Os efeitos de distorção da imagem são suprimidos com este processamento e também o ruído, através do processamento chamado multivisadas. O processamento multivisadas utiliza as diferentes visadas para realçar o sinal investigado e reduzir o ruído, considerado aleatório e, portanto, se anulando durante a sobreposição das visadas. Neste momento, que acontece a perda do sinal de fase, indesejada para processamentos interferométricos posteriores.

Os sensores SAR satelitares são capazes de realizar os seguintes modos de imageamento: *stripmap*, *spotlight*, *scanSar*. O modo *stripmap* imageia com um ângulo fixo do sensor SAR, enquanto o modo *scanSar* é capaz de obter largas coberturas espaciais por causa de sua varredura em ângulo e o modo *spotlight* direciona continuamente sua antena para imagear uma certa região por mais tempo, aumentando sua resolução em azimuth. Atualmente, as polarizações do campo eletromagnético do sinal enviado e recebido operadas pelos sensores SAR podem atingir as quatro combinações de polarização possíveis: polarização simples (*single pol*), orientação horizontal do campo eletromagnético do sinal emitido e horizontal do recebido (HH), polarização dupla (*dual pol*), orientação do campo do sinal emitido na horizontal e recebido na horizontal ou vertical (HH e HV) e polarização quádrupla (*quad pol*), orientação do campo do sinal emitido na horizontal ou vertical e recebido na horizontal ou vertical (HH, HV, VH e VV).

No caso do sensoriamento remoto dos oceanos por SAR, parâmetros de ondas e correntes podem ser estimados através do processamento das imagens. O mecanismo de imageamento baseia-se no modelo de retroespalhamento Bragg, no qual se admite que as ondas capilares presentes no oceano entram em ressonância com a radiação eletromagnética enviada pelo radar, desde que os seus comprimentos de onda sejam da mesma ordem de grandeza. Por este motivo as bandas de radar preferenciais para o sensoriamento remoto dos oceanos são a X (3 cm), C (5 cm) até a L (11 cm).

As condições necessárias para o imageamento oceânico através de sensores SAR compreendem o comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida, o ângulo de incidência do sensor durante o imageamento, a velocidade e a direção do vento. O princípio físico envolvido no imageamento oceânico é descrito pelo modelo de espalhamento Bragg. Esta teoria, inicialmente desenvolvida pelos físicos ingleses Bragg pai e filho, para estabelecer uma relação física entre a reflexão das faces clivadas de cristais quando submetidas a feixes de raios-X para determinados ângulos de incidência.

O princípio do espalhamento Bragg das ondas de radar aplicado sobre a superfície oceânica considera que existe uma ressonância causada pela incidência do sinal do radar em uma superfície que possui estruturas periódicas. Seja λ_e o comprimento de onda do radar e λ_B o comprimento de onda capilar e θ o ângulo de incidência do instrumento SAR, para que a energia retroespalhada das ondas oceânicas esteja em fase, a distância com que a radiação passa entre picos deve ser igual à metade do comprimento de onda da radiação, conforme Equação 20 e ilustrado na Figura 7.

$$\lambda_e = 2\lambda_B \sin \theta \quad (20)$$

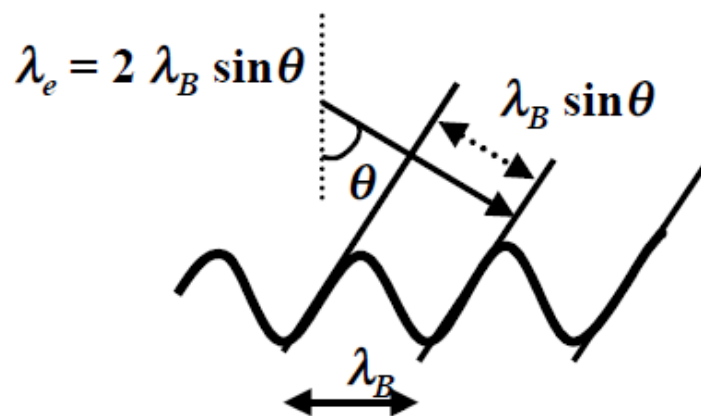


Figura 7: Ilustração da ressonância Bragg entre o sinal de radar e as ondas capilares

A faixa de aplicação da teoria de Bragg para o imageamento oceânico por radar compreende ângulos de incidência entre 20° e 60° (HASSELMAN & HASSELMAN, 1991). Desta forma, a medição de parâmetros oceânicos pode ser efetuada por técnicas de processamento SAR. As ondas ou as correntes são identificadas nas imagens SAR através da modulação hidrodinâmica (da onda ou da corrente) destas ondas capilares, acarretando em uma variação dos valores de seção reta de radar (σ_0).

Em ALPERS *et al.* (1981), os mecanismos responsáveis pela formação de padrões de onda (*wavelike patterns*) na imagem de radar são descritos. A detectabilidade das ondas é obtida através de contribuição de duas modulações da seção reta de radar nos sistemas RAR: a modulação de *tilt* e a modulação hidrodinâmica. O espalhamento Bragg é visto pelo radar por diferentes ângulos de incidência para cada localização das ondas capilares, este efeito puramente geométrico é definido como modulação de *tilt*. A modulação hidrodinâmica significa a modulação exercida pelas ondas de gravidade nas ondas capilares, que por sua vez são os marcadores na imagem de radar devido ao seu retroespalhamento Bragg. Para sistemas SAR, outro mecanismo aparece conhecido como *velocity bunching*.

Este terceiro mecanismo de imageamento, chamado de *velocity bunching*, é inerente aos sensores SAR. Quando a superfície do oceano é imageada, os elementos espalhadores (ondas capilares) têm velocidade radial variável, o que conduz a um padrão espacial de espalhamento não uniforme na imagem. Este fato acontece devido ao movimento dos espalhadores, que estão modulados pelas ondas oceânicas mais longas e é observado nas imagens obtidas pelos sensores SAR. Uma vez que o SAR obtém a localização do alvo na direção de azimuth através da sua coordenada Doppler, se o alvo está em movimento ele afetará essa relação e, no caso mais favorável, as velocidades variantes das partículas da onda dão origem a padrões semelhantes às próprias ondas (*wavelike patterns*). Em outras palavras, a variação periódica de seção reta de radar (σ_0) corresponde ao retroespalhamento do sinal emitido por espalhadores modulados nas ondas oceânicas maiores e não é uma reprodução dos próprios cavados e cristas desta onda oceânica (Figura 8).

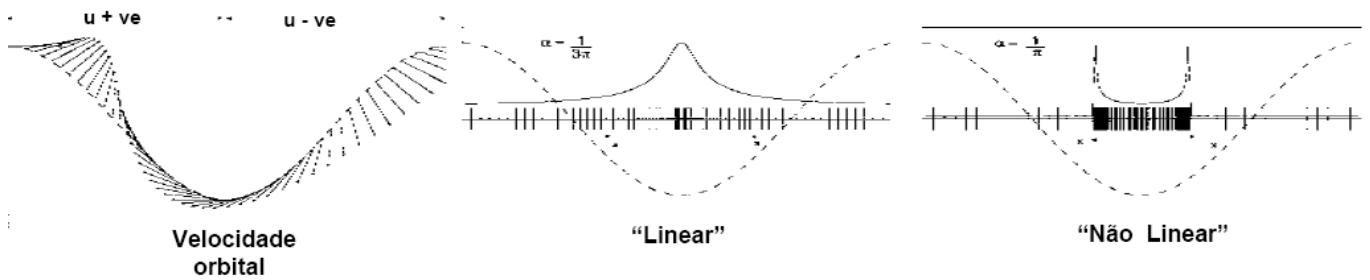


Figura 8: Formação dos padrões de onda (*wavelike patterns*) nas imagens SAR

Juntamente com a modulação de *tilt* e a modulação hidrodinâmica, o *velocity bunching* é o terceiro mecanismo que aparece nos sistemas SAR para observação dos movimentos da superfície dos oceanos. Segundo ALPERS *et al.* (1981), a função de transferência R que relaciona a variação de σ_0 na imagem com a variação das ondas na superfície do mar é composta de três termos:

$$R^{SAR} = R^{tilt} + R^{hydr} + R^{bunching} \quad (20)$$

Cada termo deste está associado a uma teoria física do imageamento que pode ser encontrada no próprio artigo fonte (ALPERS *et al.*, 1981). Ademais, esta teoria foi transformada em modelo por Alpers e pesquisadores posteriores, inclusive sendo aplicada a correntes (ROMEISER *et al.*, 1987).

A avaliação quantitativa das correntes superficiais por processamento de imagens SAR foi proposta primeiramente nos trabalhos de ALPERS & HENNINGS (1984), no qual eram estimadas as variações espaciais das correntes sobre ondulações de areias submarinas. SCHUCHMAN *et al.* (1985) enunciaram equações e princípios fundamentais para extração das correntes a partir de imagens SAR. Estava sendo proposto nas teorias apresentadas nestes trabalhos, que a variação da intensidade na imagem de radar era resultante da distorção das ondas Bragg causada pela variação espacial das correntes. Então, havia uma proporcionalidade entre a modulação de intensidade do sinal e a corrente superficial na direção de visada do radar (ROMEISER *et al.*, 2003).

Diferentes algoritmos foram propostos para a detecção de correntes pelo SAR, associados a um caso particular de investigação. Os algoritmos identificados foram: a) detecção de singularidades (*feature detection*) e classificação de imagens; b) monitoramento da singularidade (*feature tracking*); c) detecção do gradiente das correntes em frente oceânicas; d) análise das assinaturas de ondas internas e e) avaliação da batimetria

(ROMEISER *et al.*, 2003). Todos os algoritmos citados detectaram as correntes de maneira indireta, dentro das limitações do estudo.

Duas técnicas emergentes para a detecção de correntes por SAR são referenciadas em ROMEISER *et al.* (2003): a análise do centróide Doppler e a interferometria *along-track*. A primeira técnica parte do princípio que na própria formação das imagens SAR, existe um desvio Doppler adicional nas visadas resultante da velocidade do alvo na direção da trajetória do satélite. Esta informação existe na imagem bruta e pode ser mantida através de um processamento com menor resolução (isto é utilizando menos visadas) ou através da estatística de fase da imagem *Single Look Complex*.

A interferometria *along-track* SAR pode ser entendida como uma evolução da estratégia Doppler em detectar alvos em movimento ao longo da trajetória do satélite. Basicamente, esta técnica se baseia na aquisição de duas imagens SAR da mesma cena, com um curto intervalo de tempo entre elas, associada à distância física das duas antenas imageadoras. As imagens devem estar no formato complexo, isto é, devem conservar o sinal de amplitude e fase do sinal retroespalhado para cada pixel. O atraso entre a aquisição das duas imagens deve ser da ordem de milissegundos, o que equivale a uma linha de base de alguns metros. Os sinais de fase de cada pixel nas imagens apresentarão uma diferença, a qual é proporcional ao atraso de tempo e ao desvio Doppler do sinal. Esta diferença pode ser associada à velocidade do alvo na direção de linha de visada do satélite (ROMEISER *et al.*, 2003).

O histórico da utilização da interferometria SAR pode ser assim sintetizado: Graham (1974) realizou experimentos empregando a interferometria *across-track* (XTI) em sensores SAR aerotransportados (HEIN, 2004). A primeira iniciativa em interferometria *along-track* (ATI), foi realizada por GOLDSTEIN & ZEBKER (1987), na qual esta técnica foi utilizada para medição da velocidade radial do alvo. Todavia, o enfoque maior foi dado à interferometria *across-track*, objetivando o mapeamento topográfico.

A primeira iniciativa utilizando a técnica ATI-SAR em 1989 não obteve êxito. THOMPSON & JENSEN (1993) propuseram empregar esta técnica para obtenção de variáveis do mar. Esta leva em conta as contribuições das velocidades da fase de duas componentes de onda Bragg (ondas curtas oceânicas estão em ressonância com o sinal do radar) e as velocidades orbitais de ondas longas para as fases ATI observadas, assim como, dos efeitos de modulação hidrodinâmica do espectro de ondas de superfície causadas pela variação espacial das correntes.

Os algoritmos até então utilizados para a detecção de parâmetros oceânicos por SAR, notadamente as ondas de gravidade, não estavam adequados para serem empregados na técnica de ATI. O modelo baseado no trabalho de THOMPSON (1989) que tinha como objetivo transformar o espectro de ondas oceânicas em espectro de microondas Doppler consumia muito tempo computacional e possuía um esquema numérico não apropriado para grandes padrões de correntes em 2D. Esta necessidade de obter um algoritmo mais robusto possibilitou a origem do modelo M4S (ROMEISER *et al.*, 1987).

Este modelo, formulado por ROMEISER & THOMPSON (2000), introduziu uma simplificação para simular o espectro Doppler, dispensando os cálculos dependentes do tempo e, desta forma, aumentando sua velocidade de processamento em relação ao modelo anterior de Thompson. O modelo M4S é composto de dois módulos: módulo de interação onda-corrente-vento, que calcula a modulação do espectro de ondas para uma dada corrente ou campo de vento e módulo de radar, que converte em NRCS, espectro Doppler, imagens de intensidade SAR, fase InSAR e coerência entre outros. O módulo de interação onda-corrente é descrito em ROMEISER & ALPERS (1997), enquanto o módulo de radar é descrito em ROMEISER *et al.* (1997) e ROMEISER & THOMPSON (2000).

Em 2000, a missão SRTM (Shuttle Radar Mission) obteve êxito no mapeamento do relevo da superfície terrestre, na qual foram produzidos Modelos Digitais de Terreno (MDT) para 86% da superfície excluindo as regiões polares. A técnica utilizada foi a interferometria *across-track* (XTI). Embora, fosse uma missão XTI-SAR, as antenas guardavam também uma distância no sentido *along-track*, fato que permitiu algumas aplicações sobre as superfícies oceânicas costeiras.

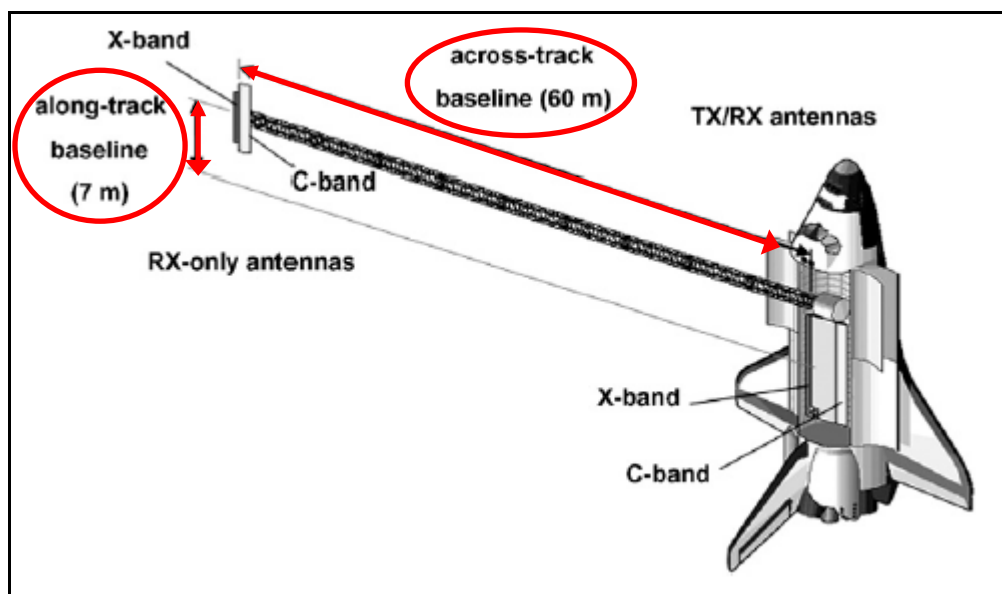


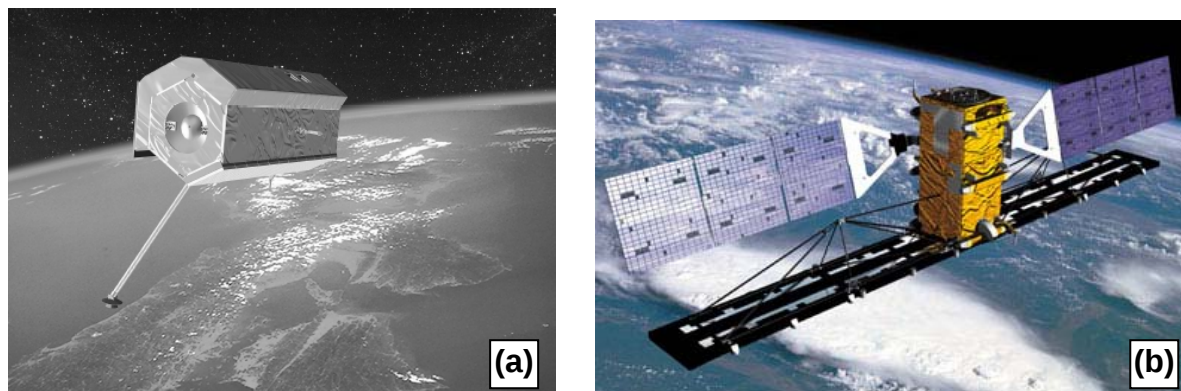
Figura 9: Missão SRTM – ônibus Endeavour dotado de duas antenas operando nas bandas X e C

ROMEISER (2003) utilizou algumas imagens ATI da missão SRTM para determinar a velocidade da corrente no mar de Wadden e no rio Elba. A medição de correntes por ATI-SAR, já consagrada em sensores aerotransportados, é apresentada em SIEGMUND *et al.* (2003), associada à medição da topografia estuarina através da técnica XTI-SAR. Nesta aplicação, as duas antenas foram dispostas guardando entre si uma distância ao longo e ao través da trajetória.

RUNGE *et al.* (2003) sugerem a aplicação da técnica de medição de corrente por ATI-SAR satelitar para exploração da energia das correntes como fonte de eletricidade. Também é proposta uma metodologia de processamento de imagens SAR e avaliação do potencial energético de um sítio.

A partir dos satélites embarcados com sensores SAR lançados recentemente, a melhoria na resolução espacial, capacidade interferométrica e polarimétrica, vem proporcionando incrementar as técnicas de processamento SAR. Especialmente, o lançamento dos satélites TerraSAR-X e Radarsat-2 ocorridos no final de 2007, vem explorando capacidades interferométricas, através de estratégias de disposição das antenas (ROMEISER, 2009; THOMPSON & LIVINGSTONE, 2000; PIERRE *et al.*, 2003), bem como, de algoritmos para o processamento destas informações. A interferometria *along-track* satelitar está ainda em fase experimental em ambos os satélites, o que tem se configurado como promissor a partir dos avanços obtidos ao longo destes experimentos.

Em Romeiser (2009), a técnica de ATI-SAR para detecção de correntes é empregada pela primeira vez em imagens do satélite TerraSAR-X. Nas Figuras 10, os satélites dotados com o sensor SAR, o alemão TerraSAR-X e o canadense Radarsat-2.



Figuras 10: (a) TerraSAR-X, banda X, duas antenas, ATI é um modo experimental
(b) Radarsat-2, banda C, duas antenas, ATI também é um modo experimental

A interferometria é uma técnica de processamento de imagem, onde a informação de fase é explorada, ao contrário dos processamentos convencionais que utilizam a amplitude do sinal. O processo baseia-se na criação de um interferograma a partir dos sinais de fase de duas ou mais imagens SAR, que permite inferir o parâmetro que está sendo investigado.

Basicamente existem três tipos de interferometria: a de repetidas passadas, a de uma passada across-track (XTI ou CTI) e a de uma passada along-track (ATI). No caso de repetidas passadas, a plataforma possui somente uma antena e imageia o alvo em diferentes passadas (em diferentes órbitas). Entre as principais aplicações está o monitoramento de ocupação do solo, desmatamento e também a subsidência de terrenos. A interferometria de uma passada parte do pressuposto que existem duas antenas na plataforma, ou que a antena é dividida para obter dois imageamentos. Dependendo da estratégia de instalação das antenas, estas podem estar ao través da trajetória (*across-track*) ou ao longo da trajetória (*along-track*). A aplicação das duas modalidades se difere, sendo a primeira, que observa o mesmo alvo em ângulos de incidência distintos, preferencial para a elaboração de modelos digitais de terreno (MNT ou MDT) e a segunda, que observa o mesmo alvo em instantes de tempo ligeiramente diferentes, é adequada para estimar a velocidade de alvos em movimento.

Para a determinação de correntes oceânicas superficiais, a interferometria *along-track* pode ser utilizada. Os requisitos básicos para essa aplicação são: duas imagens são obtidas quase simultaneamente com um atraso em milissegundos (τ), proporcional à distância entre

as duas antenas (*baseline*), quando a 2ª antena ocupa o lugar da 1ª, esta obtém a 2ª imagem. A coerência entre as imagens deve ser menor do que 1 (pois neste caso não haveria diferença entre as imagens), porém não muito baixa (como se fossem imagens de alvos diferentes). Os principais parâmetros que devem ser atendidos são o comprimento de onda do radar (λ), a *baseline* (B) e a coerência (ρ). A razão sinal-ruído (SNR) também é importante, à medida que, conforme explanado anteriormente, os sistemas SAR são muito sensíveis ao ruído e, principalmente, quando imageam alvos em movimento.

2.5 – INTERFEROMETRIA SAR

A interferometria explora o fato que a fase do sinal retroespalhado por um alvo em movimento muda com o tempo em uma taxa determinada pela velocidade do alvo na linha de visada (efeito este que corresponde ao desvio Doppler na frequência). Desta forma, duas imagens SAR complexas são adquiridas com um breve atraso de tempo que irá exibir uma diferença de fase proporcional ao atraso de tempo e a taxa de mudança de fase. A diferença de fase do sinal de cada pixel nas duas imagens compõe o interferograma (ALLEN, 1995; ROMEISER *et al.*, 2002). Após processamentos adicionais, as diferenças de fase constantes do interferograma são convertidas na velocidade superficial do alvo.

A geometria básica da interferometria *along-track* SAR consiste na disposição de duas antenas ao longo da trajetória da plataforma, de maneira que, quando a plataforma se desloca a segunda antena adquire outra imagem da cena com um atraso de milissegundos, proporcional a distância entre as duas antenas. A coerência entre as imagens deve ser menor do que 1, pois objetiva-se detectar diferenças entre as duas imagens, entretanto, a coerência não deve ser muito baixa, como se as imagens pertencessem a alvos diferentes. A este problema dá-se o nome de decorrelação temporal.

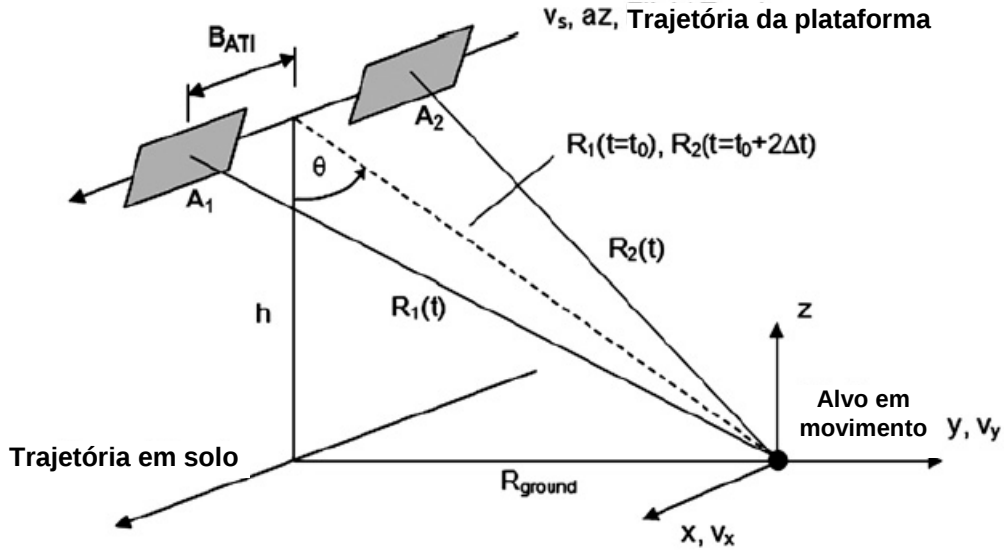


Figura 11: Geometria básica da interferometria *along-track* SAR

onde,

B_{ATI} é a *baseline* no arranjo *along-track*;

A_1 e A_2 são as antenas;

x é a direção da trajetória da plataforma;

y é a direção de visada do sensor;

$t = t_0$ é o tempo da obtenção da 1ª imagem;

$t = t_0 + 2\Delta t$ é o instante de obtenção da 2ª imagem.

Os principais parâmetros do sensor SAR para implementação da ATI são o comprimento de onda do radar (λ), a linha de base (*baseline*) (B) e a coerência, medida pelo coeficiente de correlação (ρ). A razão sinal-ruído (SNR) também é importante.

A equação fundamental que relaciona a diferença de fase interferométrica $\delta\phi$ com a velocidade radial do alvo v_r foi demonstrada por ZEBKER & GOLDSTEIN em 1987 (ALLEN, 1995; ROMEISER *et al.*, 2002), conforme a Equação 21.

$$\delta\phi = 2\pi f_D \tau = -\frac{4\pi\tau}{\lambda} v_r \quad (21)$$

onde,

$\delta\phi$ é a diferença de fase interferométrica;

τ é o intervalo de tempo interferométrico;

f_D é a frequência Doppler;

λ é o comprimento de onda do radar;

v_r é a velocidade do alvo.

Conforme explanado anteriormente no início desta seção, a técnica de interferometria SAR baseia-se na aquisição de um par de imagens SAR e aproveitamento da informação de fase do sinal retroespalhado. Considerando o formato complexo das imagens SAR, estas devem ser multiplicadas pixel a pixel com o conjugado complexo das duas imagens, conforme Equação 22.

$$\hat{Z} = \hat{Z}_1(x, y) \cdot \hat{Z}_2(x, y)^* \quad (22)$$

E, então, a fase é calculada conforme a Equação 23.

$$\delta_\phi = \arctan \frac{\text{Re}\{\hat{Z}(x, y)\}}{\text{Im}\{\hat{Z}(x, y)\}} \quad (23)$$

O grau de coerência entre os sinais das duas imagens SAR, segundo BAMLER (1993, *apud* ROMEISER *et al.*, 2002), descrito na Equação 24.

$$\gamma = \frac{E\{s_1 \cdot s_2^*\}}{\sqrt{E\{|s_1|^2\}} E\{|s_2|^2\}}} \quad (24)$$

A Figura 12 apresenta um fluxograma esquemático do processo interferométrico.

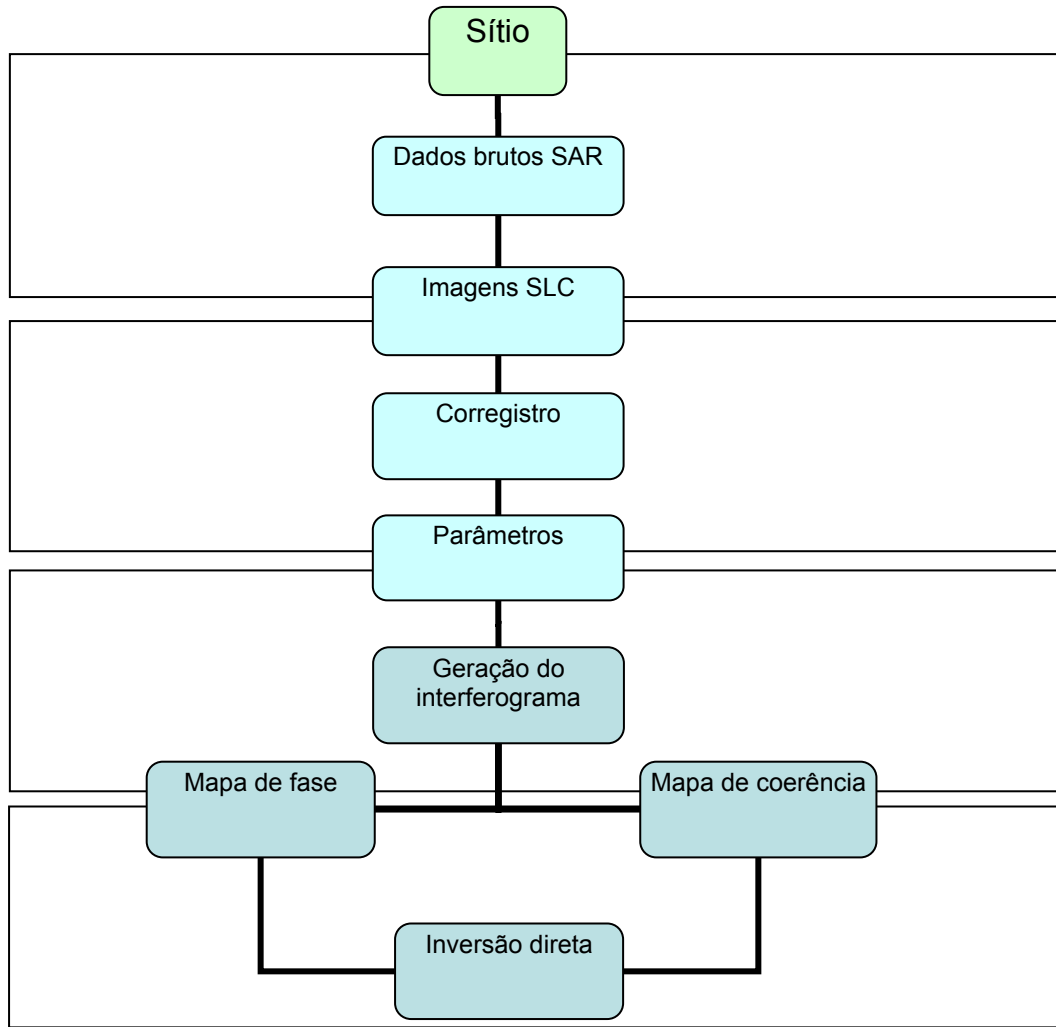


Figura 12: Fluxograma do processo interferométrico

Os erros relativos à distorção da fase no sinal da imagem estão associados às várias fontes de incerteza como: (i) a distância de alcance do sensor, (ii) a atitude dos sistema, (iii) a separação da linha de base, (iv) a altitude do sistema e (v) a medição da fase (ALLEN, 1995). Por sua vez, as incertezas na medição da fase são relativas à razão sinal-ruído (SNR), ao ruído Speckle, à falha no registro do pixel e à decorrelação.

A decorrelação temporal ocorre devido ao movimento do alvo em um tempo muito menor do que acontece com alvos estacionários ou quase estacionários (ex. gelo no mar), da ordem de milissegundos. A magnitude da autocorrelação do campo retroespalhado em função da defasagem de tempo τ é dada pela Equação 25.

$$\rho_t(\tau) = |r(\tau)| = \frac{1}{\sigma} \left| \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi f\tau} S(f_D) df_D \right| \quad (25)$$

onde,

r é a função de autocorrelação;

s é o valor esperado do NRCS;

f_D é a frequência Doppler;

S é definido de tal forma que sua integral conduz a s .

Se o campo retroespalhado decorrelaciona entre as aquisições das duas imagens, então, estas são estatisticamente independentes e a diferença de fase em cada pixel são valores aleatórios com uma distribuição uniforme sem significado para a interferometria. O tempo de correlação ou de coerência, ou seja, a defasagem de tempo onde ρ_t fica abaixo de um valor limiar, é o valor recíproco da largura de banda Doppler, que é basicamente proporcional à frequência do radar e à altura de onda da superfície.

O comprimento das *baselines along-track* e *cross-track* está relacionado com a correlação espacial entre as duas imagens e, portanto, com a sensibilidade da fase interferométrica. Caso a *baseline* seja muito curta, não haveria problemas de decorrelação, porém as diferenças de fase seriam pequenas e difíceis de ser detectadas. No caso de *baselines* muito longas, as imagens podem apresentar problemas de decorrelação, impossibilitando efetuar a interferometria entre elas. Outro problema para *baselines* longas está associado aos efeitos de dobramento de fase e suas ambiguidades.

Em aplicações de interferometria *cross-track*, a decorrelação espacial ocorre devido à diferença de ângulos de incidência das duas antenas. O sinal recebido pelas duas antenas se decorrelaciona quando as linhas dos difusores na superfície que estão em fase com uma célula de resolução em alcance difere mais do que 1. ZEBKER & VILLASENOR (1992) deduziram uma expressão para a decorrelação espacial, transcrita na Equação 26.

$$\rho_s(\tau) = 1 - \frac{2 \cos \theta |\delta \theta| \Lambda_y}{\lambda} \quad (26)$$

onde,

θ é o ângulo de incidência de uma das duas antenas

$\delta \theta$ é a diferença entre os ângulos de incidência

Λ_y é a resolução ao solo do radar

Deste modo, pode ser determinada a *baseline* crítica, apresentada na Equação 27, que é derivada da equação $B_{\perp} \approx H |\delta \theta| / \cos \theta$.

$$B_{c0} = \frac{\lambda H}{2 \Lambda_y \cos^2 \theta} \quad B_{c0} > B_{\perp} \quad (27)$$

Embora o comprimento da *baseline* seja preponderante para a sensibilidade da medição na interferometria, foi mostrado em GATELLI *et al.* (1994) que mesmo para *baselines* inadequadas, causando decorrelação espacial entre as imagens, este problema pode ser compensado no estágio de processamento de dados.

Isso é possível porque o sinal não é monocromático, e sim possui uma largura de banda finita. Seu espectro pode ser filtrado de tal forma que ambas as antenas usam uma ligeira diferença de frequência a qual corresponde a um número de onda comum na superfície. Esta mudança na frequência de radar irá também compensar a dependência do ângulo de incidência do desvio Doppler associado com os movimentos horizontal. O limite superior da *baseline cross-track*, ou *baseline* crítica “real” é determinado quando não há sobreposição de espectro entre os sinais recebidos pelas 2 antenas:

$$B_c = \frac{\Delta f_y \lambda R \tan \theta}{c} \quad (28)$$

onde, Δf_y é a largura de banda da frequência do sistema;

$R = H/\cos\theta$ é a distância entre a antena e o alvo;

c é a velocidade da luz.

Para a superfície oceânica com variações de subescala pronunciada no campo de velocidades e um espectro Doppler correspondente do sinal retroespalhado, tem-se:

$$\delta\varphi_v = \arg(R_p) = \arg\left(\frac{1}{\sigma_p} \int e^{i2\pi f_D} S_p(f_D) df_D\right) \quad (29)$$

onde, $S_p(f_D)$ é o espectro Doppler das contribuições do sinal retroespalhado e σ_p é sua integral.

Devido a forte correlação entre a velocidade da linha-de-visada e as variações do NRCS a longo das ondas oceânicas, o *offset* da média Doppler, e então, a fase InSAR pode ser significativamente diferente da equação mostrada anteriormente. No mapeamento de elevações de terreno, estas são determinadas a partir das componentes horizontal e vertical da *baseline cross-track* B_y e B_z . Nesta, as contribuições das variações na resolução da subescala na elevação e variações do NRCS contribuem muito pouco para a diferença de fase. Em oposição, no oceano isso não é verdade.

É importante ajustar as *baselines along e cross-track*, e então, sua sensibilidade para as variações de escala que se espera de velocidades na linha-de-visada e/ou nas elevações de terreno a serem detectadas. Para pequenas *baselines* não são observadas variações de fase.

Enquanto que para grandes *baselines* ocorrem problemas de decorrelação e efeitos de dobramento de fase e suas ambiguidades.

2.6 – TÉCNICAS DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE CIRCULAÇÃO

Os modelos hidrodinâmicos de circulação são apontados como a principal técnica na avaliação do recurso energético das correntes. Conforme sugerido por BRYDEN *et al.* (2006), o primeiro estágio da avaliação da energia das correntes necessita de dados que nem sempre são suficientes para permitir uma estimativa do potencial, que na sua ausência deve-se recorrer a modelagem numérica da circulação no local. ROSMAN (2001) também defende a utilização de modelos numéricos de circulação, face à complexidade dos fenômenos naturais envolvidos e à escassez de dados ambientais disponíveis.

No trabalho de BLUNDEN & BAHAJ (2006) foi utilizada uma metodologia baseada no modelo numérico Télémac-2D para avaliação de Portland Bill (Reino Unido). BROOKS (2006) utilizou o modelo Mecca (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) para a avaliação nas baías Passamaquoddy-Cobscook (fronteira Canadá-EUA). BRYDEN *et al.* (2006) utilizou um modelo desenvolvido exclusivamente para avaliação da energia das correntes em Yell South.

CARBALLO *et al.* (2009) avaliaram o potencial na Ría de Muras (noroeste de Espanha), utilizando o modelo Delft3D-Flow e validando com dados coletados *in situ* mediante o uso de um ADCP. Foram produzidos mapas de densidade energética a partir dos resultados do modelo para instantes de meia-enchente e meia-vazante (Figura 13).

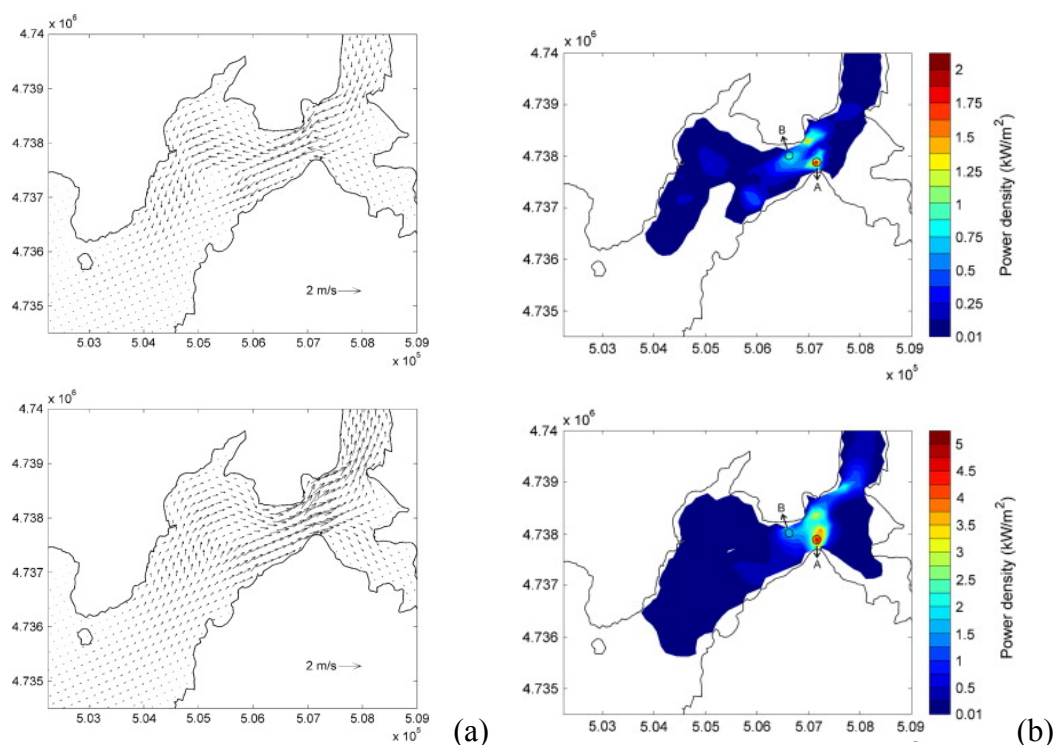


Figura 13: Mapas de correntes de maré (a) e densidade energética (b) obtidos via modelagem hidrodinâmica na ría de Muras (Espanha) (CARBALLO *et al.*, 2009)

MENDONÇA & TEIXEIRA (2007) e REBORDÃO (2008) estudaram os estuários do rio Tejo e rio Lima (Portugal), respectivamente, através da modelagem com o ADCIRC. FISSEL *et al.* (2008) apresentam uma metodologia baseada em coleta de dados de corrente *in situ* por perfilamento com ADCP associada a modelagem numérica com o COCIRM para avaliação do potencial da energia das correntes nas águas interiores ao largo da British Columbia (Canadá).

A mecânica de um escoamento ambiental é regida pelos princípios da conservação de massa e da quantidade de movimento. Esses princípios são traduzidos por equações matemáticas e aplicados a parcelas de água e substâncias presentes no corpo d'água, os quais dependem da escala de interesse. No processo de modelagem matemática, um domínio de modelagem é selecionado para reproduzir a região de interesse, subdividido em pontos discretos onde são resolvidas numericamente as equações governantes.

ROSMAN (1997) classifica os modelos matemáticos em relação ao espaço em pontual ou 0-D; unidimensional ou 1-D; bidimensional ou 2-D subdivididos em bidimensional na horizontal (2DH) de aplicação em estuários verticalmente homogêneos e bidimensional na vertical (2DV) para aplicações em estuários estratificados; e tridimensional ou 3-D, podendo ser tridimensional geral (3Dg), o qual inclui todas as equações para aplicação geral e tridimensional simples (3D), que não inclui gradientes de salinidade para corpos de água de densidade homogênea.

Os modelos tridimensionais são mais desejados para avaliar a instalação de conversores de correntes e estimar o potencial ao longo da coluna d'água. Alguns modelos empregam o artifício numérico de resolver a elevação do nível d'água do domínio bidimensional e, então, os campos de velocidade, que pode ser escolhido 2DH ou 3D. Este é o caso do SisBaHia, o qual possui o módulo hidrodinâmico tipo FIST (em inglês, filtrado no espaço e no tempo).

Em modelos hidrodinâmicos de aplicação em águas rasas e costeiras, a discretização espacial é otimizada através da transformação sigma, na qual a dimensão dos elementos acompanham a diminuição da profundidade. Conhecidos também como “seguidores-de-terreno”, esta discretização é adequada para reproduzir interações com a camada limite de fundo, no qual este efeito se torna preponderante nas topografias mais rasas. Dentre os modelos que possuem esta transformação de coordenadas sigma estão o POM (Princeton Ocean Model) e o SisBaHia.

Nos modelos hidrodinâmicos aplicados em áreas costeiras, as fronteiras abertas representam os limites do domínio de modelagem e não um limite físico como o que acontece

com as fronteiras de terra. Portanto, constitui-se em uma fase imprescindível a reprodução no modelo dos fenômenos que acontecem externamente ao domínio e, por sua vez, a interação dos fenômenos que acontecem internamente e se propagam para fora do domínio de modelagem.

Por esse motivo, ao longo da fronteira aberta, devem ser prescritas informações de elevação da superfície livre, velocidade vetorial do escoamento etc., que reproduzam, mesmo que artificialmente, as condições do escoamento verificadas no exterior do domínio de modelagem. Existem dois tipos de fronteiras abertas: de influxo e de efluxo. As condições de contorno devem ser prescritas nos elementos da fronteira aberta tanto no modo interno como externo, como fechamento das equações governantes.

Dois conceitos devem ser diferenciados, as condições de contorno e a sua implementação no modelo. Tanto a escolha dessas condições, assim como a estratégia de implementação, devem ser orientadas de modo a serem compatíveis com a física dominante da região em estudo. As condições de contorno devem garantir que os fenômenos gerados dentro do domínio do modelo passem pela fronteira sem consideráveis distorções e que aqueles gerados no exterior ingressem sem causar contaminação na solução do modelo (ORLANSKY, 1976).

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste na identificação de locais adequados ao aproveitamento das correntes como recurso energético. Uma vez que o potencial energético das correntes é proporcional ao cubo da velocidade do fluxo hidráulico, para avaliação de um determinado sítio, é imprescindível o conhecimento da variação da velocidade, que está relacionada à viabilidade do aproveitamento. Diferentemente dos métodos descritos no Capítulo 2, nos quais a avaliação dos locais não considerava a dinâmica do escoamento, neste trabalho serão apresentadas técnicas para a obtenção do campo de correntes em um determinado sítio e, desta forma, a estimativa do seu potencial energético. Além da modelagem hidrodinâmica do campo de correntes, a detecção por interferometria SAR será investigada como ferramenta alternativa e/ou complementar no processo de avaliação de locais favoráveis à exploração das correntes.

Na fase preliminar da avaliação do recurso energético das correntes, algumas abordagens podem ser realizadas para estimativa do mapa de densidade energética em um determinado sítio: a modelagem hidrodinâmica, medições locais, radares náuticos e a interferometria *along-track* SAR aerotransportada ou orbital. A interferometria *along-track* SAR é uma técnica promissora ainda sob investigação, que consiste na determinação das correntes superficiais a partir da diferença do sinal de fase entre duas imagens SAR adquiridas por duas antenas quase que simultaneamente na mesma direção da trajetória do satélite. A vantagem da utilização desta técnica de sensoriamento remoto reside no fato de poder se obter o campo de correntes de um determinado local a partir de imagens de satélite, dispensando, em um primeiro momento, campanhas de medição *in situ*, quase sempre associadas a um elevado custo de realização.

A modelagem hidrodinâmica vem sendo utilizada por diversos autores para a avaliação do recurso energético das correntes, conforme citado na Seção 2.3 deste trabalho. Entretanto, este tipo de procedimento de modelagem requer uma série de dados locais para determinação do campo de correntes. Para a determinação do domínio de modelagem, são necessárias cartas náuticas com a batimetria de toda a região de estudo, o que não está disponível para toda a zona costeira do país. A prescrição das forçantes no modelo, seja a maré ou o vento, requer a existência de registros de medição, que no caso de não existirem, demandaram uma campanha de medição local. Nos processos de calibração e validação do modelo, são utilizadas séries de parâmetros medidos localmente, resultando em forte dependência entre o processo de modelagem e a medição *in situ*.

A partir da escolha de um sítio, o campo de correntes oceânicas pode ser, em um primeiro momento, detectado através da técnica de interferometria SAR e, desta forma, identificar regiões mais energéticas visando a instalação de turbinas de corrente. Para tanto, é necessário que se disponha de um par de imagens SAR interferométricas, as quais devidamente processadas permitam a identificação do campo de correntes com um suficiente grau de precisão. As condições de imageamento SAR sobre as zonas estuarinas e oceânicas são determinados primeiramente, pelas características do sistema SAR imageador, como também, a partir das condições ambientais, a exemplo de ventos, ondas e correntes presentes no momento do imageamento. Conforme ROMEISER *et al.* (2002), os sistemas sensores SAR embarcados em satélites não tem priorizado o imageamento oceânico, não satisfazendo a combinação dos parâmetros requeridos para esta aplicação.

Por outro lado, a modelagem hidrodinâmica pode contribuir em várias etapas da avaliação de locais para exploração da energia das correntes.

Na Figura 14 é apresentado um fluxograma descrevendo as duas abordagens propostas nesta metodologia de identificação de locais favoráveis a exploração das correntes. Os quadros em azul representam o processo de modelagem hidrodinâmica, o qual se inicia com a entrada de dados para condições de contorno e iniciais, obtidos no sítio sob investigação, passa pelo processo de modelagem propriamente dito, calibração e validação. Ao longo destas etapas, é necessária a contribuição dos dados coletados *in situ*. Os quadros em laranja descrevem a técnica de interferometria *along-track* SAR para detecção de campos de corrente superficiais, a qual se baseia na aquisição de um par de imagens SAR *along-track* e, em seguida, é realizada a interferometria entre elas. Como produtos finais da interferometria SAR, um interferograma contendo as diferenças de fase do sinal retroespalhado e, também, imagens de coerência entre o par de imagens originais são obtidos. Finalmente, o interferograma é transformado em velocidades de corrente, devidamente filtrado, processado e corrigido, cujas etapas serão mais bem descritas na seção 3.1.

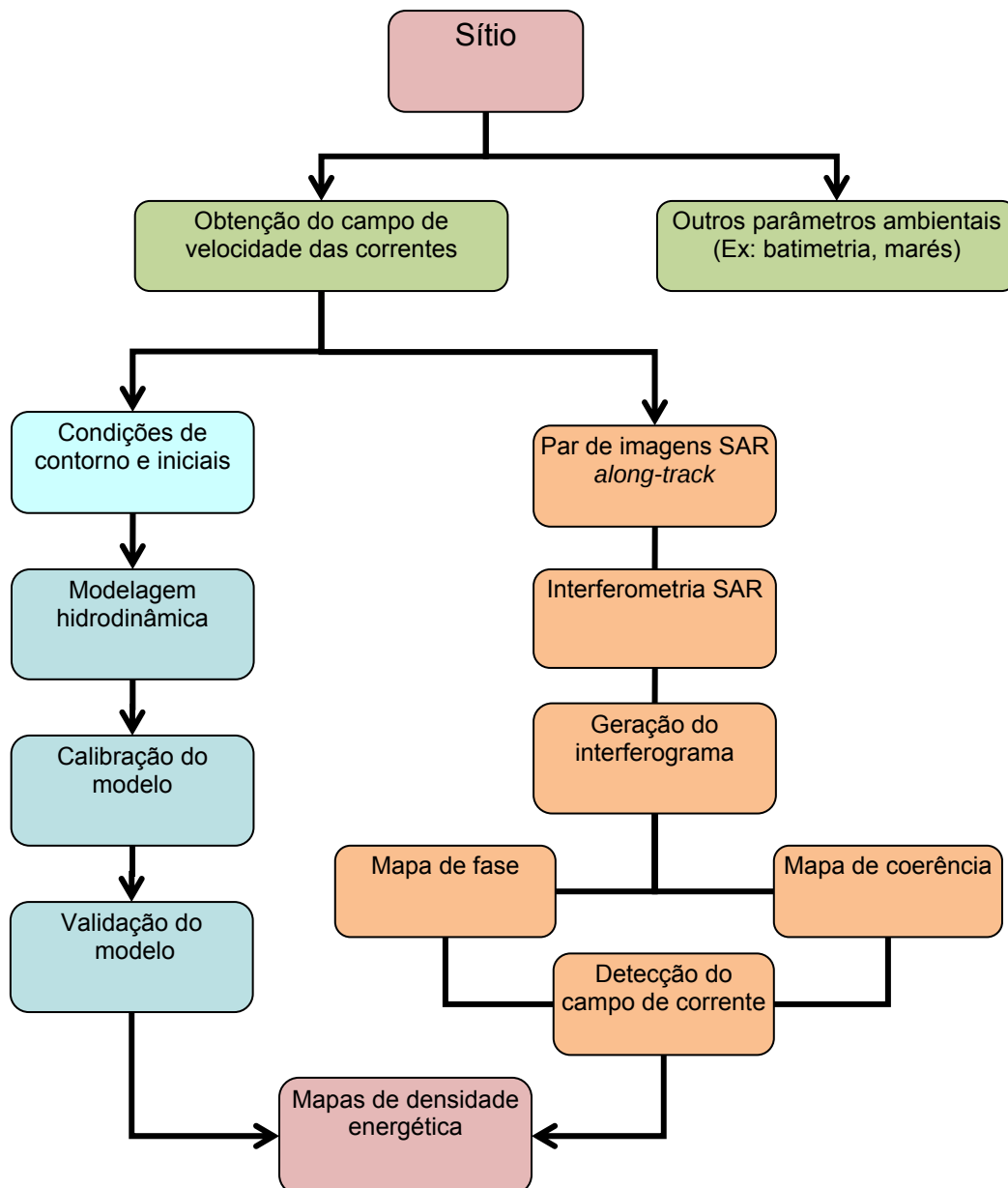


Figura 14: Fluxograma para a avaliação de locais favoráveis ao aproveitamento energético das correntes

3.1 – INTERFEROMETRIA *ALONG-TRACK* SAR COMO FERRAMENTA NA DETECÇÃO DE CORRENTES

Conforme descrito no Capítulo 2, a interferometria *along-track* SAR vem se mostrando como uma técnica promissora para a detecção do campo de correntes de forma quantitativa, i.e., capaz de determinar as velocidades e direções das correntes. O processo da interferometria *along-track* SAR baseia-se, primeiramente, na aquisição de duas imagens por duas antenas dispostas ao longo da trajetória do satélite com um pequeno atraso de tempo.

Após os procedimentos intermediários, um interferograma é criado a partir das diferenças do sinal de fase do par interferométrico. No último estágio do processo, a detecção das correntes é realizada atribuindo a intensidade das correntes a magnitude da diferença de fase indicada no interferograma.

As condições de imageamento SAR dependem simultaneamente do sistema sensor SAR e das condições ambientais do alvo, principalmente, ventos, ondas e correntes, conforme mencionado no início do Capítulo 3. Devido a essas razões, foi utilizado no presente trabalho, um modelo de imageamento SAR capaz de conduzir simulações de imageamento com diferentes cenários de direção e intensidade de vento e correntes e variando os parâmetros do sistema SAR, tais como frequência do radar, polarização, ângulo de incidência, *baseline* ATI entre outros. O modelo empregado foi o M4S (ROMEISER *et al.*, 1997), que se trata de um modelo de superfície compósita que computa o NRCS do oceano e suas variações espaciais. Este modelo é composto por dois módulos, um que computa o espectro de ondas variando espacialmente, a partir da entrada de campos de vento e corrente e o módulo de radar, que calcula quantidades como: NRCS, *offset* e largura de banda Doppler, imagem de intensidade SAR (incluindo artifícios SAR) e fase e coerência da interferometria *along-track* SAR. Através da utilização do M4S, é possível sintetizar imagens SAR associadas a diferentes condições de imageamento e realizar a interferometria *along-track*, obtendo campos de corrente detectados a partir da fase interferométrica.

Ao final das simulações, pode ser avaliada a efetividade em cada situação de imageamento de se utilizar a técnica ATI-SAR nas imagens e obter informações úteis sobre o campo de correntes. No caso desta trabalho, esses cenários de simulação foram comparados com campos de corrente gerados pelo modelo hidrodinâmico SisBaHiA e avaliados quantitativamente através de ferramentas estatísticas. Neste caso, o campo de correntes gerado no SisBaHiA foi assumido como verdade de campo, devido ao fato de não haver disponibilidade de levantamentos *in situ*, especialmente abrangendo toda a região em estudo.

No fluxograma contido na Figura 15, os procedimentos realizados no âmbito deste trabalho estão descritos.

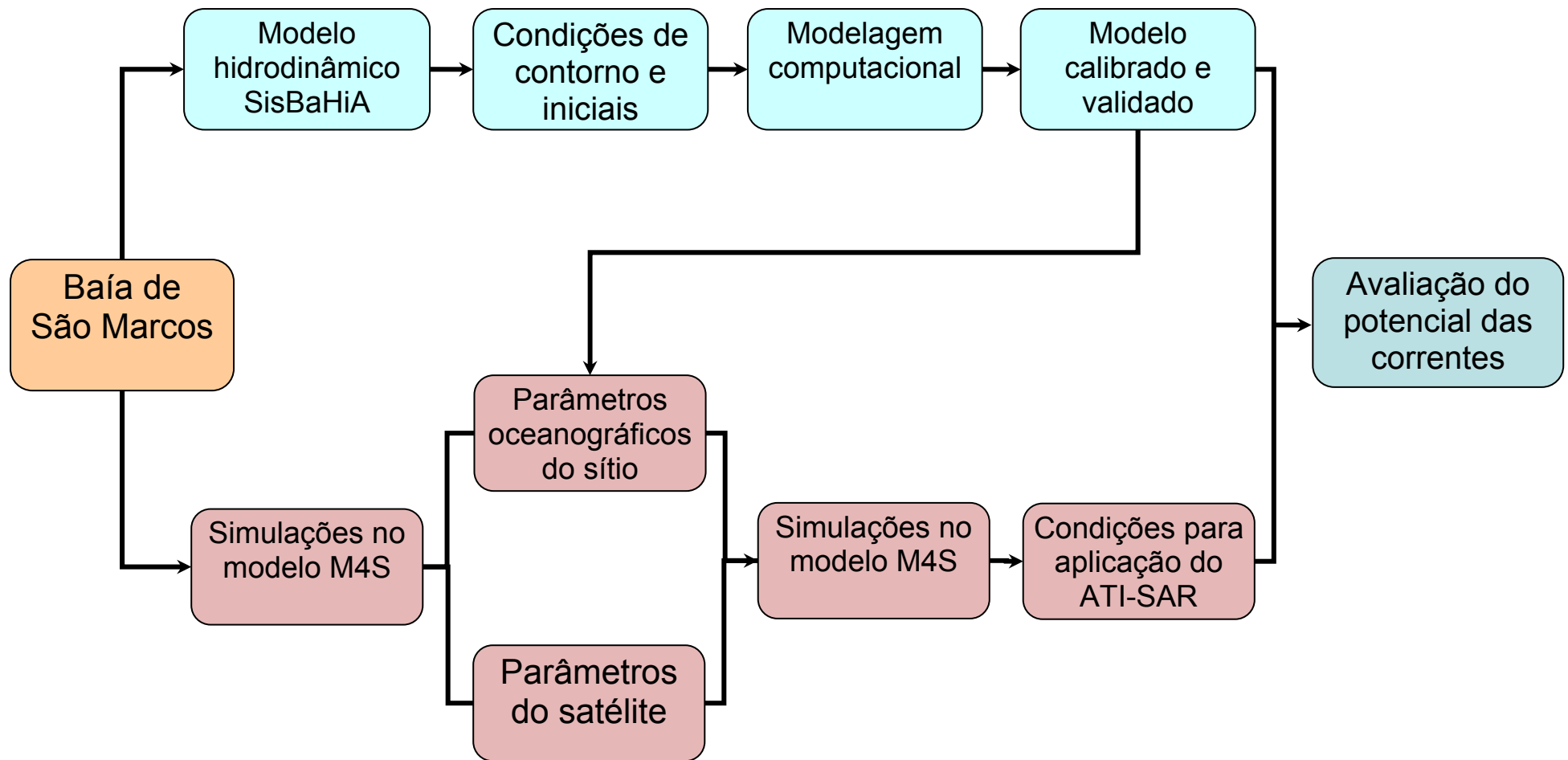


Figura 15: Fluxograma das ferramentas de modelagem hidrodinâmica e interferometria *along-track* SAR utilizadas na tese

O funcionamento do modelo M4S se inicia com a prescrição dos campos de vento e de corrente, representativos do cenário que se deseja reproduzir. O módulo de onda calcula o espectro de ondas variável no espaço, a partir da integração da equação de ação de equilíbrio para cada componente relevante do espectro de onda de superfície bidimensional em cada ponto do grid. A interface oferece diferentes opções de funções fonte, parametrização do espectro de altura de onda de equilíbrio entre outros. Dentre as opções de espectro de altura de onda de equilíbrio, estão aquele proposto em ROMEISER *et al.* (1997) e outro em ELFOUHAILY *et al.* (1997). Os cálculos efetuados neste módulo são independentes do módulo de radar, por isso podem ser efetuados e armazenados para múltiplas simulações de radar considerando este mesmo cenário de ondas-ventos-correntes.

Para o módulo de radar, é necessário que se defina um conjunto de parâmetros do sistema SAR imageador, tais como frequência e polarização do radar, ângulo de incidência, velocidade e altitude da plataforma, *baseline* ATI e ruído equivalente. A partir destas informações, o módulo de radar lê o espectro de ondas resultado do primeiro módulo e computa matrizes de:

- NRCS, obtido de um modelo simples de espalhamento Bragg e, também, do modelo completo de superfície compósita;
- Espectro Doppler;
- Imagens de intensidade SAR, valores esperados e realizações individuais (ou seja, incluindo artifícios introduzidos pelo mecanismo SAR, tais como deslocamento azimutal, embaçamento e *velocity bunching*);
- Imagens de diferença de fase interferométrica SAR.

Os resultados são armazenados em arquivos binários ou ASCII e podem ser visualizados por outros softwares específicos, a exemplo do IDL ou Matlab, que foi utilizado nesta tese.

Um resumo das equações fundamentais e do desenvolvimento que serviram como subsídio para a elaboração do pacote M4S será apresentado a seguir.

Os radares imageadores contêm o maior número de informações sobre parâmetros oceânicos, configurando-se como os sensores mais utilizados para a detecção de movimentos na superfície do mar (ALPERS *et al.*, 1981; KIM *et al.*, 2008). Estas informações oceânicas contidas no sinal retroespalhado e retornado ao radar podem ser recuperadas através de modelos de transferência. Uma importante limitação, que deve ser solucionada, acontece quando o sinal do radar decai abaixo do nível de

ruído, inviabilizando a identificação dos parâmetros oceânicos do alvo. Os fundamentos físicos do imageamento oceânico propostos nas décadas de 1970 e 1980, forneceram subsídios para a formulação de modelos numéricos que representassem a transferência de informações oceânicas, tais como ondas de gravidade, correntes superficiais, ondas internas e batimetria, em sinal retroespalhado e registrado pelo radar.

Conforme citado na Seção 2.4, o imageamento oceânico só é possível devido ao espalhamento das ondas eletromagnéticas emitidas pelo radar causado por pequenas ondas oceânicas com comprimento da mesma ordem de grandeza, chamadas de ondas Bragg. Neste sentido, uma faceta oceânica irá causar o espalhamento do sinal de radar em termos da sua seção reta de radar normalizada (NRCS ou σ_0) de acordo com a Equação 30, (ROMEISER *et al.*, 1997).

$$\sigma_0 = 8\pi k_e^4 \cos^4 \theta_0 |b(\theta_0)|^2 [\psi(k_B) + \psi(-k_B)] \quad (30)$$

onde, k_e é o número de onda eletromagnético;

θ_0 é o ângulo de incidência nominal do radar;

k_b é o vetor número de onda Bragg e tem a intensidade igual a

$k_B = 2k_e \sin \theta_0$ e direção φ_B , mesma direção de visada azimutal do radar.

O NRCS é uma medida das propriedades do espalhamento do radar causado pela superfície do mar e representa todas as variações da energia espalhada em função das propriedades da superfície. Por um lado, os coeficientes de espalhamento complexo b sobre a superfície do mar pode ser aproximado segundo as Equações 31 e 32, para as polarizações HH e VV respectivamente.

$$b_{HH} = \frac{\varepsilon}{(\cos \theta_0 + \sqrt{\varepsilon})^2} \quad (31)$$

$$b_{VV} = \frac{\varepsilon^2 (1 + \sin^2 \theta_0)}{(\varepsilon \cos \theta_0 + \sqrt{\varepsilon})^2} \quad (32)$$

onde, ε é a constante dielétrica relativa da água do mar.

Por outro lado, o espalhamento real também dependerá dos parâmetros do radar imageador, como a potência transmitida e características da antena. Por isso, o NRCS deve ser corrigido através da multiplicação do NRCS original por um fator que leve em conta tais características do sensor.

O modelo de superfície compósita para imageamento SAR, desenvolvido pelo professor Roland Romeiser (ROMEISER *et al.*, 1997, ROMEISER & ALPERS, 1997 e ROMEISER & THOMPSON, 2000), baseia-se na combinação de uma versão

simplificada da teoria de interação hidrodinâmica fraca e de um modelo de espalhamento de superfície compósita baseado na teoria de ressonância Bragg, com suas expressões fundamentais expandidas em série de Taylor.

O modelo de espalhamento de superfície compósita considera diferentes mecanismos de modulação para determinar o valor do NRCS de uma faceta oceânica: a modulação puramente geométrica, a modulação de inclinação e a modulação hidrodinâmica. Adicionalmente, o NRCS realístico de uma faceta oceânica deve levar em consideração as declividades paralela e normal desta faceta em relação à superfície oceânica e, portanto, este pode ser calculado através da expansão do NRCS local até os termos de segunda ordem das inclinações de superfície e, posteriormente efetuar a promediação sobre toda a área iluminado no espaço e no tempo. Após o processo de promediação apenas os termos de zero e de segunda ordem permanecem, conforme indicado na Equação 33.

$$\langle \sigma \rangle = \sigma^{(0)} + \langle \sigma^{pp} \rangle + \langle \sigma^{nn} \rangle + \langle \sigma^{pn} \rangle \quad (33)$$

onde, $\langle \sigma \rangle$ é o valor esperado do NRCS;

$\sigma^{(0)}$ é o termo de zero ordem;

pp, nn e pn são as contribuições de segunda ordem relativas à inclinação de superfície paralelas, normais e correlação entre paralela e normal respectivamente.

Cada termo da Equação 31 pode ser decomposto em seis componentes oriundas das combinações dos três mecanismos de modulação, descrito na Equação 34.

$$\langle \sigma^j \rangle = \langle \sigma_{gg}^j \rangle + \langle \sigma_{tt}^j \rangle + \langle \sigma_{hh}^j \rangle + \langle \sigma_{gt}^j \rangle + \langle \sigma_{gh}^j \rangle + \langle \sigma_{th}^j \rangle \quad (34)$$

onde, j = pp, nn ou pn

g se refere à modulação geométrica

t se refere à modulação de inclinação (*tilt*)

h se refere à modulação hidrodinâmica.

Ao longo do desenvolvimento matemático destas expressões, muitos dos termos que representam a modulação geométrica podem ser negligenciados.

Neste modelo, a modulação hidrodinâmica das ondas Bragg causada por todas as ondas longas oceânicas, diferentemente de outros modelos com abordagem empírica propostos por outros autores, conta com expressões analíticas desenvolvidas a partir de derivadas da transformada de Fourier do espectro de altura de onda. Essas expressões numéricas podem ser encontradas em ROMEISER *et al.* (1997), fruto do

desenvolvimento das Equações 33 e 34 e apoiada em parametrizações constantes ao longo do texto.

Em seguida, os aspectos hidrodinâmicos do mecanismo de imageamento relacionados à modulação causada pelas correntes superficiais e as interações onda-corrente foram abordados através de parametrizações baseado em teorias, a exemplo da teoria de interação hidrodinâmica fraca. Embora que os efeitos das correntes superficiais sejam bem explicados por complexos modelos de circulação tridimensionais, algumas simplificações foram realizadas para inserção neste modelo, como o alinhamento da direção das ondulações de areia no fundo com a direção predominante das correntes, escoamento laminar e ausência de gradientes verticais de velocidade de corrente, conduzindo a um problema praticamente unidimensional e quase-estacionário. Desta forma, utiliza-se uma versão simplificada da Equação da Continuidade, na qual o produto da velocidade unidimensional da corrente pela profundidade é constante (Equação 35).

$$U(x)D(x) = cte \quad (35)$$

As pequenas flutuações do fundo marinho devido à formação de ondas de areia são negligenciadas no cálculo da profundidade D e, tornando o valor da corrente U inalterado.

A interação onda-corrente está baseada na teoria de interação hidrodinâmica fraca, proposta por LONGUET-HIGGINS & STEWART (1964); WHITHAM (1965) e BRETHERTON (1970) (*apud* ROMEISER & ALPERS, 1997). Segundo esta teoria, a taxa de variação temporal da energia de um pacote de ondas que atravessa uma corrente superficial de variação lenta pode ser descrita pela equação de equilíbrio de ação, apresentada na Equação 36.

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{dk}{dt} \frac{\partial}{\partial k} \right) N = Q(k, x, t) \quad (36)$$

onde, N é a densidade espectral de ação do pacote de ondas;

Q é uma função fonte;

x e k são a posição e o número de onda do pacote de ondas.

Do qual a taxa de variação da posição e número de onda do pacote de ondas pode ser determinada por equações de radiação, que dependem, por sua vez, da frequência aparente ω deste pacote, causada pelo desvio Doppler induzido pela

velocidade da corrente U , de forma que $\omega = \omega_0 + kU(x)$. As Equações 37 e 38 reproduzem as equações de radiação utilizadas para descrever o problema.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk} = c_g(k) + U(x) \quad (37)$$

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{d\omega}{dx} = -\left(k \frac{\partial}{\partial x}\right)U \quad (38)$$

onde, $c_g = \partial\omega_0 / \partial k$ significa a velocidade de grupo do pacote de ondas.

Desta forma, o espectro de ação N , o espectro de energia E e o espectro de altura de onda ψ pode ser relacionado através da Equação 39.

$$N(k, x, t) = \frac{E(k, x, t)}{\omega_0(k)} = \psi(k, x, t) \frac{\rho\omega_0(k)}{k} \quad (39)$$

A introdução do mecanismo de imageamento SAR interferométrico *along-track* baseou-se no princípio que a informação de fase ATI é uma medida do desvio Doppler do sinal retroespalhado, que, por sua vez, está relacionada com a velocidade dos alvos na direção de visada do radar. Pode ser demonstrado que o primeiro momento do espectro Doppler, que é a frequência média Doppler ou *offset* Doppler, corresponde à ponderação da velocidade a partir da linha de visada dos alvos. A Equação 40 mostra que a frequência Doppler do retroespalhamento de radar causado por um alvo em movimento é proporcional à velocidade com que esse alvo se desloca.

$$f_D = -k_e v_r / \pi \quad (40)$$

Introduzindo a função de transferência de modulação linear (MTF), a qual relaciona a interação da faceta da superfície oceânica com o sinal de radar, a Equação 40 pode ser reescrita como:

$$f_{D\pm}(x, t) = f_{D\pm}^{(0)} + \text{Re}\left\{\iint D(\mathbf{k}) k \hat{\zeta}(\mathbf{k}) e^{-i(\mathbf{k}\mathbf{x} - \omega t)} d^2k\right\} \quad (41)$$

onde, D é a MTF Doppler (complexa)

ζ é a elevação de superfície;

$\wedge$ denota a transformada de Fourier

$k = |\mathbf{k}|$ e ω são o número de onda e a frequência angular das ondas oceânicas que modulam a frequência Doppler.

Estabelecendo o raciocínio para uma onda senoidal isolada de amplitude finita ζ_0 , pode ser deduzida a Equação 42 para o cálculo das variações da frequência Doppler ao longo desta onda (ROMEISER & THOMPSON, 2000).

$$f_{D\pm}(x,t) = f_{D\pm}^{(0)} + \text{Re}\left\{\iint D(\mathbf{k})k\hat{\zeta}(\mathbf{k})e^{-i(\mathbf{k}\mathbf{x}-\omega t)}d^2k\right\} \quad (42)$$

A qual combinada com o desenvolvimento das Equações 33 e 34, resulta que as variações do NRCS ao longo desta onda pode ser aproximado em termos da oscilação das frequências e dos números de onda ω , k e 2ω , $2k$, e resulta na Equação 43.

$$\sigma_{\pm}(x,t) = f_{D\pm}^{(0)} + \left(1 + \text{Re}\left\{M_{1\pm}(\mathbf{k})k\zeta_0e^{-i(\mathbf{k}\mathbf{x}-\omega t)} + M_{2\pm}(\mathbf{k})k^2\zeta_0^2e^{-i2(\mathbf{k}\mathbf{x}-\omega t)}\right\}\right) \quad (43)$$

Neste caso da onda senoidal simples, podem ser calculados os primeiros momentos e segundos momentos da distribuição das frequências Doppler através das Equações 44 (a) e (b).

$$\langle f_{D\pm} \rangle_{\sigma} = \frac{\langle f_{D\pm}\sigma_{\pm} \rangle}{\langle \sigma_{\pm} \rangle} = f_{D\pm}^{(0)} + \frac{1}{2}\text{Re}\{D^*M_{1\pm}\}k^2\zeta_0^*\zeta_0 \quad (44a)$$

$$\langle f_{D\pm}^2 \rangle_{\sigma} = \frac{\langle f_{D\pm}^2\sigma_{\pm} \rangle}{\langle \sigma_{\pm} \rangle} = (f_{D\pm}^{(0)})^2 + f_{D\pm}^{(0)}\text{Re}\{D^*M_{1\pm}\}k^2\zeta_0^*\zeta_0 + O(\zeta_0^4) \quad (44b)$$

O primeiro nível de processamento convencional de imagens SAR transforma o dado bruto em imagem complexa e, nos níveis posteriores, a fase do sinal retroespalhado é perdida. Esta fase não apresenta informação útil, pois resulta de contribuições aleatórias de diferentes fases espalhadas pelo alvo. Entretanto, é possível determinar a evolução da fase, desde que dentro de um intervalo de tempo antes da decorrelação. O valor esperado desta mudança de fase em um atraso de tempo τ é igual a fase de autocorrelação entre o campo retroespalhado e o intervalo de tempo $R_P(\tau)$, o qual se relaciona com o espectro Doppler, conforme Equação 45.

$$R_P(\tau) = \frac{1}{\langle \sigma \rangle} \int e^{i2\pi f_D \tau} S_P(f_D) df_D \quad (45)$$

onde, $S_P(f_D)$ é o espectro Doppler associado ao pixel.

O fator de conversão que relaciona as fases ATI com as velocidades ATI pode ser obtido combinando as Equações 40 e 45, o que resulta na Equação 46.

$$\frac{\Delta v_{ATI}}{\Delta \phi} = \frac{c}{720 f_e \sin \theta} \frac{1}{\tau} \left[\frac{ms^{-1}}{(^{\circ})} \right] \quad (46)$$

O desenvolvimento do pacote M4S iniciou-se em 1991, a partir de um modelo que combinava uma versão simplificada unidimensional da teoria hidrodinâmica fraca com o modelo de espalhamento de superfície compósita, descritos sucintamente nesta

seção. O modelo de espalhamento de superfície compósita é baseado na expansão dos termos de modulação em série de Taylor e na teoria de espalhamento Bragg. Com base neste modelo, foi possível constatar que a modulação hidrodinâmica não diminui com o aumento da frequência do radar, pelo contrário, as contribuições de segunda ordem das longas ondas oceânicas no valor NRCS juntamente com sua modulação hidrodinâmica pode levar a assinatura de radar semelhante para altas e baixas frequências, por exemplo, tanto para a bandas L (1 GHz) como X (10 GHz).

Nos anos seguintes, o modelo foi evoluindo sucessivamente, em 1993, através da introdução das contribuições paralelas e perpendiculares à direção de visada do radar, tornando o modelo bidimensional e de melhorias matemáticas; em 1994 e 95, inclusão do cálculo do espectro Doppler e das diferenças de fase ATI-SAR; redução dos tempos computacionais em mais de uma ordem de magnitude; capacidade de simulação bidimensional completa, no qual a modulação do espectro de ondas de superfície bidimensionais causadas por correntes de superfície bidimensionais em imagens de radar sintetizadas também bidimensionais. Outras melhorias vieram a partir de 1996, através da capacidade em prescrever na entrada do modelo campos de vento variáveis no espaço, da melhoria da formulação das funções fonte para ventos de baixa velocidade e do mecanismo de rugosidade de superfície causado pela tensão do vento.

3.2 – TÉCNICAS DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A circulação hidrodinâmica em estuários e em regiões costeiras é descrita através das equações da mecânica dos fluidos, adaptada para os escoamentos ambientais. Para determinação do movimento da água e possíveis transportes de substâncias no seu fluxo, são empregados os princípios de conservação de massa e da quantidade de movimento. As equações matemáticas que descrevem tais princípios são geralmente equações diferenciais parciais no tempo e no espaço e, por isso, apresentam complexidades para calcular analiticamente suas soluções. Recentemente, com o advento de computadores mais eficientes, um grande impulso foi dado aos modelos numéricos para resolver tais equações matemáticas.

No processo de modelagem numérica da circulação hidrodinâmica de um corpo d'água natural, as equações matemáticas são escritas de forma discreta, com o objetivo de serem resolvidas por métodos de cálculo, a exemplo das diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos. De maneira geral, as dimensões espaciais são discretizadas, utilizando, por exemplo, uma malha de elementos finitos, assim como o tempo, através de diferenças finitas. Os fenômenos que ocorrem abaixo da escala do tempo e/ou espaço são reproduzidos valendo-se de artifícios matemáticos, como a decomposição em fluxos resolvíveis e não-resolvíveis e empregando a análise de Fourier para decompor um registro complexo em um somatório de parcelas mais simples. Neste sentido, as técnicas de filtragem dos parâmetros hidrodinâmicos são empregadas para a modelação daquelas parcelas consideradas não-resolvíveis.

A reprodução de um escoamento ambiental através de modelos numéricos hidrodinâmicos deve seguir algumas etapas obrigatórias, que incluem a simples observação e medição dos fenômenos envolvidos, formulação de um modelo conceitual, enfocando os fenômenos de interesse e negligenciando os demais, modelação matemática, implementação numérico-computacional e, por fim, processos de calibração e validação do modelo. Na Figura 3, um fluxograma adaptado de ROSMAN (2011) descreve estas etapas.

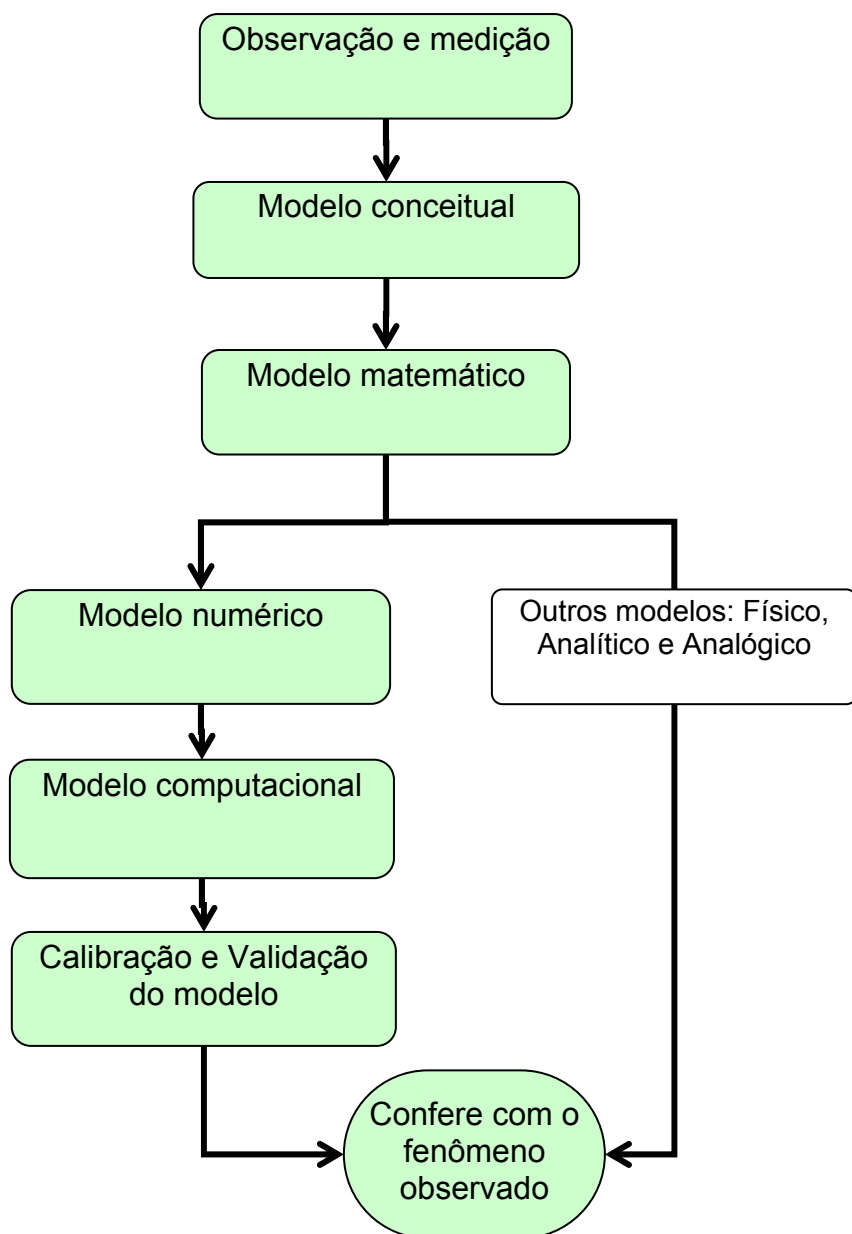


Figura 16: Fluxograma das etapas do processo de modelagem numérica computacional
(Fonte: Adaptado de ROSMAN, 2011)

Uma vez definido os fenômenos a serem investigados no processo de modelagem, pode-se adotar um modelo matemático capaz de descrevê-los com razoável precisão. De acordo com o objetivo da investigação e, também, das características do corpo d'água, algumas simplificações costumam ser feitas, por exemplo, em relação às dimensões espaço-temporais consideradas, propagação de onda em águas rasas, grau de mistura etc. Os modelos matemáticos podem ser classificados em relação às dimensões espaciais e temporais consideradas em: pontual ou 0-D, no qual apenas o tempo é

considerado; unidimensional ou 1-D; bidimensional ou 2-D subdivididos em bidimensional na horizontal (2DH) de aplicação em estuários verticalmente homogêneos, bidimensional na vertical (2DV) para aplicações em estuários estratificados; e tridimensional ou 3-D, podendo ser tridimensional geral (3Dg), o qual inclui todas as equações para aplicação geral e tridimensional simples (3D), que não inclui gradientes de salinidade para corpos de água de densidade homogênea (ROSMAN,1997).

Adicionalmente, pode ser implementado no modelo somente termos barotrópicos, assim como, incluir termos baroclínicos, quando estas condições do estuário não forem negligenciáveis no processo de modelagem. Considerando a propagação da onda de maré em zonas costeiras e em estuários, a aproximação de águas rasas é bastante empregada, uma vez que a razão entre a profundidade local e o comprimento da onda de maré nunca excede a relação 1:20. A discretização espacial e em águas rasas e costeiras pode ser otimizada através da transformação sigma, na qual a dimensão dos elementos acompanha a diminuição da profundidade. Conhecidos também como “seguidores-de-terreno”, esta discretização é adequada para reproduzir interações com a camada limite de fundo, no qual este efeito se torna preponderante nas topografias mais rasas. Dentre os modelos que possuem esta transformação de coordenadas sigma estão, por exemplo, o POM (Princeton Ocean Model) e o SisBaHiA.

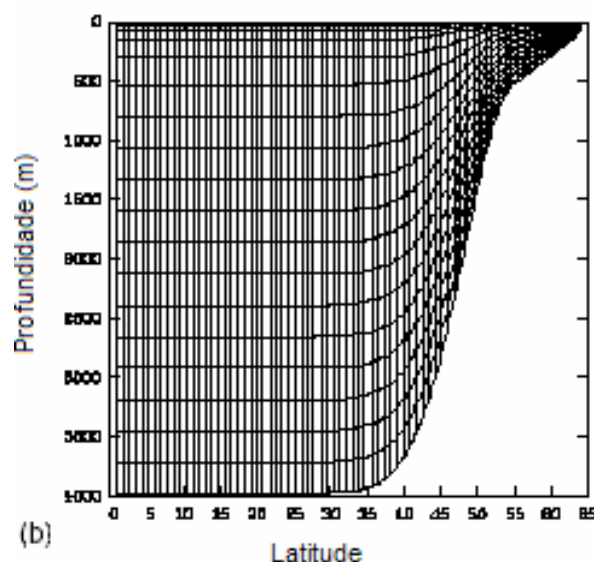


Figura 17: Transformação de coordenada sigma

Equações governantes

A equação da continuidade, a qual representa o princípio de conservação de massa ou volume e a equação do movimento, a qual representa a segunda lei de Newton sobre o movimento. Estas equações da continuidade e do movimento nas direções x, y, z podem ser escritas como apresentadas nas Equações 47, 48, 49 e 50.

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta \cdot v \quad (48)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta \cdot u \quad (49)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{\rho}{\rho_0} g \quad (50)$$

onde, u, v, w são as velocidades nas direções x, y, z , respectivamente;

P é a pressão

ρ, ρ_0 são a massa específica da água;

τ são as tensões cisalhantes;

Φ, θ são parâmetros da aceleração de Coriolis.

Na equação da continuidade, o divergente da velocidade do escoamento é zero, o que significa que o volume das partículas não se altera, ou a massa, no caso de fluidos homogêneos. A equação do movimento possui o primeiro membro representando as acelerações local e advectiva e o segundo membro representando as forças atuantes, isto é, as forças de pressão, de superfície e de campo (gravidade e coriolis).

Algumas aproximações podem ser consideradas para escoamentos em águas rasas, uma vez que, a magnitude dos movimentos horizontais são bem maiores de que a profundidade. Uma delas é a aproximação de Boussinesq, na qual o valor da densidade da água é considerado igual para todos os termos, denominado genericamente de ρ_0 , excetuando o termo de empuxo. No entanto, para corpos de água classificados como não estratificados, o empuxo exerce pouca influência, podendo ser desconsiderado.

Outra aproximação é a hidrostática, a qual considera a pressão dinâmica desprezível no escoamento em águas rasas, prevalecendo apenas os termos de pressão atmosférica e hidrostática. Combinando as duas aproximações descritas acima na equação do movimento e desenvolvendo as integrações, o termo de pressão das Equações 48, 49 e 50 resultam na Equação 51.

$$\frac{1}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial P}{\partial z} dz = - \underbrace{\int_z^\zeta \rho g dz}_{P_{hid}} - P_{din} \therefore P(z) = \underbrace{P(\zeta)}_{P_{atm}} + P_{hid} + P_{din} \quad (51)$$

De acordo com os fenômenos de interesse envolvidos, um modelo matemático em três dimensões espaciais pode sofrer simplificações e adaptações para melhor se ajustar a resolução do problema conjugado a um mínimo custo computacional. Possuindo os sistemas estuarinos as escalas espaciais horizontais do escoamento preponderantes em relação à profundidade, tais sistemas podem ser modelados considerando as três dimensões ou, simplificadaamente, apenas as dimensões horizontais, negligenciando a profundidade.

No caso de modelos bidimensionais em planta ou 2DH, as equações governantes são obtidas através da promediação na direção vertical das equações equivalentes tridimensionais, como indicado na Equação 52.

$$\hat{u}_i(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^\zeta u_i(x, y, z, t) dz \quad (52)$$

onde, u_i é uma variável qualquer

$\hat{u}_i$ é a promediação na vertical desta variável

$H = h(x, y) + \zeta(x, y, t)$ é a altura instantânea da coluna de água local

A equação da continuidade integrada na vertical, i.e., ao longo da profundidade, está apresentada nas Equações 53 e 54 para as direções x e y, respectivamente.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \hat{u}(\zeta + h)}{\partial x} = 0 \quad (53)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \hat{v}(\zeta + h)}{\partial y} = 0 \quad (54)$$

A equação da quantidade de movimento integrada na vertical, i.e., ao longo da profundidade, está apresentada nas Equações 55 e 56, respectivamente, para as direções x e y.

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial t} + \hat{u} \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \frac{1}{H} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H(\hat{\tau}_{xx}^T + \hat{\tau}_{xy}^T)) + \tau_x^S - \tau_x^F \right] + \hat{a}_x \quad (55)$$

$$\frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + \hat{v} \frac{\partial \hat{v}}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} \frac{1}{H} \left[\frac{\partial}{\partial y} (H(\hat{\tau}_{yx}^T + \hat{\tau}_{yy}^T)) + \tau_y^S - \tau_y^F \right] + \hat{a}_y \quad (56)$$

onde, τ_i^S e τ_i^F são respectivamente a tensão na superfície livre (S) e a tensão de atrito no fundo (F).

A formulação para a tensão na superfície livre é dada pela Equação 57.

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D U_{10}^2 \cos \varphi_i \quad (57)$$

onde, ρ_{ar} é a massa específica do ar (1,2 kg/m³);

C_D é o coeficiente de arrasto do vento;

U_{10} é a velocidade do vento medida a 10 metros da superfície e

φ é a direção entre o vento e a direção i .

O coeficiente de arrasto do vento foi retirado da formulação proposta por WU (1982, *apud* ROSMAN, 2011), conforme descrito na Equação 58.

$$C_D = (0,80 + 0,065 U_{10}) \times 10^{-3}; U_{10} \text{ em m/s} \quad (58)$$

A formulação para tensão no fundo τ_i^F é baseada em um coeficiente de atenuação da velocidade de escoamento β , devido à presença do fundo, conforme descrito na Equação 59.

$$\tau_i^F = \rho_o \beta U_i, [i = 1,2] \quad (59)$$

O coeficiente beta é calculado a partir das Equações 60 e 61, formuladas para os modelos 3D e 2DH respectivamente.

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (60)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \quad (61)$$

onde, C_h representa o coeficiente de Chézy e

u_* é a velocidade de atrito no fundo.

O coeficiente de Chézy, bastante utilizado em aplicações na hidráulica de canais e tubulações, relaciona a coluna d'água de um escoamento com a amplitude da rugosidade das paredes onde acontece o escoamento. A relação que define o coeficiente de Chézy foi obtida em laboratório e trata-se de uma equação semi-empírica, reproduzida na Equação 62.

$$C_h = 18 \log_{10} \left(\frac{12H}{2\varepsilon} \right) = 18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (62)$$

onde, ε é a amplitude da rugosidade de fundo;

H é o tirante hidráulico.

Esquemas numéricos

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA pertence a linhagem de modelos FIST, acrônimo para *Filtered In Space and Time*, o que significa dizer que as variáveis a serem resolvidas são filtradas no espaço e no tempo. Esta família de modelos FIST é similar aquela empregada em modelos LES (*Large Eddy Simulation*), nos quais as turbulências de grande escala podem ser resolvidas explicitamente considerando a geometria (ou passo de tempo) do modelo, enquanto que turbulências de sub-escala são resolvidas implicitamente. Com este objetivo, é realizada a separação dos fenômenos passíveis de serem resolvidos na escala do modelo e daqueles que não podem ser resolvidos naquela escala, utilizando uma função filtro em convolução com a variável em questão. Este processo será explicado com mais detalhes nos parágrafos seguintes.

Para a simulação tridimensional, o modelo FIST3D utiliza duas etapas para o cálculo do campo de velocidades tridimensional: calcula os valores da elevação da superfície livre em modelo 2DH e, a partir destes, calcula o campo de velocidades. Este campo de velocidades pode ser bi ou tridimensional dependendo dos dados de entrada. Desta forma, existem duas opções para a modelação 3D: o modelo totalmente numérico acoplado a um modelo 2DH e um modelo analítico-numérico, mais eficiente computacionalmente, porém computa os perfis de velocidade em função das velocidades promediadas na vertical e outros parâmetros provenientes do modelo 2DH.

Tensões turbulentas

Conforme dito no início desta seção, existem fenômenos que podem ou não ser resolvidos, considerando a formulação do modelo, como por exemplo, as escalas espaciais e temporais adotadas. No processo de implementação do modelo, as parcelas da variável que não podem ser resolvidas são chamadas de tensões turbulentas e devem ser abordadas de forma diferenciada em relação àquelas resolvíveis. No módulo hidrodinâmico do SisBaHiA, as variáveis resolvíveis são separadas da variável completa através de técnicas de filtragem. A separação se dá através da integral de convolução entre a variável completa $\tilde{u}(t)$ e uma função de filtragem $G(t-t')$, conforme representado na Equação 63.

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}(t)G(t-t')dt' = \overline{\tilde{u}}(t) \quad (63)$$

onde, $u = \overline{\tilde{u}}$ é a parte resolvível ou filtrada da variável e a barra acima da variável completa $\tilde{u}(t)$ denota que a variável foi filtrada e submetida à integral de convolução.

Em ROSMAN (1987), existe uma revisão concisa sobre funções de filtragem adequadas para problemas deste tipo. Dentre os critérios de escolha da função de filtragem, a média e variância devem ser finitas e devem satisfazer a preservação da constante, isto é, $\int_{-\infty}^{\infty} G(\chi')d\chi'=1$. Também é defendido o emprego das funções gaussianas devido as suas vantagens (ROSMAN, 1987).

A abordagem das parcelas que não podem ser resolvidas frente aquelas resolvíveis de uma dada variável u é realizado conforme sugerido nas Equações 64 (a) e (b). Primeiramente, é somada e subtraída a parcela resolvível u e, em seguida, rearranjada as parcelas resolvíveis e não-resolvíveis.

$$\overline{\tilde{u}} = \overline{\tilde{u}} + u - u \quad (64 a)$$

$$\overline{\tilde{u}} = u + (\overline{\tilde{u}} - u) \quad (64 b)$$

No qual, a parcela $(\overline{\tilde{u}} - u)$ representa as tensões turbulentas τ_{ij} e são modelados em termos das variáveis resolvíveis, utilizando a função de filtragem gaussiana, e expandida em série os termos de filtragem. O desenvolvimento completo da implementação das tensões turbulentas no SisBaHiA pode ser encontrada em ROSMAN (2011). Por fim, o modelo de turbulência adotado no módulo hidrodinâmico está transcrito na Equação 65.

$$\frac{\hat{\tau}_{ij}^T}{\rho_o} = (K_{ij} + K_v) \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\Lambda_k^2}{24} \left(\left| \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_k} \right| \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_k} + \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_k} \left| \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_k} \right| \right) \quad (65)$$

com $i,j=1,2$; $k=1,2,4$

onde, $\Lambda_k = \alpha_k x_k$ são escalas da largura do filtro local na dimensão x_k , que não são mais homogêneas, porém consideram as variações de escala na malha numérica. O valor de α_k calibra a dissipação nos termos de filtragem.

Condições de contorno

As condições iniciais e de contorno são imprescindíveis para a resolução das equações diferenciais parciais que compõem o modelo matemático do escoamento hidrodinâmico de corpos d'água. Neste tipo de modelo hidrodinâmico, as condições de contorno de fronteira aberta representam os limites do domínio de modelagem e não um limite físico como o que acontece com as fronteiras de terra. Portanto, constitui-se em uma fase imprescindível a reprodução no modelo dos fenômenos que acontecem externamente ao domínio e, por sua vez, a interação dos fenômenos que acontecem internamente e se propagam para fora do domínio de modelagem.

Por esse motivo, ao longo da fronteira aberta, devem ser prescritas informações de elevação da superfície livre, velocidade vetorial do escoamento etc, que reproduzam, mesmo que artificialmente, as condições do escoamento verificadas no exterior do domínio de modelagem. Basicamente, existem dois tipos de fronteiras abertas: de influxo e de efluxo. As condições de contorno devem ser prescritas nos elementos da fronteira aberta tanto no modo interno como externo, como fechamento das equações governantes.

Dois conceitos devem ser diferenciados, as condições de contorno e a sua implementação no modelo. Tanto a escolha dessas condições, assim como a estratégia de implementação, devem ser orientadas de modo a serem compatíveis com a física dominante da região em estudo. As condições de contorno devem garantir que os fenômenos gerados dentro do domínio do modelo passem pela fronteira sem consideráveis distorções e que aqueles gerados no exterior ingressem sem causar contaminação na solução do modelo (ORLANSY, 1976).

Fronteira Aberta

No modelo hidrodinâmico, os termos da equação do movimento são escolhidos entre serem usados ou não e quais estratégias numéricas serão realizadas. Adicionalmente, as condições de contorno, incluindo ângulos de influxo e efluxo são definidos neste estágio. Esta é a parte mais importante do processo de modelagem, especialmente para regiões costeiras, na qual é necessário que o analista possua um conhecimento prévio da região a ser modelada.

No modelo SisBaHiA, as condições de contorno abertas podem ser escolhidas entre três opções, na primeira, tanto o influxo como o efluxo são definidos automaticamente pelo modelo; na segunda, somente o influxo é definido pelo analista, enquanto o efluxo é calculado automaticamente; na terceira, ambos o influxo e o efluxo são definidos pelo analista.

Fronteira de terra

Nos contornos de fronteira de terra são prescritas a velocidade (U) ou o fluxo (Q) e o ângulo formado entre estes vetores e o nó da fronteira, que podem ser fornecidos pelo analista ou calculados internamente pelo modelo. Também, estes nós podem estar representando fronteiras impermeáveis, no caso de margens de rios, ou permeáveis, quando existir contribuições de afluentes ou áreas de inundação. A combinação entre as condições de fornecimento da velocidade e ângulo, se implicitamente ou explicitamente, a condição de fronteira permeável ou impermeável, no caso permeável se o talude é fornecido e a geometria dos nós, côncavas e convexas, geraram 10 tipos diferentes de nós de fronteira de terra no SisBaHiA.

Estabilidade numérica

A estabilidade numérica do modelo pode ser avaliada através de uma razão entre o passo de tempo Δt adotado, as dimensões espaciais dos elementos da malha numérica Δx e Δy e as velocidades envolvidas no fenômeno V e $\sqrt{gH}$. Geralmente, a velocidade de circulação das correntes V é muito inferior à velocidade de propagação da onda de maré $\sqrt{gH}$, podendo ser desprezada no cálculo do número de Courant, constante na Equação 66.

$$Cr = \Delta t \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} \left(|\vec{V}| + \sqrt{gH} \right) \quad (66)$$

Batimetria e rugosidade, uso destas como parâmetros de calibração

Geralmente, as condições de contorno na fronteira aberta são as variações na superfície livre, que por sua vez são calculadas internamente por um módulo de análise harmônica das marés. Com o objetivo de melhor reproduzir as elevações de maré astronômicas em determinada localidade, é necessária a inclusão de uma quantidade suficiente de componentes harmônicas de maré. Estas componentes podem ser obtidas em catálogos de estações maregráficas publicadas pela Marinha ou outra instituição interessada neste tipo de dados. Alguns requisitos são importantes para escolher qual estação maregráfica pode servir de referência para empregar as constantes harmônicas como condições de contorno na fronteira aberta do modelo: a estação deve estar localizada o mais próximo da fronteira aberta, conter um número razoável de constantes harmônicas que possam definir a maré com precisão e não estar localizada em áreas muito rasas, o que provocaria a deformação da onda de maré.

FOREMAN (1977) enumera os tempos mínimos de monitoramento da maré para a inclusão de mais componentes harmônicos. Em virtude da proximidade entre as frequências de certas componentes harmônicas, só é possível aumentar a resolução em frequência e, assim, distingui-las entre si durante a análise harmônica, caso exista uma série temporal de duração maior do que o inverso da diferença da frequência que as separam. Na Figura 18, está reproduzido o espectro das constantes harmônicas semidiurnas e o tempo mínimo de duração do registro de marés para a sua inclusão na análise harmônica.

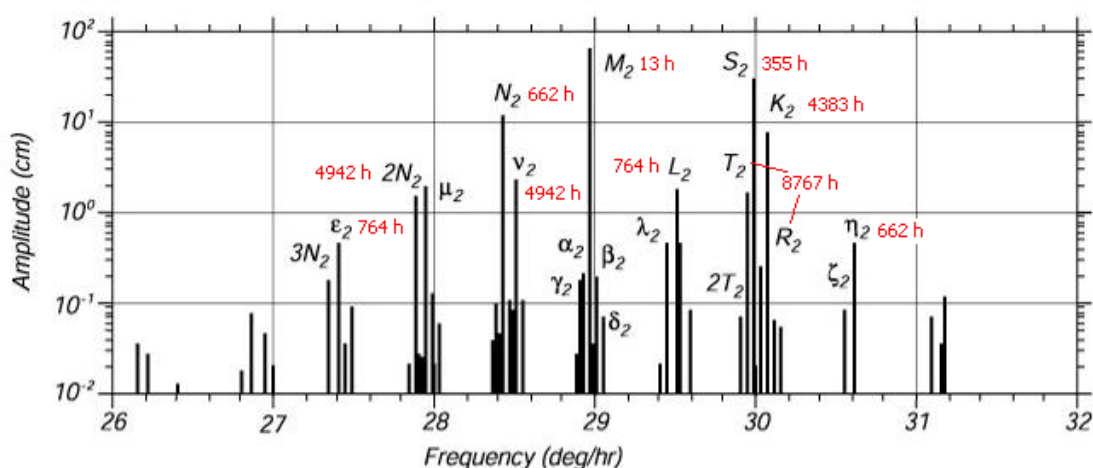


Figura 18: Constantes semidiurnas e tempo mínimo para inclusão na análise harmônica

Devido à extensão da fronteira aberta, faz-se necessário haver uma diferença de fase da maré entre os nós que compõe a fronteira. Uma maneira de se obter as diferentes

fases e amplitudes da maré é através da utilização de modelo global das marés, que fornece tais valores para cada nó da malha, por exemplo, a cada 1 grau no modelo de SCHWIDERSKI (1980). Outra forma se dá pela utilização da fase de outras estações maregráficas externas ao domínio de modelagem e, através, de uma razão entre as distâncias que as separam e aquela entre os nós limítrofes da fronteira aberta, a defasagem entre os nós é distribuída.

Uma vez definidas as condições de contorno na fronteira aberta, devem ser especificados os valores de profundidade e rugosidade de fundo para cada nó da malha numérica. Enquanto os valores de profundidade podem ser obtidos de cartas náuticas e levantamentos batimétricos locais, a rugosidade equivalente de fundo é atribuída baseada na composição do material de fundo, traduzida pelo coeficiente de Chézy, conforme Equação 16. A Tabela 5 lista a rugosidade equivalente de fundo em relação à composição do leito.

Tabela 5: Valores de rugosidade equivalente de fundo para diferentes materiais
(Fonte: ROSMAN, 2011)

Fundo sedimentar (areia, terra, vasa, etc)	
Fundo com transporte de sedimentos	$0,0070 \text{ m} < \varepsilon < 0,0500 \text{ m}$
Fundo com vegetação	$0,0500 \text{ m} < \varepsilon < 0,1500 \text{ m}$
Fundo com obstáculos	$0,1500 \text{ m} < \varepsilon < 0,4000 \text{ m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0,0003 \text{ m} < \varepsilon < 0,0010 \text{ m}$
Fundo de pedra lisa	$0,0010 \text{ m} < \varepsilon < 0,0030 \text{ m}$
Fundo de asfalto	$0,0030 \text{ m} < \varepsilon < 0,0070 \text{ m}$
Fundo com pedregulhos	$0,0070 \text{ m} < \varepsilon < 0,0150 \text{ m}$
Fundo com seixos rolados	$0,0150 \text{ m} < \varepsilon < 0,0400 \text{ m}$
Fundo com pedras	$0,0400 \text{ m} < \varepsilon < 0,1000 \text{ m}$
Fundo com rochas	$0,1000 \text{ m} < \varepsilon < 0,2000 \text{ m}$
Fundo de concreto	
Fundo de concreto liso	$0,0001 \text{ m} < \varepsilon < 0,0005 \text{ m}$
Fundo de concreto inacabado	$0,0005 \text{ m} < \varepsilon < 0,0030 \text{ m}$
Fundo de concreto antigo	$0,0030 \text{ m} < \varepsilon < 0,0100 \text{ m}$

Em muitos casos, os valores de rugosidade (e/ou viscosidade) além de descreverem uma conformação natural do fundo, podem ser utilizados como artifício para dissipação da energia da propagação da maré em áreas muito rasas, garantindo também a estabilidade numérica do modelo.

Prescrição das constantes de maré, escolha da estação maregráfica, defasagem no contorno aberto

Uma observação importante para definição dos contornos de fronteira aberta esta associado à reprodução correta da entrada da mare no domínio de modelagem. Apesar da escolha das constantes harmônicas de uma estação maregráfica localizada mais externamente ao domínio, é necessário indicar a orientação da entrada da onda de maré e considerar os atrasos de fase em cada no do contorno aberto. No caso de modelos aninhados, os resultados do modelo de maior escala pode servir de condições de contorno para o modelo de menor escala, por exemplo, os valores de amplitude e fase da maré. Outra opção é utilizar os resultados de amplitude e fase de um modelo global de marés, como o de SCHIWDESKI (1980). Havendo disponibilidade de estações maregráficas exteriores ao domínio, é possível identificar o sentido de propagação das marés e determinar a defasagem no contorno de fronteira aberta, através de regra de três entre as distancias dos marégrafos e o comprimento da fronteira aberta. Neste sentido, os pontos selecionados não podem estar localizados dentro de estuários porque já terão sofrido uma defasagem na maré. Conforme recomendado por ROSMAN (2011), esta estratégia pode ser adotada para determinar a defasagem da maré no modelo SisBaHiA.

Assimetria da maré e suas causas: componentes harmônicos de alta frequência (águas rasas), atrito de fundo, ressonância, geometria da baía e hipsometria da baía

As condições de maré verificadas no interior de um estuário sofrem variações significativas, devido, principalmente, entre o balanço de sua morfologia e topografia e a fricção de fundo causada no escoamento. Em uma situação ideal sem atrito, a onda de maré entraria no estuário, seria refletida e se propagaria no sentido contrário, de forma que encontraria a próxima onda de maré entrando, pois na ausência de atrito a propagação da onda ocorreu exatamente no mesmo período da maré. Em casos reais, sempre haverá dissipação de energia, e os tempos de propagação da onda serão diversos, gerando assimetrias na maré.

A situação idealizada descrita acima é classificada de onda estacionária, na qual as preamares e baixa-mares coincidem com as velocidades mínimas de corrente (estofa de maré) e atrasada de $\frac{1}{4}$ de período em relação às velocidades máximas de enchente e vazante. Por outro lado, a definição de onda progressiva é aplicada quando as preamares e baixa-mares ocorrem simultaneamente às velocidades máximas de vazante e enchente respectivamente (DYER, 1997). Neste caso, as correntes de enchente e de vazante se propagam em níveis diferentes da maré, ao contrário da situação de onda estacionária na

qual as duas se propagam no nível médio do estuário, e aquela que se propaga em nível mais baixo sofre maiores efeitos de atrito com o fundo gerando assimetria.

A assimetria pode ocorrer nas elevações de maré, nas correntes de enchente e de vazante ou no tempo. Aqueles estuários que possuem duração maior da enchente são classificados como dominantes de enchente, enquanto os que possuem maior duração de vazante são os dominantes de vazante. WALTON (2002) enumera algumas causas responsáveis pela assimetria da maré e a formação de sistemas dominantes de enchente e dominantes de vazante. A primeira causa está ligada ao aparecimento de componentes de maré com maior frequência, gerados pela interação não linear dos componentes astronômicos principais, chamados de constituintes de águas rasas ou ainda sobremarés. Esses componentes somente aparecem na propagação da maré em águas rasas e estão associados aos efeitos de reflexão e interação entre as ondas de maré no interior de um estuário. A mais significativa componente de águas rasas é a M4 com período de 6,2 horas, derivada da componente principal M2, que tem o período de 12,4 horas. Tanto a relação entre as suas amplitudes, assim como suas fases, definem o tipo e a intensidade da assimetria da maré, de forma que a relação M4/M2 é usada para quantificar estes efeitos. Considerando apenas a presença das componentes M2 e M4, as velocidades e elevações de maré são dadas pelas Equações 67 e 68.

$$u(t) = U_{M2} \cos(\omega t) + U_{M4} \cos(2\omega t - \nu_{M4}) \quad (67)$$

$$h(t) = A_{M2} \cos(\omega t) + A_{M4} \cos(2\omega t - \varphi_{M4}) \quad (68)$$

A combinação dos valores de amplitude de elevação AM2 e AM4, amplitude da velocidade UM2 e UM4 e diferença de fase ν_{M4} ou φ_{M4} podem gerar diferentes assimetrias, por exemplo, se φ_{M4} é 0 ou π não há dominância, se $\varphi_{M4} = \pi/2$ o estuário é dominante de vazante e se $\varphi_{M4} = 3\pi/2$ é dominante de enchente. Quanto maior a relação M4/M2, mais intensa será a dominância (de enchente ou de vazante). Vide WALTON (2002) para obter maiores ilustrações sobre a defasagem da M4 em relação a M2.

A segunda causa esta relacionada com a geometria do estuário e do canal de entrada, pois no caso da elevação do nível d'água no canal de entrada, geralmente durante a enchente, esta causará o aumento da sua área transversal, proporcionando maiores velocidades de corrente. A hipsometria do estuário, i.e., a relação entre os níveis d'água e a área alagada pela variação da maré, também desempenha um papel preponderante na formação de padrões assimétricos das marés.

3.3 – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS CORRENTES

Embora o processo de avaliação de locais adequados à extração da energia das correntes tenha um caráter multidisciplinar, no qual não só fatores físicos, mas também ambientais e socioeconômicos devem ser considerados, o primeiro passo e mais fundamental é a estimativa do potencial energético das correntes. Nesta etapa do processo de avaliação, é que são conhecidas as capacidades físicas de um local em abrigar a instalação de dispositivos conversores de corrente, fornecendo uma previsão quantitativa da energia produzida ao longo de um determinado período do tempo. Conforme apresentado no Capítulo 2, diversas publicações tiveram como objetivo estabelecer um método de avaliação do potencial da energia das correntes, as pioneiras limitando-se a comportar uma quantidade de conversores em um corpo d'água, com espaçamentos inspirados nos aproveitamentos eólicos e as mais recentes, introduzindo conceitos de modelagem hidrodinâmica, impactos ambientais e aspectos socioeconômicos.

Nesta seção, um método para a avaliação do potencial energético das correntes foi proposto, tomando como base técnicas de modelagem hidrodinâmica e interferometria SAR para compreensão dos campos de corrente em determinado local e, assim, possibilitar a elaboração de mapas de potencial energético. Diferentemente dos outros métodos propostos, a avaliação apresentada neste trabalho está totalmente baseada na circulação hidrodinâmica do local, reproduzindo todas as características físicas essenciais para a viabilidade da instalação de dispositivos: velocidade de corrente e profundidades adequadas, batimetria e variação espaço-temporal destas variáveis. Conforme colocado por OWEN & BRYDEN (2007) em publicação propondo o método do fluxo gráfico para a avaliação de sítios em Pentland Firth, Escócia:

“O entendimento das complexidades da circulação das correntes de maré é um passo fundamental para o sucesso da extração de sua energia.”

Especialmente para aplicações em território brasileiro, no qual as maiores possibilidades de aproveitamento da energia das marés e correntes estão concentradas nas regiões Norte e Nordeste e, ao mesmo tempo, existem carências e complexidades na obtenção de dados ambientais, existe demanda por diferentes abordagens de entendimento da circulação hidrodinâmica anteriores à fase de visita *in loco* e coleta de dados. Por exemplo, os locais favoráveis à exploração das correntes no Reino Unido e em outros países da Europa já são conhecidos a partir do lendário comum, devido à existência de evidências históricas sobre seu potencial. Novamente, segundo OWEN &

BRYDEN (2007), a costa leste da América do Norte possui dados esparsos quando comparada às águas do Reino Unido. Essa ideia também pode ser estendida para o restante do continente americano, havendo muitas regiões costeiras com carestia de dados confiáveis.

Basicamente, o potencial de energia disponível no escoamento em um corpo d'água pode ser descrito pela Equação 69.

$$P_{EC} = \frac{1}{2} \rho \int_A u_x^3 dA \quad (69)$$

No caso das correntes de maré, que geralmente apresentam um caráter cíclico, pois dependem dos movimentos astronômicos responsáveis pela geração das marés, estas podem ser parametrizadas pelas Equações 70 e 71 (BRYDEN *et al.*, 1997).

$$u_x(t) = A + [B + C \cos(2\pi / T_1)] \cos(2\pi / T_0) \quad (70)$$

$$u_y(t) = F + [D + E \cos(2\pi / T_1)] \cos(2\pi / T_0) \quad (71)$$

onde, A e F estão relacionados às correntes residuais (excluindo a de maré);

B , C , D e E são termos de amplitude;

T_0 é o período de variação semidiurna;

T_1 é o período dos ciclos de sizígia e quadratura;

u_x é a velocidade das correntes E-W;

u_y é a velocidade das correntes N-S.

A fórmula da velocidade da corrente ao longo do tempo que ataca o dispositivo conversor no caso deste possuir mecanismo de leme (*yaw*) está dada pela Equação 72.

$$|u(t)| = \sqrt{u_x^2(t) + u_y^2(t)} \quad (72)$$

Outro aspecto importante relativo à instalação do conversor é a variação da velocidade de corrente ao longo da profundidade, conforme foi ilustrado na Figura 2. De maneira geral, as leis de potência de 1/7 ou 1/10 são usadas para descrever o decaimento da velocidade superficial ao longo da profundidade. Considerando o desenvolvimento apresentado em BRYDEN *et al.* (1997), a variação de velocidade da corrente ao longo da profundidade é calculado pela Equação 73.

$$u(z) = 0,93(z / 0,32h)^{1/7} u_{pico} \quad (73)$$

onde, z é a variável profundidade;

h é a profundidade total;

u_{pico} é a velocidade de pico, em geral a velocidade medida na superfície.

A extração de energia é realizada na interceptação da corrente com a área da seção transversal varrida pelo dispositivo conversor. Desta forma, pode ser introduzido o conceito de densidade energética das correntes δ , que representa a razão entre o potencial energético das correntes e a área da seção transversal por onde passa o escoamento. A Equação 74 apresenta o cálculo da densidade energética em cada ponto do corpo d'água.

$$\delta_{EC} = \frac{P_{EC}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_z u^3(z) \quad (74)$$

Através das técnicas apresentadas no escopo deste trabalho, a modelagem hidrodinâmica e a interferometria *along-track* SAR, é possível a obtenção a variação da velocidade das correntes ao longo do tempo e do espaço, assim como ao longo da profundidade, através de modelação tridimensional. Tais conjuntos de valores obtidos numericamente substituem o cálculo analítico apresentado pelas Equações 69 a 74 e possibilitam a transformação dos mapas de campo de correntes em mapas de densidade energética.

Nestes mapas, cada ponto da malha numérica recebe um valor de densidade energética, que multiplicado pela área útil de um dispositivo resulta na potência conversível em unidades de potência. Devido ao fato da velocidade da corrente estar elevada ao cubo, as regiões de maior densidade energética são mais facilmente ressaltadas frente àquelas de menor densidade, orientando as posições prioritárias para a instalação de *arrays* de dispositivos conversores de energia.

4. ESTUDO DE CASO

Localidades que compõe o complexo estuarino da baía de São Marcos, assim como, a própria baía por diversas vezes foram apontadas na literatura específica como regiões promissoras ao aproveitamento energético das marés e correntes. No capítulo pertinente a exploração do mar do livro *Amazônia Azul* (FERREIRA VIDIGAL *et al.*, 2006), referência sobre a importância econômica, estratégica e social do mar territorial brasileiro, a ponta do Itaqui é citada como um dos exemplos de áreas de possível aproveitamento maremotriz. No estudo elaborado pela Sondotécnica para a Eletrobrás (ELETROBRÁS, 1980) sobre o estado da arte dos aproveitamentos maremotrizes no Brasil, duas localidades pertencentes à baía de São Marcos: baía do Cajual e estuário do Bacanga foram definidos como eixos barráveis para a implantação de usina maremotriz utilizando reservatório de acumulação. Em CHARLIER (1997), dentre os sítios favoráveis à exploração da energia das marés identificados pelo mundo, estão citados os estados do Amapá, Pará e Maranhão, informações obtidas através do trabalho descrito em ELETROBRÁS (1980) e, especificamente, o projeto do rio Bacanga, localizado na baía de São Marcos, no qual existe uma barragem construída, entretanto não existem turbinas instaladas para geração maremotriz.

Em LIMA *et al.* (2005), é realizado uma revisão sobre os aproveitamentos maremotrizes e, especificamente, as perspectivas da motorização da barragem do rio Bacanga. Em FERREIRA & ESTEFEN (2009), foi conduzido um estudo sobre o aproveitamento da barragem no rio Bacanga para geração de eletricidade. Neste artigo é apresentado um modelo hidroenergético de geração maremotriz, elaborado a partir de levantamento batimétrico realizado *in situ* e previsão de marés através da análise harmônica.

4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

A baía de São Marcos, localizada no estado do Maranhão, foi escolhida como estudo de caso, devido à existência de fortes correntes de maré, as quais justificam o interesse na exploração da energia das correntes. As características básicas da baía de São Marcos estão descritas a seguir. A Figura 19 apresenta a localização da área de estudo.



Figura 19: Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil (Fonte: GOOGLE, 2010)

Juntamente com a baía de São José, a baía de São Marcos compõe um sistema geológico complexo chamado de Golfão Maranhense. Este golfão encerra baías, estuários, estreitos, igarapés, enseadas, inúmeras ilhas, além de uma vasta área de manguezal e planície de marés (EL-ROBRINI *et al.*, 2006). Os principais rios contribuintes da baía de São Marcos são o Mearim, Pindaré e Grajaú. A baía é caracterizada por um canal central bem desenvolvido e dominado por correntes de vazante, variando na sua largura a partir da plataforma continental em 50 km, na parte central em 15 km (entre Alcântara e a Ponta de São Marcos), 25 km ao nível da Ilha dos Caranguejos e 4 km na foz do rio Mearim. Podem ser detectados durante a baixamar, extensas planícies de maré, associadas a manguezais, especialmente no lado leste da baía, nos estuários dos rios Anil e Bacanga e na área portuária até o fundo da baía. Paralelamente, também podem ser observadas alternâncias com trechos compostos de praias dissipativas de areia fina e falésias sedimentares (EL-ROBRINI *et al.*, 2006, MOCHEL *et al.*, 2006).

A hidrodinâmica da baía de São Marcos é caracterizada pela influência de macromarés do tipo semidiurna (duas preamares e duas baixamares por dia lunar). Essas marés, com amplitude média de 4,6 m e máxima de 7,2 m, induzem fortes correntes de marés, principais responsáveis pela circulação hidrodinâmica da baía (PORTOBRÁS, 1988 *apud* MOCHEL *et al.*, 2006). Os registros da DHN indicam velocidades de corrente superiores a 7,5 nós (3,8 m/s).

As águas da baía de São Marcos são, fortemente, caracterizadas pelo alto grau de salinidade de 30 mg/L e pela alta concentração de material em suspensão (silte e argila), que atinge uma média de 250 mg/L. Os rios Mearim, Itapecuru, Pindaré e outros que deságuam na baía de São Marcos sofrem a influência da cunha salina, fazendo com que as suas águas sejam impróprias para o uso direto no abastecimento humano e utilização em processos industriais.

A principal atividade econômica presente na baía de São Marcos é a atividade portuária, que reúne requisitos como grandes profundidades para a atracação de navios de grande calado e uma hinterlândia caracterizada pela extração e produção de minério e grãos que se utiliza destes portos para sua exportação. O complexo portuário de São Luís é constituído por quatro portos e terminais formados pelo porto de São Luís, porto do Itaqui, terminal da Ponta da Madeira e terminal Alumar. O porto de São Luís é um porto de carga geral, abrigado e de águas profundas com marés altas. O porto de Itaqui, também, é um porto de carga geral e importa essencialmente combustíveis, GLP, fertilizantes e carga geral, enquanto exporta alumínio, ferro gusa, minério de ferro, soja e minério de manganês. O terminal Ponta da Madeira pertence à Companhia Vale do Rio Doce e sua principal atividade é a exportação de minério de ferro. O terminal Alumar pertence ao Consórcio Aluminício do Maranhão e exporta alumina e alumínio (MARANHÃO, 2006).

4.2. DADOS AMBIENTAIS

Primeiramente, dados batimétricos e a linha de costa foram retirados de cartas náuticas e incluídos para compor o domínio de modelagem. As constantes harmônicas da maré para esta região foram prescritas no modelo, permitindo a realização da previsão de marés no seu módulo interno. As informações de vento consideradas na simulação foram baseadas na literatura disponível (SILVA *et al.*, 2007). Parâmetros como o atrito no fundo são usados tanto para descrever a realidade como ajustar as equações de escoamento através de artifício.

a) Batimetria

As informações relativas à batimetria da baía de São Marcos, incluindo os equipamentos portuários, utilizadas neste estudo, foram resultado de uma combinação das cartas náuticas da DHN (Marinha do Brasil): n° 412 (Baía de São Marcos e proximidades do Terminal da Ponta da Madeira e Itaqui), escala 1:30.000 e n° 400 (Do Cabo Gurupi à Ilha de Santana), escala 1:317.010. A carta náutica n° 412 está apresentada na Figura 20.

A parte sul da baía de São Marcos, isto é, ao sul dos terminais portuários de Itaqui e Ponta da Madeira, não possui interesse para a navegação e também apresenta pequenas profundidades, razões estas que explicam a carência de informações de batimetria neste trecho. Para efeito de modelagem, foi utilizada para esta área uma batimetria suavizada a partir dos últimos valores de profundidade existentes até as margens do sul da baía que possuem profundidade de referência zero.

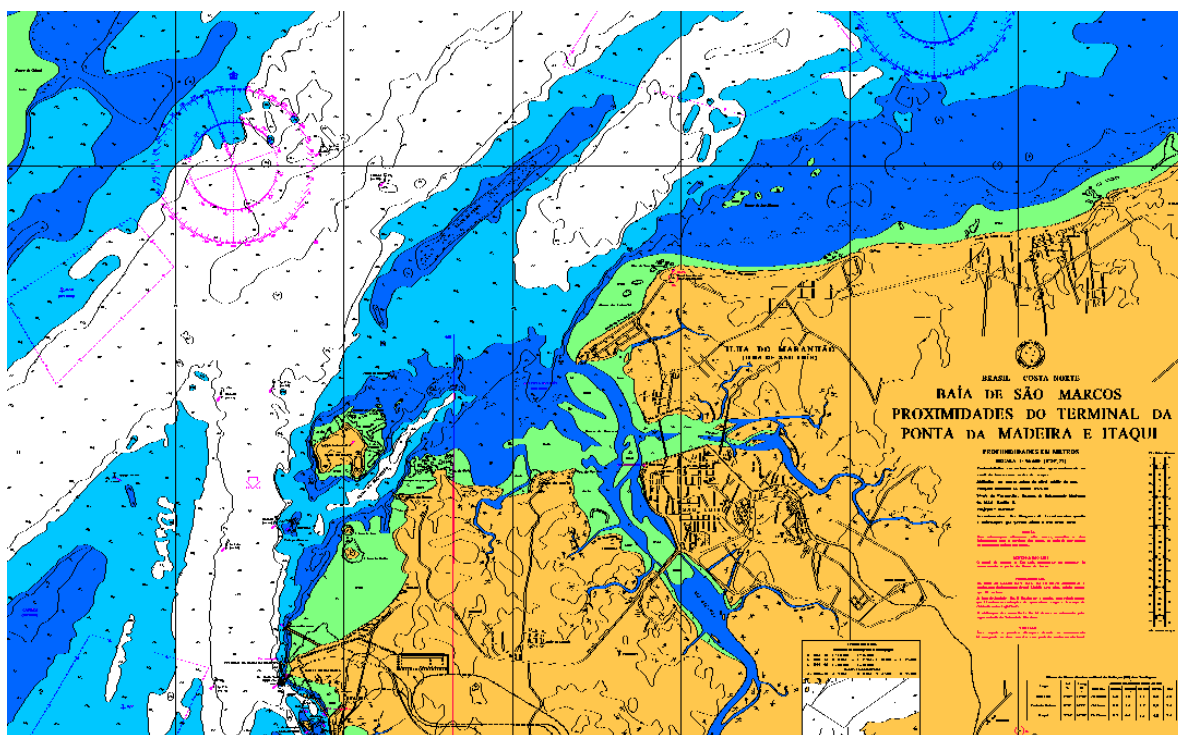


Figura 20: Carta náutica n° 412 – Baía de São Marcos e proximidades do Terminal da Ponta da Madeira e Itaqui

As profundidades fornecidas na carta náutica são referenciadas ao zero hidrográfico, o qual é aproximadamente o nível das baixamarezes de sizígia no local. Para fins de entrada no modelo, a cota do nível médio do mar foi somada às profundidades,

permitindo que o modelo inicie nas condições médias de maré. O nível de referência adotado foi o zero hidrográfico da DHN. (Sobre as cotas positivas).

b) Maré

As componentes harmônicas utilizadas na previsão de marés para a baía de São Marcos foram obtidas das cartas nº 70 e nº 77 da publicação da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2000). A Tabela 6 apresenta as constantes harmônicas do terminal da Ponta da Madeira e a Tabela 7 da estação de Alcântara.

Tabela 6: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica da Ponta da Madeira, (MA), listadas por duração de seu período

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação :		PONTA DA MADEIRA (TERMINAL CVRD) – MA			
Localização :		Na quina do pier dos rebocadores			
Organ. Responsável :		DHN / CVRD			
Latitude :		02° 33,9' S	Longitude :		44 ° 22,7' W
Período Analisado :		01/08/91 a 31/07/93	N° de Componentes :		105
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		VII H 11 min	Nível Médio (Zo):		328 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		597 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		482 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		59 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		174 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	9,5	291
Ssa	-	-	N ₂	38,6	186
Mm	-	-	NU ₂	10,2	176
Mf	-	-	M ₂	211,6	199
MTM	-	-	L ₂	13,1	203
Msf	-	-	T ₂	3,9	229
Q ₁	1,7	192	S ₂	57,8	235
O ₁	9,3	211	K ₂	16,1	229
M ₁	1,2	214	MO ₃	1,2	324
P ₁	3,1	238	M ₃	2,0	313
K ₁	9,9	240	MK ₃	0,7	026
J ₁	0,5	282	MN ₄	1,5	177
OO ₁	-	-	M ₄	5,0	183
MNS ₂	3,3	261	SN ₄	0,6	114
2N ₂	7,9	191	MS ₄	-	-
Referências de Nível: RN implantado na calçada do edifício da Administração do Porto de Itaqui.					
Obs: Outros Períodos: 01/01/88 a 09/02/88; 14/01/88 a 20/05/88; 11/07/88 a 30/07/88; 02/08/88 a 16/08/88; 19/08/88 a 04/11/88; 07/11/88 a 24/11/88; 26/11/88 a 31/12/88; 18/11/89 a 10/12/89; 05/01/91 a 26/02/91; 01/07/91 a 30/12/94; 01/01/95 a 30/06/96.					
Consta das Tábuas das Marés					

Tabela 7: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Alcântara (MA), listadas por duração de seu período

Nome da Estação : ALCÂNTARA – MA					
Localização : No trapiche em frente ao Mercado Municipal					
Organ. Responsável : DHN					
Latitude : 02° 24,6' S		Longitude : 44 ° 25,3' W			
Período Analisado : 15/11/82 a 16/12/82		Nº de Componentes : 82			
Análise Harmônica : Método Almirante Santos Franco					
Classificação : Maré Semidiurna.					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		VI H 51 min	Nível Médio (Zo): 308 cm acima do NR.		
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		563 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) : 449 cm acima do NR.		
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		53 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) : 167 cm acima do NR.		
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	6,4	010
Ssa	-	-	N ₂	37,8	179
Mm	12,8	176	NU ₂	7,2	181
Mf	-	-	M ₂	197,7	193
MTM	1,3	256	L ₂	8,7	181
Msf	6,6	038	T ₂	3,4	223
Q ₁	2,2	191	S ₂	57,0	224
O ₁	8,4	183	K ₂	15,5	227
M ₁	2,9	240	MO ₃	2,7	344
P ₁	2,7	238	M ₃	1,5	335
K ₁	8,2	243	MK ₃	3,1	093
J ₁	0,6	108	MN ₄	1,9	181
OO ₁	1,1	233	M ₄	6,2	190
MNS ₂	1,7	344	SN ₄	0,4	013
2N ₂	5,0	165	MS ₄	4,8	249
Referências de Nível: RN-1 na esquina da calçada em frente ao Mercado Municipal. RN-2 na sala de passagens da loja "MARATUR".					
Obs: Não há referências a outros períodos.					

Como pode ser observado na Tabela 6, o nível médio do mar (Z₀) na região da baía de São Marcos é de 3,28 metros, a partir do nível de referência local. Respectivamente, a cota alcançada pela média das preamares de sizígia (MHWS) é de 5,97 metros e pela média das baixamares de sizígia é de (MLWS) é de 0,59 metros. Esses valores são usados como referência na estimativa da variação máxima da maré em ocasiões freqüentes ao longo do ano.

A previsão de marés foi realizada através do programa Matlab (MATLAB, 2000), utilizando as rotinas t_tide (PAWLOWICZ *et al.*, 2002), desenvolvida

especialmente para esse fim. Duas etapas constituem a previsão de marés: análise harmônica dos dados medidos para obtenção das constantes harmônicas e a previsão de marés que é a reconstituição do sinal de maré a partir das constantes. Um registro sintético das marés ao longo de um ano foi gerado a partir das constantes harmônicas no programa Matlab.

Nas Figuras 4 e 5, ilustram-se curvas de maré típicas na baía de São Marcos que foram usadas como condições de contorno para as simulações realizadas.

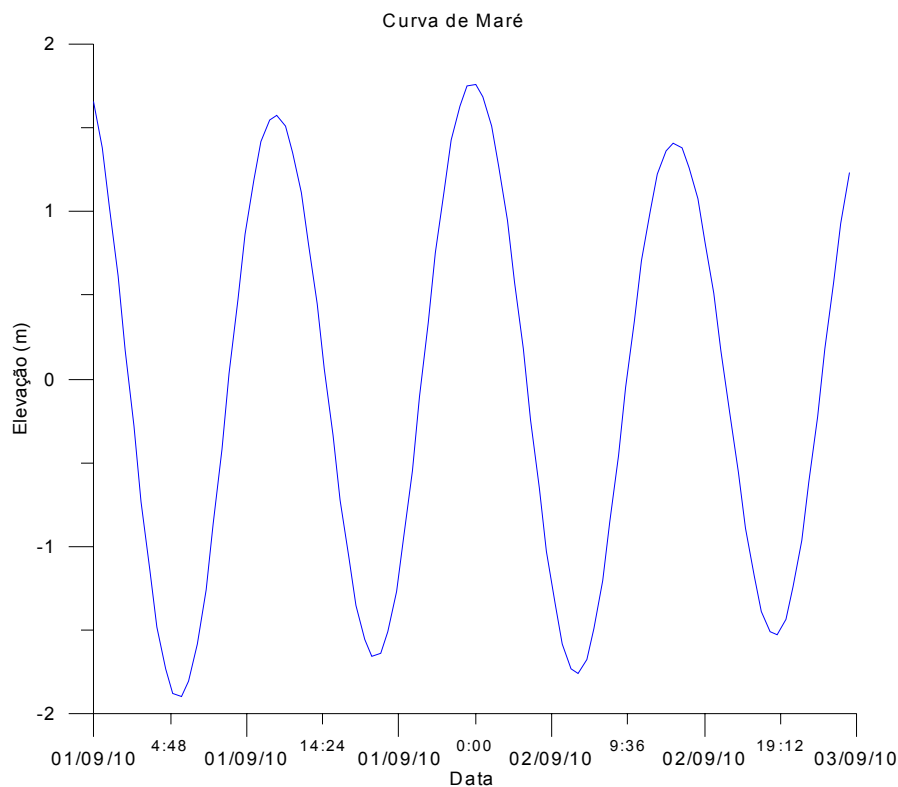


Figura 21: Curva típica de maré para os dias 1 a 3 de setembro de 2010 obtida através do módulo de previsão de marés do SisBaHiA a partir das constantes harmônicas da FEMAR (2000)

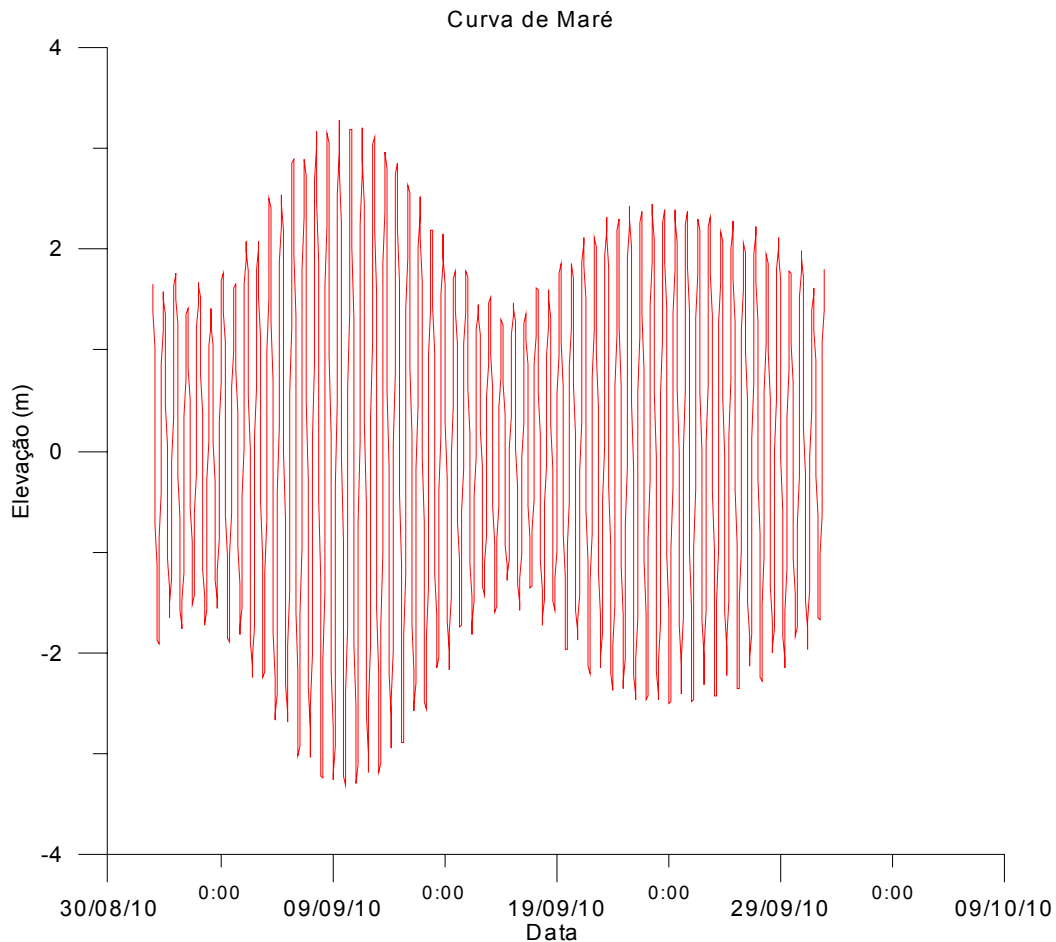


Figura 22: Curva típica de maré para o mês de setembro de 2010

As marés apresentam características semidiurnas com duas preamares e duas baixamars bem definidas ao longo do dia, não apresentando desigualdades diurnas. Conforme o critério de Courtier (DEFANT, 1960) o fator de forma F , dado pela expressão $F = (K1 + O1)/(M2 + S2)$, é de 0,2, sendo classificada por este critério em maré do tipo semidiurna (intervalo entre 0 e 0,25).

c) Correntes de maré

Uma fonte usual de dados de corrente de marés é a publicação disponibilizada pela DHN da Marinha do Brasil, a qual abrange cartas de corrente de maré para os 12 dos principais portos do território brasileiro. O objetivo destas cartas é de orientar o navegante a respeito da direção e velocidade da corrente em qualquer instante, para que este possa levar em conta o seu efeito sobre o movimento do navio. Nestas publicações, as primeiras páginas contêm as instruções de uso, seguidas por 13 cartas com a direção e velocidade de corrente em diversos pontos da instalação portuária e proximidades,

sendo uma carta relativa à preamar, seis para as horas antes da preamar e seis para as horas após a preamar. Na Figura 10 está apresentada a carta de corrente de maré para 2 horas antes da preamar no porto de São Luís (Baía de São Marcos). As velocidades são dadas em nós. O ano da publicação é de 1962.

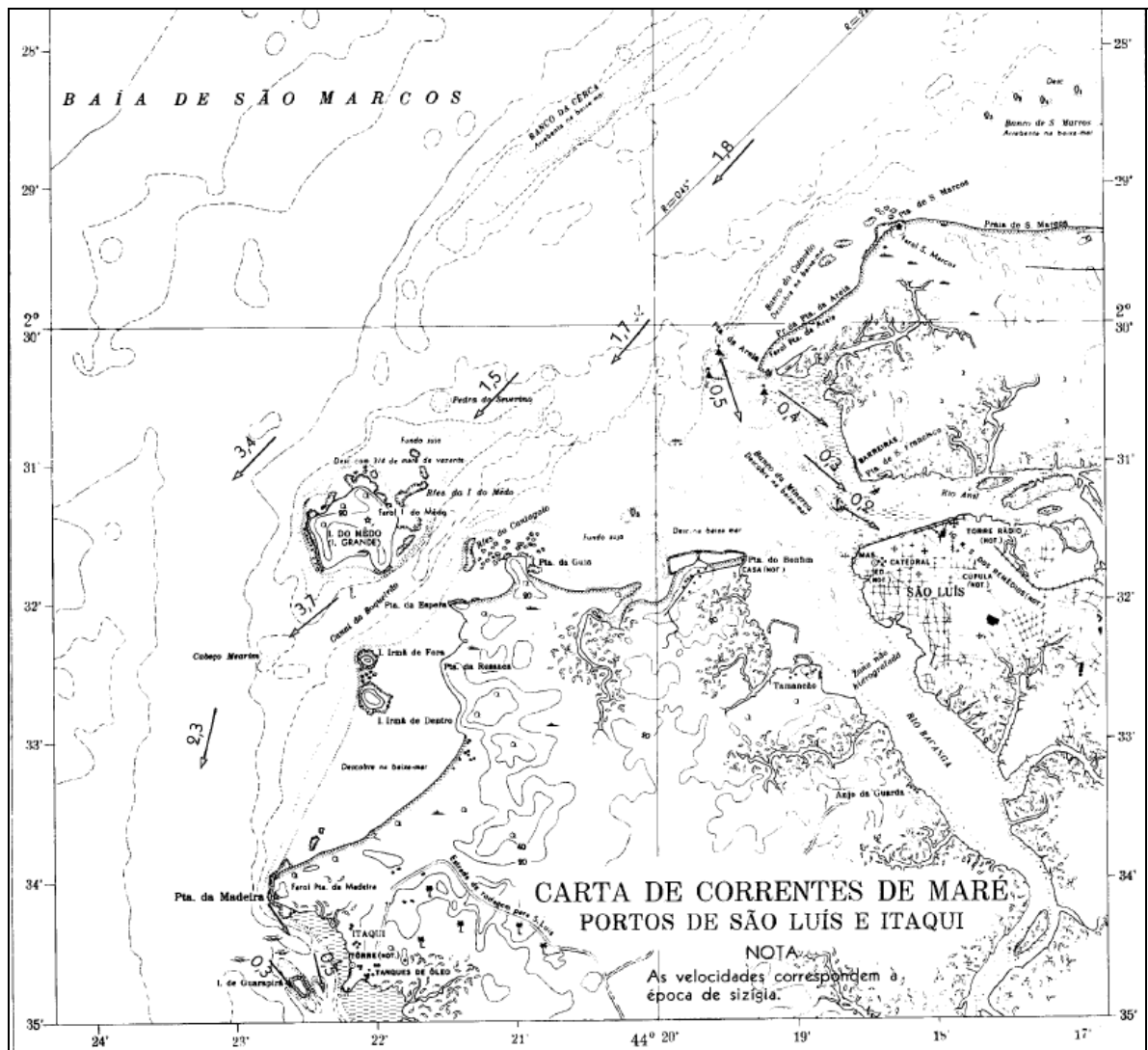


Figura 23: Carta de correntes de maré (em nós) para os portos de São Luís e Itaqui duas horas antes da preamar no marégrafo de São Luís (Fonte: DHN, 1962)

Com o propósito de estimar a variação da intensidade das correntes associadas a diferentes amplitudes de maré ao longo do ano, nas páginas de instruções existe um quadro que relaciona a amplitude da maré com um fator de redução/amplificação da velocidade das correntes verificada nos mapas. Na Tabela 2, está reproduzido o quadro com o fator de correção para diferentes amplitudes de maré no porto de São Luís, MA.

Tabela 8: Coeficientes para a correção da velocidade das correntes em relação à altura da maré no marégrafo de São Luís

Maré (m)	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
Coef.	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4

As correntes de maré na baía de São Marcos são predominantemente unidirecionais, adotando como direção aquela do próprio canal principal, exceção das extensas planícies de maré que possuem direções diversas dependente de sua morfologia. Como pode ser observado na Figura 10, as maiores correntes estão localizadas no canal principal, correspondendo a 3,4 nós (1,7 m/s) para condições de maré média. Para a maior maré de 6,5 metros de amplitude, o coeficiente é 1,4, o que corresponde a 4,8 nós (2,4 m/s).

d) Dados de vento

A intensidade do vento na plataforma continental do norte brasileiro apresenta uma sazonalidade, com sua velocidade média igual a 3,42 m/s em abril e atinge 7,37 m/s em outubro, considerando as medições realizadas no ano de 2000.

Naquele ano a média anual da velocidade do vento foi de 5,12 m/s. As direções de vento durante o ano acompanharam a mesma sazonalidade verificada na velocidade, devido a diferentes fenômenos atmosféricos, responsáveis pela circulação nesta região. Durante o primeiro semestre, os ventos têm direção ESE e no segundo semestre têm direções E e ENE.

A Figura 24 mostra uma medição realizada no ano de 1997, associada a velocidade e a direção média mensal para a região ao largo do litoral norte brasileiro.

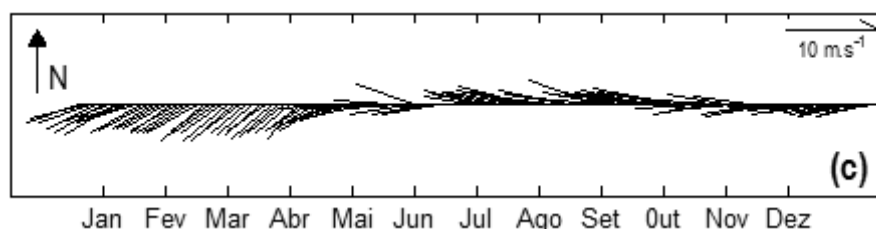


Figura 24: Velocidade média mensal para 1997 no litoral norte brasileiro

(Fonte: SILVA *et al.*, 2007)

e) Vazões

A parte sul da baía de São Marcos termina na confluência dos rios Mearim e Pindaré, os quais são responsáveis pela drenagem de uma extensa área continental do estado do Maranhão. MONTES (1997) em relatório do IBGE sobre o diagnóstico do Estado do Maranhão e acerca da hidrografia local são apresentados valores de vazões em algumas estações fluviais deste sistema hidrográfico, em situações de cheia e estiagem. Os valores de vazão atribuídos para os rios que compõe o sistema Mearim-Grajaú e Pindaré estão sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9: Vazões fluviais do sistema Mearim-Grajaú e Pindaré

<i>Estação</i>	<i>Estiagem</i>	<i>Cheia</i>
Rio Mearim		
Barra do Corda	31,4 m³/s	322 m³/s
Bacabal	38,6 m³/s	337 m³/s
Rio Grajaú		
Grajaú	32 m³/s	-
Arati-Grande	131 m³/s	-
Rio Pindaré		
Pindaré-Mirim	30,2 m³/s	493,7 m³/s

Os efeitos de descarga fluvial de água doce somente se fazem sentir no extremo sul da baía, que em situações de cheia alcançam vazões da ordem de 830 m³/s. Comparado aos prismas de maré através da desembocadura da baía, que na sizígia é equivalente a $8,0 \times 10^6$ m³/s e na quadratura a $4,0 \times 10^6$ m³/s, as vazões destes rios correspondem a 0,1% e 0,2% do aporte na baía nestas condições respectivamente.

5. MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA BAÍA DE SÃO MARCOS

O Departamento de Engenharia Oceânica da UFRJ possui um modelo hidrodinâmico, SisBaHiA, o qual foi empregado neste trabalho. O modelo SisBaHiA é composto de uma série de módulos: um modelo hidrodinâmico, dois modelos de transporte (abordagem Euleriana e Lagrangeana) e dois modelos de onda (um para ondas geradas dentro do modelo e outra para propagação de ondas através do domínio de modelagem). O módulo hidrodinâmico resolve numericamente as equações de Navier-Stokes, usando discretização espacial via elementos finitos associada à transformação sigma e a discretização temporal em diferenças finitas. As aproximações hidrostática e de Boussinesq são consideradas no modelo, enquanto a modelagem de turbulência é obtida por técnicas de filtragem.

Devido principalmente a sua vocação portuária e a hinterlandia associada a exploração de minério e grãos, a região que engloba a baía de São Marcos possui grande importância econômica para atividades de interesse público e privado e, por esta razão, vem sendo cada vez mais estudada e compreendida por parte de pesquisadores e profissionais ligados a este desenvolvimento econômico. Em relação à aplicação da modelagem hidrodinâmica nesta região, existem trabalhos anteriores como o de PEREIRA (1993) e PEREIRA & HARARI (1995), no qual utilizaram um modelo numérico tridimensional para avaliar a circulação na plataforma continental do Maranhão, incluindo a baía de São Marcos. ALFREDINI (1995, 2005) estudou a circulação das marés na região oceânica onde começa o canal de acesso aos portos localizados na baía de São Marcos, utilizando modelo hidrodinâmico. TORRES *et al.* (2007) realizaram modelagem hidrodinâmica marinha em regiões da costa norte brasileira, considerando a influência de processos marinhos e atmosféricos em diferentes escalas espaciais e temporais. A partir dos resultados da circulação sobre a Plataforma Continental Amazônica (PCA), foram geradas condições de contorno para modelação em domínios menores, incluindo um modelo de alta resolução para a baía de São Marcos. QASSIM *et al.* (2009) utilizaram o modelo SisBaHiA para a seleção de sítios favoráveis a exploração da energia das correntes de maré no Brasil, enfocando a foz do rio Amazonas e a baía de São Marcos. Para a utilização neste trabalho, a malha de elementos finitos e outros dados do modelo da baía de São Marcos foram gentilmente cedidos pelo professor Rosman.

5.1. DOMÍNIO DE MODELAGEM E MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Uma área incluindo toda a extensão da baía e sua conexão com o oceano Atlântico foi considerada como domínio do modelo e está apresentada na Figura 2. As regiões de interesse estão representadas por pontos vermelhos, nos quais será dado maior enfoque nos resultados.

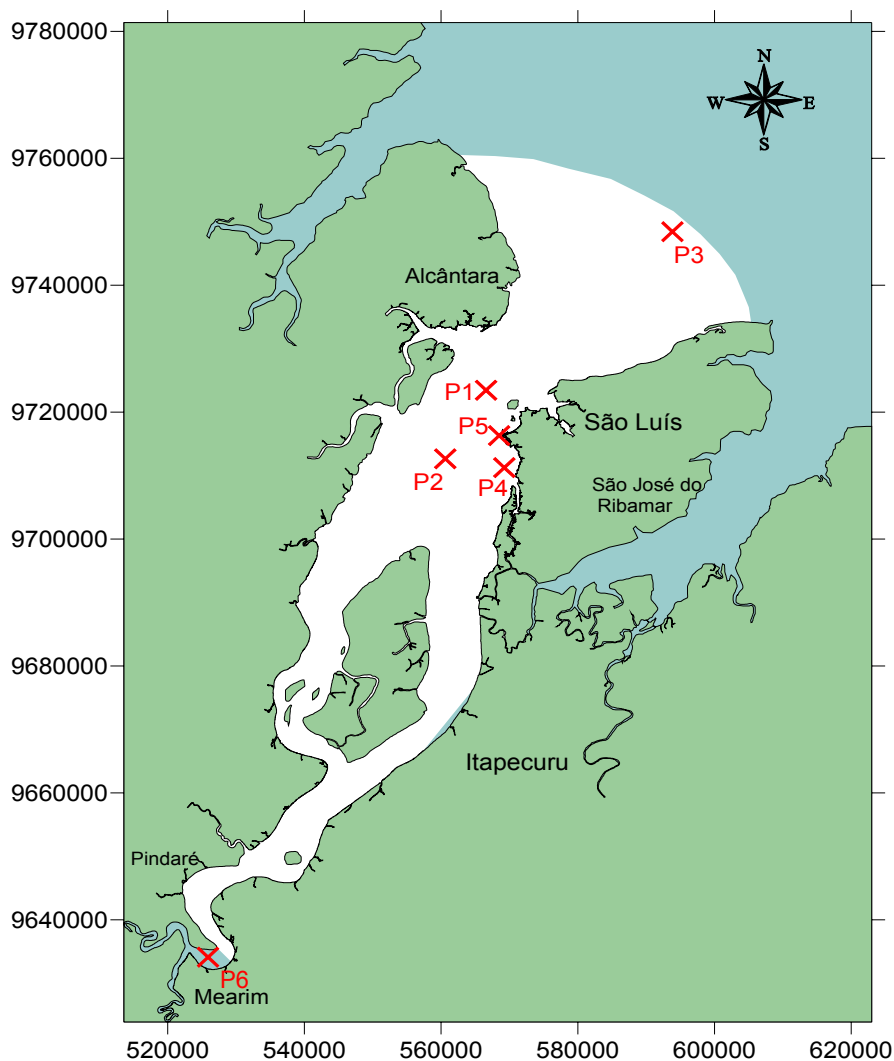


Figura 25: Área considerada como domínio na modelagem e pontos de interesse

Os pontos 1 e 2 estão localizados no canal principal da baía na região de maior profundidade e foram selecionados como pontos de calibração com as cartas de correntes de maré, publicadas pela Marinha. O ponto 3 está localizado no canal principal da desembocadura da baía no oceano Atlântico. A região portuária está representada pelos pontos 4 e 5, correspondem, respectivamente, a Ponta da Madeira e Itaqui. A confluência dos rios Mearim e Pindaré está representada pelo ponto 6.

Malha de elementos finitos

O modelo no SisBaHiA utiliza tanto elementos triangulares ou retangulares e ainda a mistura dos dois tipos. Entretanto, os elementos quadrangulares são mais adequados para aplicação no SisBaHiA. A malha de elementos finitos foi criada em outro software como uma malha linear. Quando esta é importada para o modelo, se torna uma malha quadrática sub-paramétrica. O número total de elementos foi de 840, cada um associado a 9 nós (Figura 26).

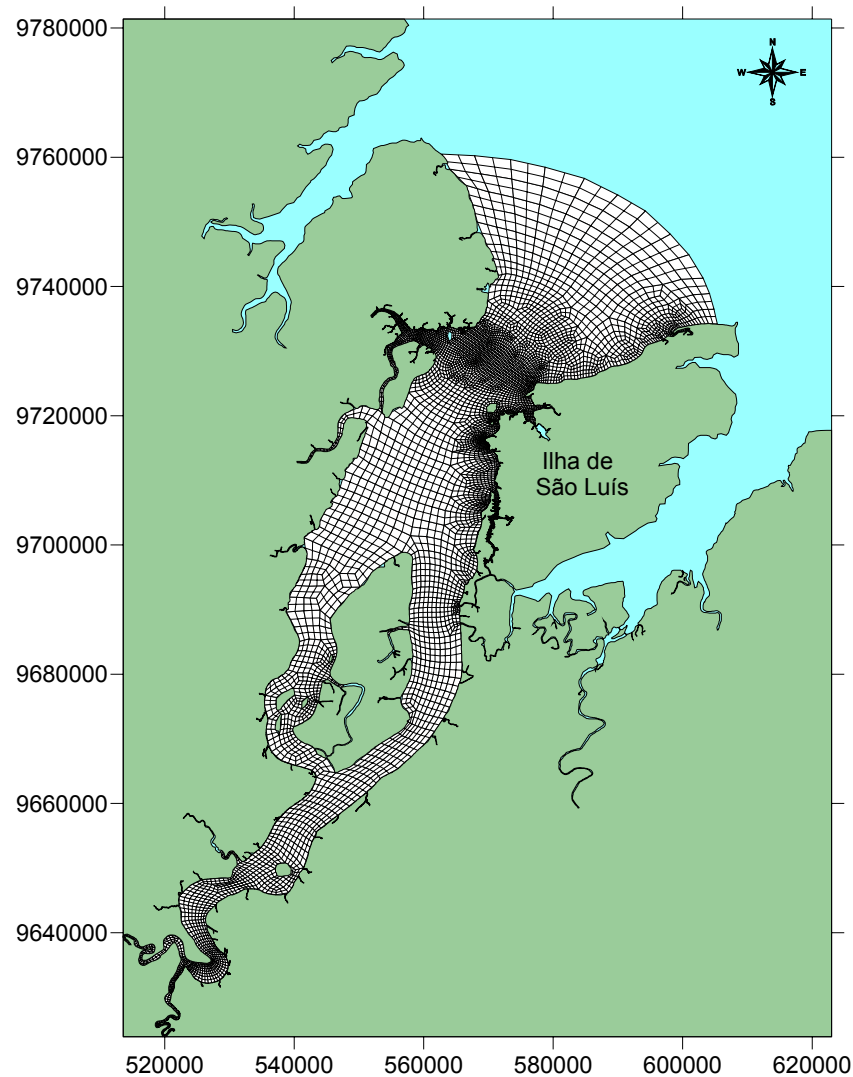


Figura 26: Malha de elementos finitos

Primeiramente, as coordenadas de profundidade e da linha de costa foram incluídas no modelo para definir o domínio. As constantes harmônicas da maré foram extraídas do catálogo da FEMAR (2000), permitindo que um módulo interno do modelo efetuasse a previsão de marés ao longo do período a ser modelado. No módulo hidrodinâmico, os termos da equação da quantidade de movimento podem ser escolhidos entre serem usados ou não e quais estratégias numéricas serão aplicadas na

resolução. Também, as condições de contorno, incluindo os ângulos de influxo e efluxo, são definidas nesta etapa. Esta é a parte mais importante do processo de modelagem, especialmente para regiões costeiras, pois é necessário que o analista possua um conhecimento prévio das condições ambientais da região a ser modelada.

Batimetria

Primeiramente, dados batimétricos e da linha de costa foram retirados de cartas náuticas e incluídos para compor o domínio de modelagem, conforme descritos na seção 4.2. A batimetria conforme entrada no modelo está apresentada em escala de cores na Figura 4. As coordenadas estão em UTM para facilitar a compreensão das distâncias.

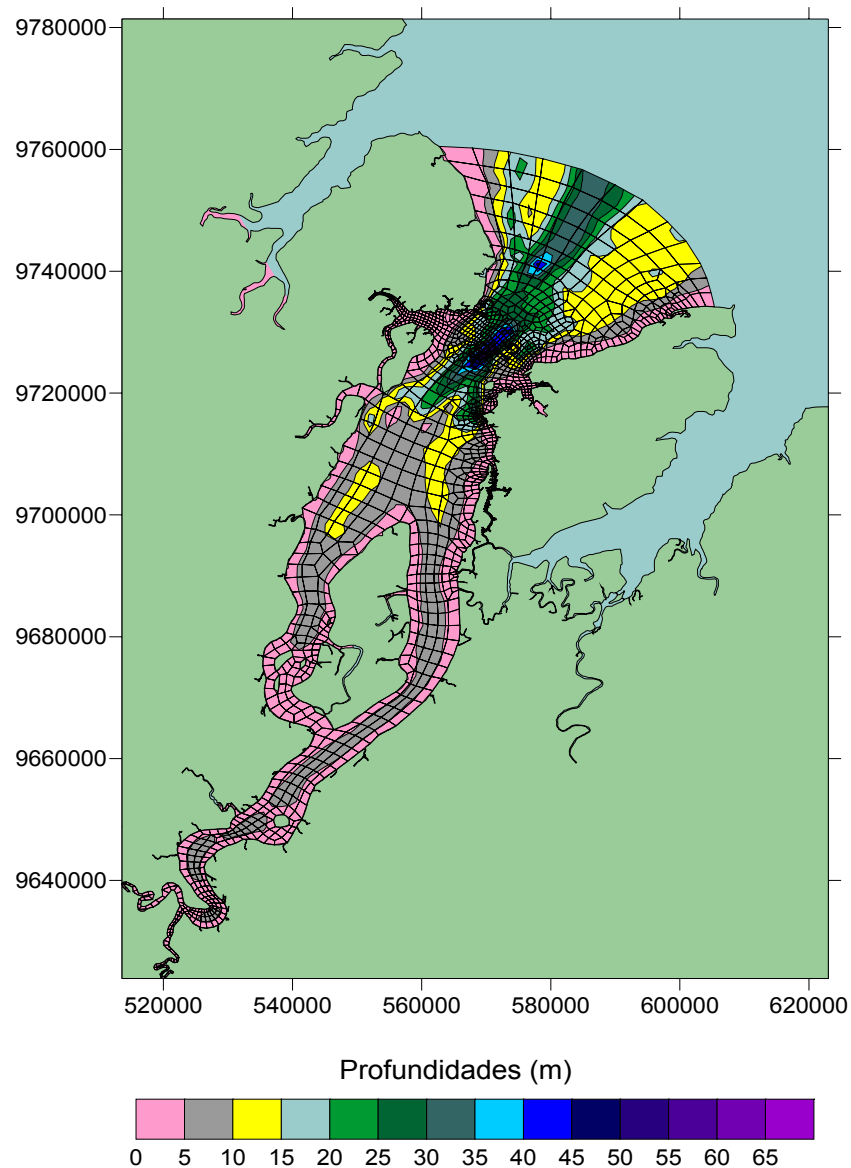


Figura 27: Batimetria considerada no modelo e malha de elementos finitos

Rugosidade

A rugosidade do leito foi considerada inicialmente como sendo de ondulações de amplitude de 5 cm. É importante ressaltar que o valor de rugosidade além de refletir a composição do leito também se configura como um artifício para ajustar o modelo, uma vez que esta rugosidade define o coeficiente de Chézy, C_h conforme visto anteriormente na Equação 16 que calcula a dissipação da velocidade devido ao atrito com o fundo.

Neste sentido, primeiramente foram prescritos no modelo valores de rugosidade representativos da composição do leito e, posteriormente, estes valores foram adequados para regiões de águas mais rasas e/ou de notória redução de velocidades, adotando-se o conceito de macrorugosidade. Os valores de rugosidade tal como foram entrados no modelo estão na Figura 28.

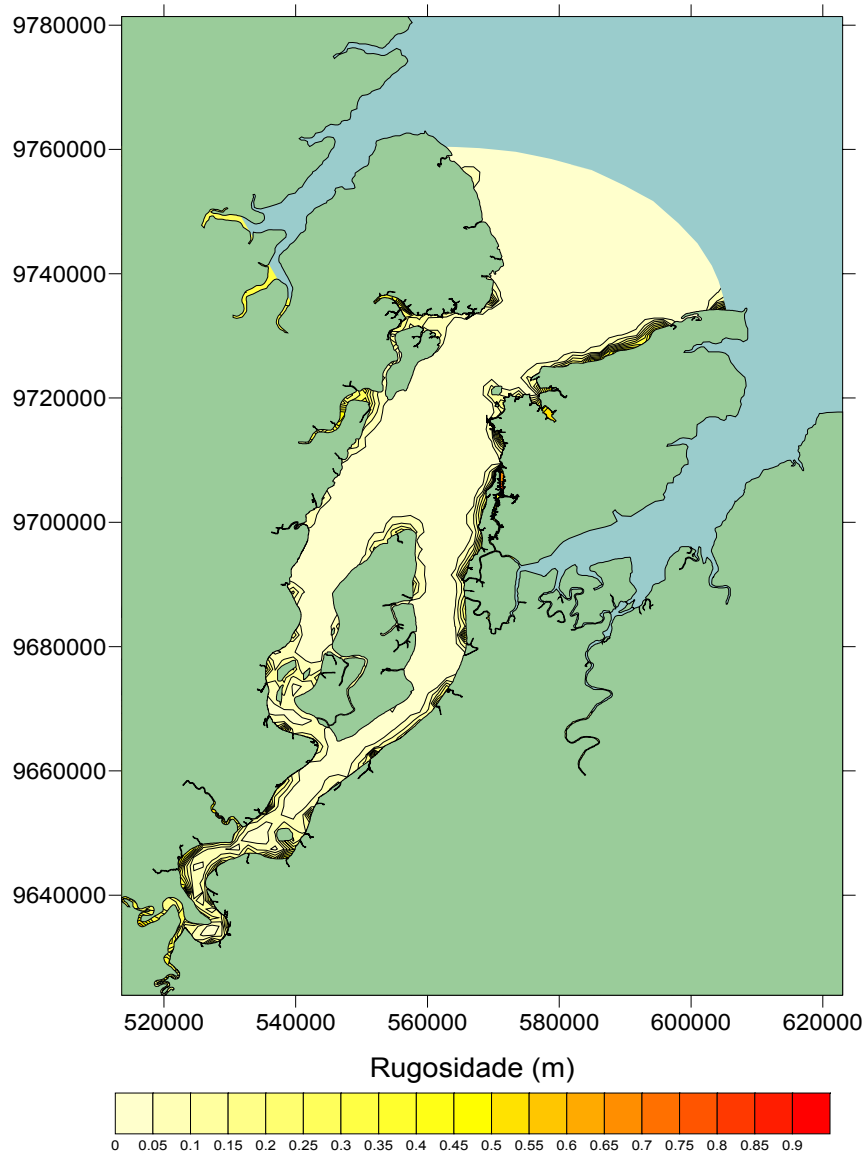


Figura 28: Rugosidade considerada no modelo

5.2. CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONDIÇÕES INICIAIS

As condições de fronteira aberta se basearam na prescrição das constantes harmônicas da estação maregráfica de Alcântara (indicada pela letra A) e, desta forma, permitiu a realização da previsão de marés no módulo interno do modelo. A localização das cinco estações maregráficas disponíveis para a região e que foram usadas na modelagem estão mostradas na Figura 4. Com o propósito de prescrever a diferença de fase ao longo da fronteira aberta do domínio de modelagem, foram selecionadas duas estações maregráficas externas ao domínio: Cumã e Ilha de Santana, representadas respectivamente pelas letras B e C.

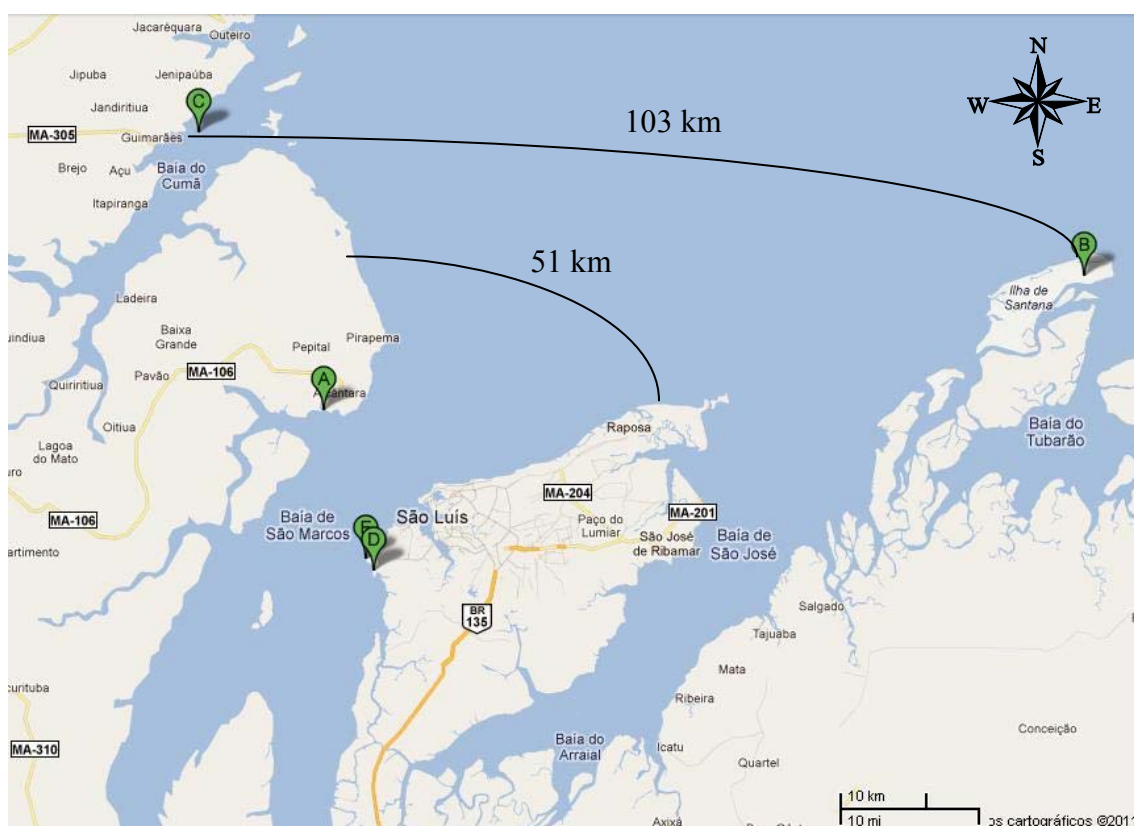


Figura 29: Estações maregráficas utilizadas no modelo (Adaptado de GOOGLE, 2010)

Os valores de fase foram retirados das respectivas constantes M2 nas duas estações e, através, de uma correlação entre a distância das estações e da fronteira aberta, foi calculada a diferença de fase nesta última. De acordo com o catálogo da FEMAR (2000), a fase da M2 em Cumã é de 200° , enquanto na Ilha de Santana é de 175° , o que significa que a onda de maré se propaga de leste para o oeste e se atrasa em 25° para a distância de, aproximadamente, 103 km entre estas estações. Dado que a extensão da fronteira aberta do domínio é de 51 km, resulta que o atraso de fase ao

longo desta será de $12,5^\circ$. Na sequência, a diferença de fase obtida foi distribuída pelos 25 nós que compõe a fronteira aberta. Desta forma, as preamares acontecem de uma extremidade para a outra da fronteira aberta em um intervalo correspondente a 26 minutos.

Os marégrafos localizados mais internamente a região de modelagem, Itaqui e Ponta da Madeira, correspondentes às letras D e E, foram reservados para a fase de calibração da elevação de maré. Este processo de calibração visa à verificar a reprodução da propagação da maré desde a entrada do domínio de modelagem até pontos mais interiores e, por esta razão, tais estações foram selecionados para este processo.

As condições iniciais foram de elevação da superfície livre equivalente ao nível médio da maré de 3,2 metros (cota DHN) e velocidade nas direções x e y ambas com valor zero.

5.3. SIMULAÇÕES

Conforme descrito em seções anteriores, a baía de São Marcos é influenciada pela propagação de macromarés, que chegam a alturas de até 7 metros, provocando fortes correntes de maré durante a maior parte do ano. Essas características apontam para o interesse no aproveitamento energético das correntes na baía de São Marcos, tornando-a um dos locais mais favoráveis em território brasileiro. Além do fenômeno das marés, outros fatores também são responsáveis pela circulação na baía, a exemplo da influência dos ventos e da descarga fluvial dos rios tributários. A implementação de um modelo hidrodinâmico tem como objetivo fazer a previsão dos níveis do mar e das correntes na região, com vistas a orientar a decisão sobre os locais para aproveitamento energético das correntes. A modelagem deve ser realizada de forma a reproduzir a circulação causada pelas marés e por fatores meteorológicos e hidrológicos.

A baía de São Marcos pode ser considerada um estuário relativamente bem misturado na vertical em sua maior extensão, excluindo as regiões de deságüe de seus afluentes, nas quais naturalmente ocorre a intrusão salina promovida pelas marés e, conseqüente extratificação com o aporte de água doce trazido por estes rios. Neste sentido, os gradientes verticais de densidade foram desprezados e a modelagem da baía foi conduzida através de um modelo 2DH. Por outro lado, a extração da energia das correntes através de turbinas demanda uma avaliação destas correntes de acordo com a profundidade, estudando suas variações de intensidade e direção, profundidade ótima de

instalação e interferência com outros usos da água. Do ponto de vista da modelagem, o analista pode definir quantas camadas de acordo com a profundidade se deseja computar e, desta forma, é possível separar os efeitos de superfície e de fundo nos modelos tridimensionais em relação àqueles 2DH.

Desta forma, o modelo bidimensional em planta (2DH) foi usado, assim como o tridimensional (3D), afim de que pudesse avaliar as variações da velocidade da corrente de acordo com a profundidade. As velocidades de corrente detectadas pela interferometria SAR estão relacionadas com as camadas superficiais e tendem a apresentar maior intensidade em relação às outras camadas devido à maior distância ao fundo e aos efeitos cisalhantes do vento. De certa forma, o modelo tridimensional pode ser alimentado por estes dados de sensoriamento remoto na superfície livre e, então, estimar o perfil de correntes ao longo da profundidade, considerando o conceito de assimilação de dados.

Adicionalmente, as simulações consideraram cenários com e sem ventos, assim como a influência dos rios tributários à baía, com vistas a quantificar a contribuição nos mecanismos de circulação na baía de São Marcos. Algumas condições de contorno foram testadas de acordo com as correntes observadas na região de interesse.

As simulações combinaram efeitos somente da maré e associados a condições de vento e descarga fluvial nos principais afluentes da baía. Adicionalmente, modelos bidimensionais em planta (2DH) e tridimensionais (3D) foram rodados, sendo estes últimos com o objetivo de avaliar a influência nas camadas superficiais e determinar o perfil de velocidades ao longo da profundidade. A seguir estão listadas as simulações realizadas no SisBaHiA:

- Modelo 2DH utilizando somente as constantes de maré como forçante;
- Modelo 3D somente com as constantes de maré como forçante;
- Modelo 2DH utilizando as marés e vento permanente;
- Modelo 2DH associando as marés e as descargas fluviais dos rios Pindaré e Mearim-Grajaú;
- Modelo 3D associando condições de marés, ventos e descargas fluviais.

As simulações cobriram o período entre 1º de setembro e 1º de outubro de 2010. As elevações de maré para este período foram usadas como dados de entrada. O modelo foi processado com passos de tempo de 90 segundos, com o objetivo de manter a estabilidade numérica do modelo. Para este intervalo de tempo, o número de Courant

médio foi de 3,5 e máximo de 15,8. A partida do modelo foi dada “a frio”, considerando como elevação inicial o nível médio do mar local e as velocidades iniciais de corrente como zero. O equilíbrio hidrodinâmico foi alcançado com aproximadamente 10 horas, porém preferiu-se adotar como resultados a partir da 20ª hora de simulação.

5.4. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O primeiro passo para calibrar um modelo hidrodinâmico está sempre relacionado à reprodução das intensidades e direções da corrente na mesma ordem de grandeza que estas acontecem na situação real. Portanto, a relação entre a batimetria e a rugosidade em cada nó da malha deve proporcionar os mesmos padrões de escoamento verificados naquele corpo d’água, por exemplo, conforme a profundidade fica rasa próxima às margens, o valor adotado para a rugosidade equivalente de fundo deve ser aumentado para reproduzir o atrito gerado por estas regiões mais rasas. O termo macrorugosidade ou rugosidade compensada é definido como o valor da rugosidade equivalente de fundo que, não apenas reproduz as condições impostas pelo material de fundo, mas também compensa os efeitos de atrito e redução da velocidade do escoamento nessas regiões rasas.

A partir de uma série de valores de rugosidade equivalente de fundo prescrita no modelo, levando em consideração a composição do leito, esses valores foram gradativamente alterados para que pudessem calibrar as velocidades em todos os nós dentro de um intervalo factível no corpo d’água natural. A primeira intervenção nos valores de rugosidade levou em consideração a profundidade e a proximidade dos nós da fronteira de terra, utilizando uma equação de ajuste do tipo exponencial. Posteriormente, os nós ainda não calibrados foram ajustados manualmente, através da ferramenta de alteração da malha contida no SisBaHiA.

5.4.1. Comparação das elevações de maré e constantes harmônicas

Para verificar a calibração do modelo, foram comparadas as constantes harmônicas obtidas no catálogo da FEMAR (2000) para as estações de Ponta da Madeira e Itaqui com componentes obtidas via análise harmônica das séries temporais de elevação nos nós equivalentes a estas duas estações. As constantes harmônicas do marégrafo de Alcântara foram adotadas como condições de contorno na fronteira aberta para todas as simulações.

As séries temporais de elevação de maré para os nós equivalentes a Ponta da Madeira e Itaqui estão apresentados nas Figuras 30 e 31, respectivamente. As constantes

harmônicas obtidas no catálogo da FEMAR (2000) e através da análise harmônica da série temporal dos nós equivalentes estão apresentadas na Tabela 1.

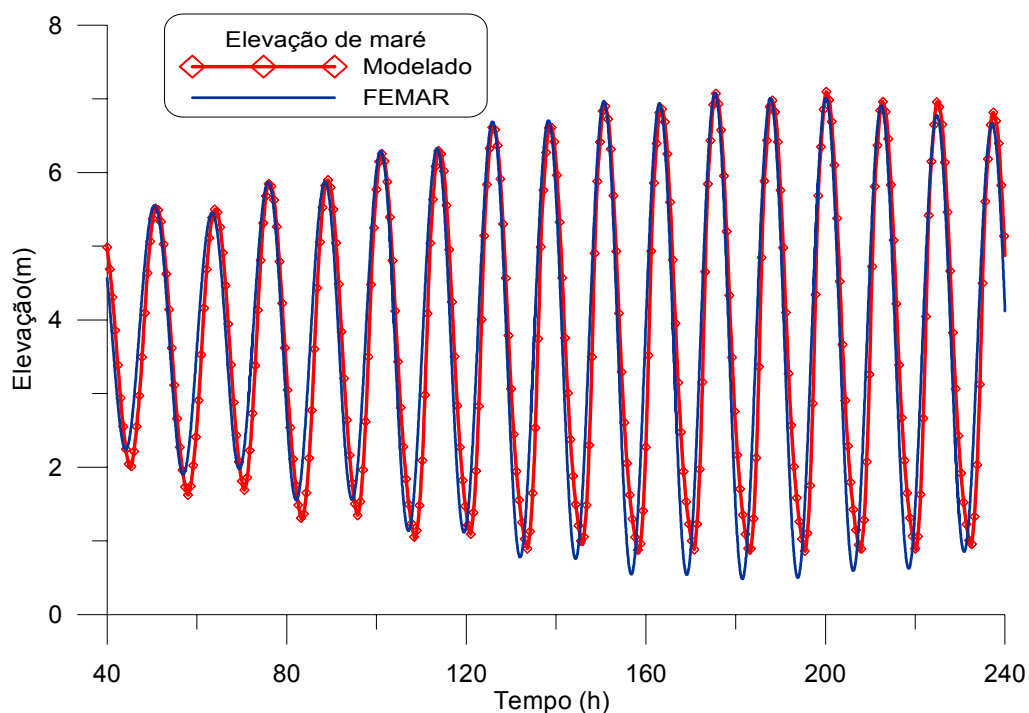


Figura 30: Série temporal de elevações de maré previstas pelas constantes da FEMAR (2000) e modeladas para os nós equivalentes a Ponta da Madeira

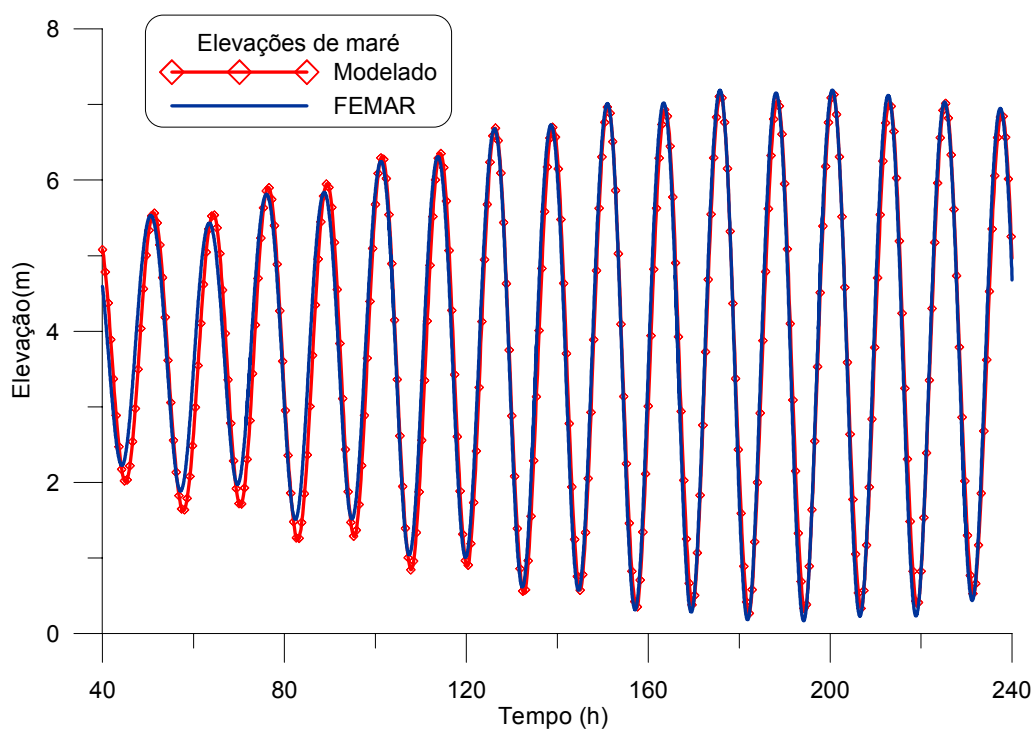


Figura 31: Série temporal de elevações de maré previstas pelas constantes da FEMAR (2000) e modeladas para os nós equivalentes a Itaquí

Tabela 10: Constantes harmônicas obtidas para Ponta da Madeira e Itaqui

Ponta da Madeira				Itaqui			
Constante	Amp (m) FEMAR	Amp (m) modelo	Erro rel. a amp. total	Constante	Amp (m) FEMAR	Amp (m) modelo	Erro rel. a amp. total
M2	2,116	2,258	-3,48%	M2	2,205	2,269	-1,47%
S2	0,578	0,645	-1,64%	S2	0,615	0,646	-0,73%
N2	0,386	0,413	-0,67%	N2	0,445	0,415	0,70%
K2	0,161	0,177	-0,39%	L2	0,281	0,177	4,09%
L2	0,131	0,102	0,21%	K2	0,167	0,103	-0,24%
NU2	0,102	0,083	0,47%	O1	0,098	0,083	0,31%
K1	0,099	0,084	0,36%	MU2	0,096	0,084	-0,04%
MU2	0,095	0,096	-0,02%	K1	0,093	0,097	0,19%
O1	0,093	0,084	0,21%	NU2	0,085	0,084	0,04%
2N2	0,079	0,046	0,81%	M4	0,073	0,046	0,88%
M4	0,050	0,031	0,45%	2N2	0,059	0,035	0,30%

Conforme pode ser observado na Tabela 4, as amplitudes das onze principais constantes harmônicas, entre aquelas publicadas pela FEMAR e as obtidas em nós equivalentes no modelo para ambos os portos, apresentam diferenças pouco significativas. Para quantificar a influência dessas diferenças na amplitude total da maré, foi estabelecida uma razão entre as diferenças em metros e a sua relativa participação na amplitude da maré, conforme Equação 75.

$$Erro_{Amp_total} = \left(\frac{Amp_{obs} - Amp_{mod}}{Amp_{total}} \right) \cdot 100\% \quad (75)$$

5.4.2. Comparação das correntes

As correntes obtidas no modelo foram comparadas com aquelas disponíveis na carta de correntes de maré elaboradas pela Marinha. A carta de correntes de maré, conforme descrito anteriormente, disponibiliza valores de intensidade e direção da corrente em alguns pontos ao longo de corpos d'água de interesse para navegação e, portanto, está voltado a suprir informações seguras para os navegantes. Estes valores de corrente são discretizados em 13 mapas, correspondendo à preamar, às 6 horas anteriores e às 6 horas subsequentes, e são relativos a uma condição de maré média. Caso a amplitude de maré seja maior ou menor do que a média, é aconselhada a

correção destes valores através de um fator de correção retirado de um ábaco disponível nas instruções da carta.

Para esta aplicação, dois pontos de interesse foram extraídos das cartas de correntes de maré para a baía de São Marcos: um localizado no canal principal da baía (Ponto 1) e outro próximo a Ponta da Madeira (Ponto 2). A Figura 32 mostra a localização dos pontos. Em seguida, os valores de corrente foram interpolados para intervalos de 20 minutos, assim como, foram extrapolados para situações de amplitude de maré maior e menor que a média, utilizando os fatores de correção. Desta forma, foi criado um registro sintético de correntes de maré, interpolado e extrapolado, a partir das cartas publicadas.

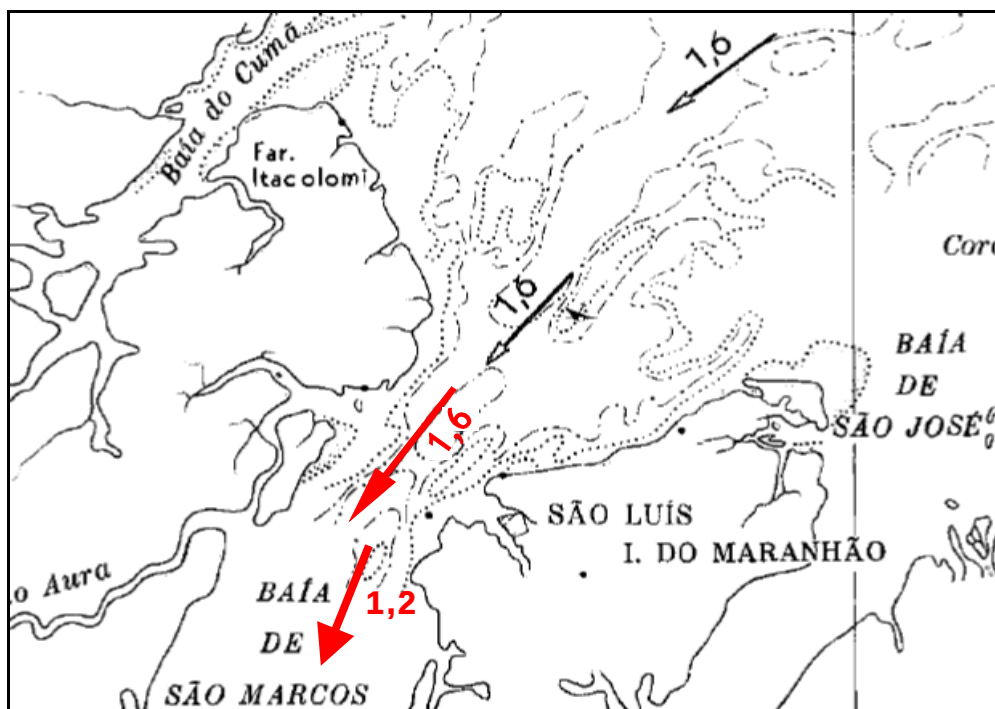


Figura 32: Pontos de calibração retirado da carta de correntes de maré

No modelo hidrodinâmico, foram extraídos valores de dois nós equivalentes a mesma localização dos dois pontos escolhidos na carta de corrente. Para simulação no modelo, foram consideradas a batimetria, resultado da interpolação de cartas náuticas, as constantes harmônicas de maré, fornecidas pela FEMAR e analisadas na seção anterior quanto à calibração, enquanto não foram consideradas contribuições em relação a parâmetros meteorológicos (vento) e hidrológicos (descargas fluviais).

É importante ressaltar que o modelo hidrodinâmico, por tratar-se de uma descrição matemática simplificada dos fenômenos físicos envolvidos e a entrada de

parâmetros foi selecionada a partir da contribuição de cada fenômeno no processo, pode não reproduzir a circulação de correntes com absoluta perfeição ao longo do tempo e do espaço simulado de modo que, para todas as situações o erro seja inexistente quando comparados com os dados reais. A circulação em um estuário depende da combinação de fatores como a profundidade e as variações de maré estarem correta para todos os pontos do modelo, as contribuições do vento serem as mesmas da situação real, condições de fronteira, margens, afluentes e áreas de dissipação de energia e muitos outros fenômenos que possuem interações difíceis de traduzir no modelo.

A comparação das correntes nos nós 5863 e 4547 com os pontos mostrados na Figura 32, provenientes da carta de correntes de maré, publicada pela Marinha, foi realizada através de gráficos de séries temporais e diagramas de dispersão. As Figuras 33 e 34 mostram a comparação das séries temporais e o diagrama de dispersão para o nó 5863 (Ponto 1).

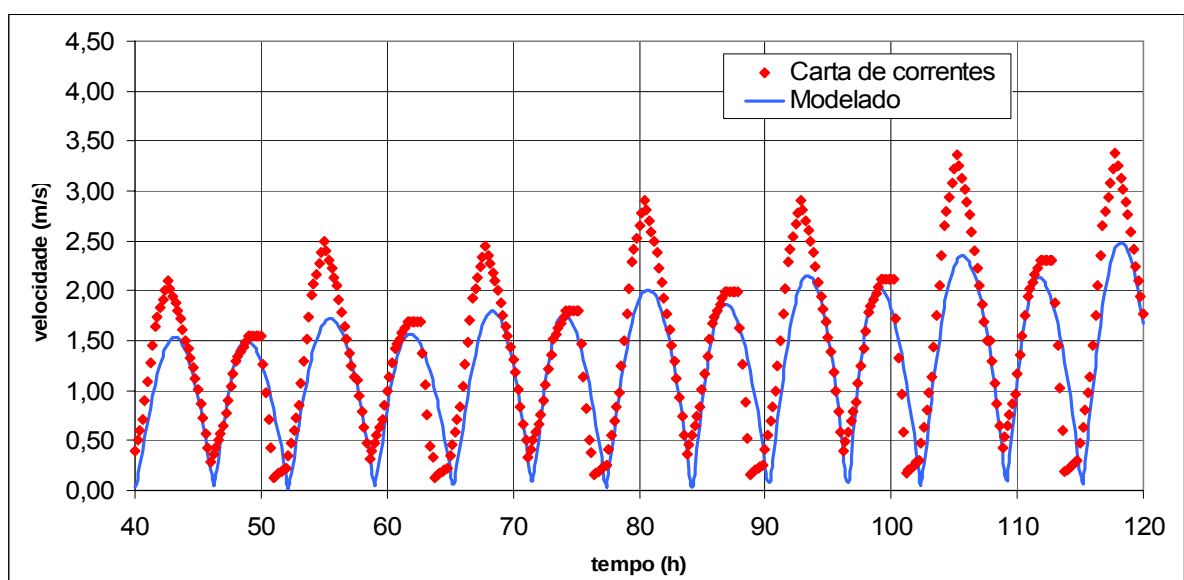


Figura 33: Comparação entre as séries temporais de corrente para o nó 5863, em vermelho, sintetizado a partir da carta de correntes da Marinha e, em azul, resultados do modelo

O erro percentual foi calculado para as séries temporais consideradas na 40ª até a 120ª hora de simulação (Figura 33) resultando em um valor de 11% de diferença média para todo o registro. Pode ser observado que as discrepâncias acentuam-se nas vazantes, especialmente no pico da vazante, e, por este motivo, foram computadas as diferenças médias somente dos períodos de enchente, resultando em 7% e somente vazante, totalizando 27%. Caso somente as velocidades mais intensas de vazante correspondente ao pico, os erros seriam da ordem de 50 a 60%.

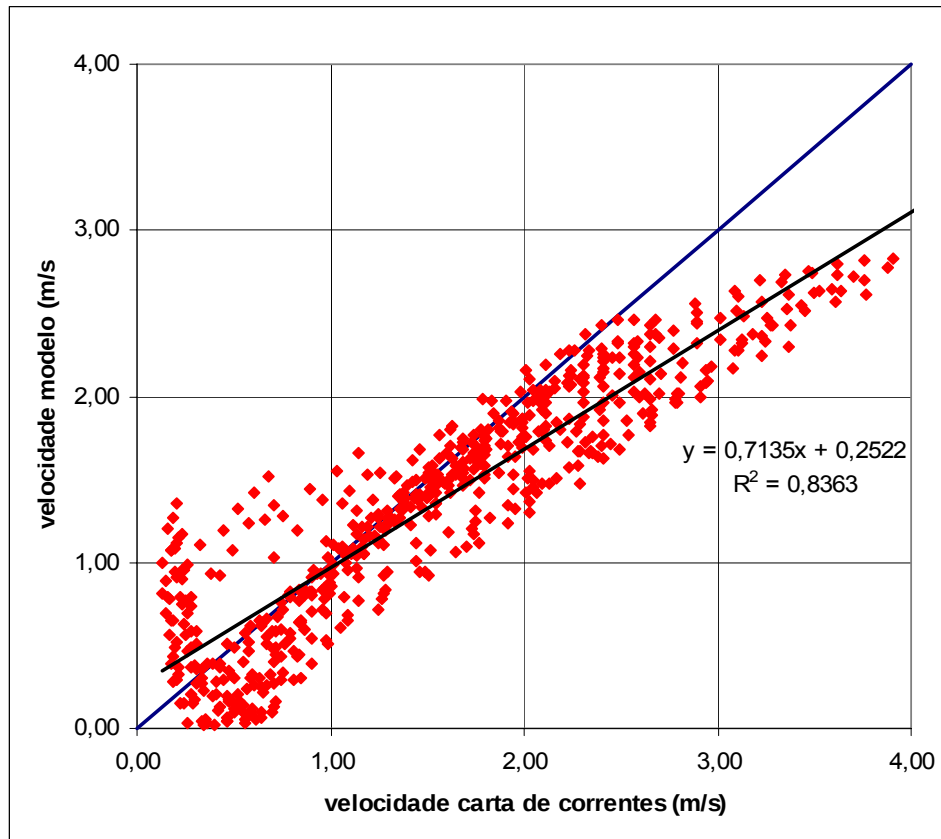


Figura 34: Diagrama de dispersão do valor absoluto das velocidades das correntes:
Carta de correntes de maré x Modelo

Através do diagrama de dispersão da Figura 34, pode ser observado uma tendência do modelo a subestimar as velocidades de corrente, principalmente para aquelas maiores de 2 m/s típicas da vazante. Comparando a rotação da linha de tendência dos pontos (em preto) com a reta bissetriz $x=y$ (em azul), o coeficiente angular da primeira é de 0,713 contra 1, o que quantifica a tendência de subestimação. Outro parâmetro estatístico é a dispersão dos pontos em torno da reta, quantificado pelo R^2 de 0,8363, que significa a precisão do modelo em manter os resultados próximos a tendência.

As Figuras 35 e 37 mostram o mesmo procedimento para o nó 4547 (ponto 2), nas quais são apresentadas a comparação entre as séries temporais e o diagrama de dispersão, respectivamente. Para este ponto também foi realizada a comparação das direções da corrente (Figura 36), tomando a elipse de marés do nó 4547 do modelo e as direções extraídas das cartas de correntes de maré publicadas pela Marinha.

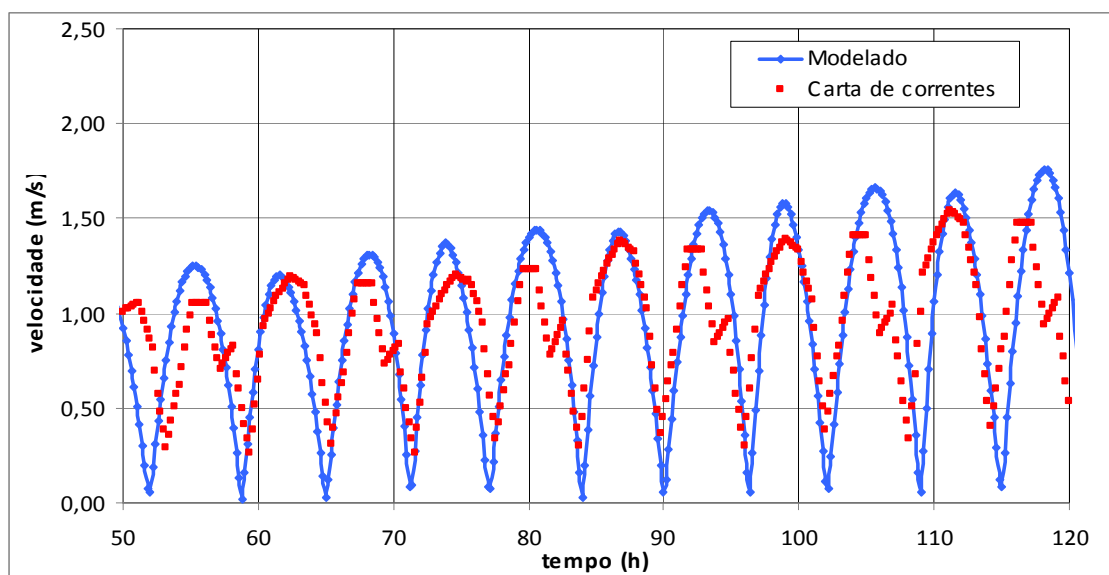


Figura 35: Comparação entre as séries temporais de intensidade de corrente para o nó 4547, em vermelho, sintetizado a partir da carta de correntes da Marinha e, em azul, resultados do modelo

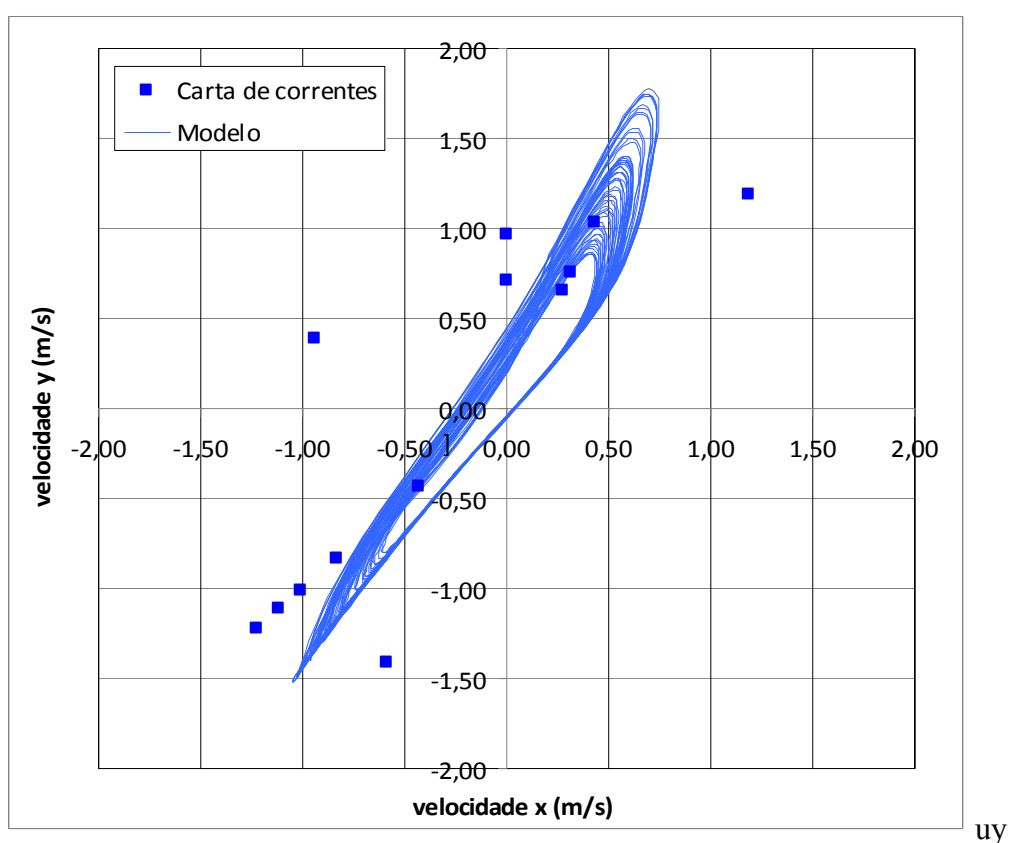


Figura 36: Comparação entre a elipse de maré para o nó 4547, em azul contínuo, e as direções aproximadas constantes das cartas de correntes da Marinha em pontos azuis

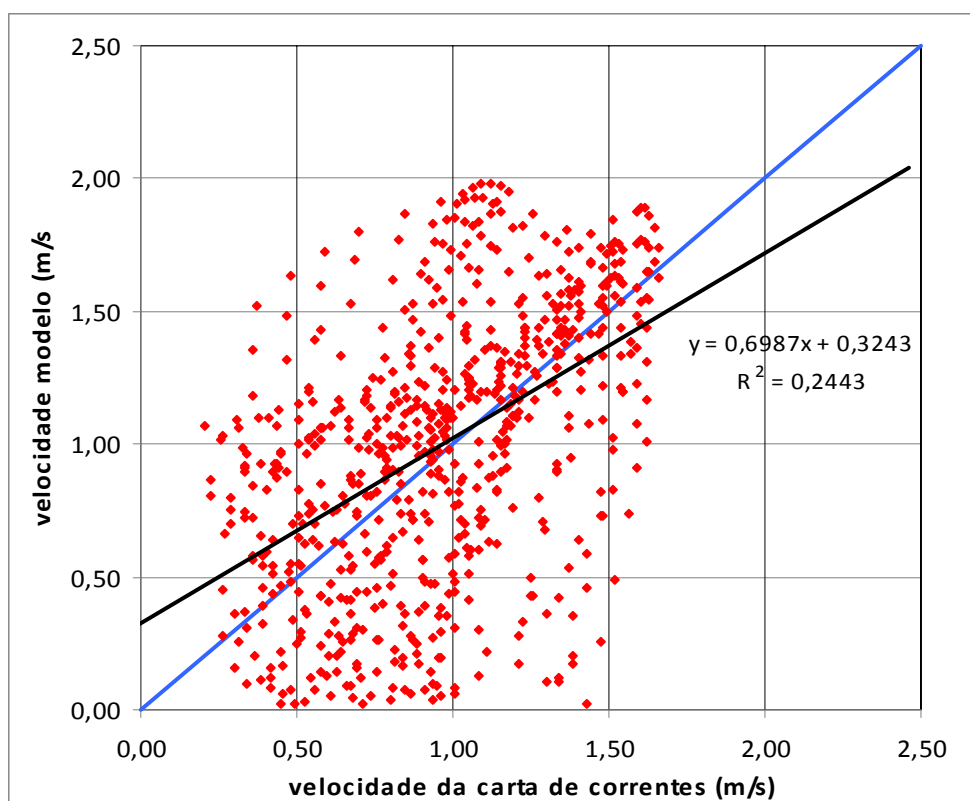


Figura 37: Diagrama de dispersão do valor absoluto das velocidades das correntes:
Carta de correntes de maré x Modelo

Uma das razões que podem explicar as discrepâncias verificadas na comparação das correntes de maré simuladas no modelo hidrodinâmico com aquelas constantes nas cartas de corrente de maré publicadas pela Marinha está relacionada ao fato de que, na modelagem foi usada uma batimetria baseada em cartas náuticas mais atuais, enquanto que as medições que deram origem à carta de correntes de maré foram realizadas na década de 1960. Obviamente, a baía de São Marcos pode ser considerada um estuário dinâmico, que sofreu, ao longo de décadas, alterações de transporte de sedimentos, conformação de fundo etc, influenciando diretamente no padrão de escoamento das correntes de maré.

As condições ideais de comparação e de verificação das correntes de maré modeladas poderiam ser obtidas quando confrontadas com séries medidas *in loco* das correntes de maré na baía de São Marcos. Entretanto, para fins de modelagem hidrodinâmica, existiram dificuldades na obtenção de séries observadas de correntes de maré juntamente a outras instituições que realizam medições na região da baía de São Marcos.

Em suma, os resultados obtidos apontam para uma deficiência do modelo em reproduzir as intensas correntes de vazante, enquanto apresenta acurácia e precisão aceitáveis, especialmente para todas as correntes de enchente e para as correntes baixas e moderadas de vazante. Parafraseando HACKETT *et al.* (1995) em um trabalho onde era comparada a habilidade de dois modelos hidrodinâmicos em descrever a circulação observada na plataforma norueguesa: “Ambos os modelos são capazes de descrever qualitativamente a circulação das correntes, entretanto, nenhum é capaz de reproduzir quantitativamente as correntes com alto nível de detalhe (...)”. Os autores ainda apontam as possíveis causas como as parametrizações inadequadas dos efeitos de subescala, como efeitos de difusão turbulenta, falta de resolução horizontal e condições de contorno e iniciais imperfeitas.

5.5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As simulações listadas na Seção 5.3 tiveram como objetivo avaliar a contribuição das marés, dos ventos e das descargas fluviais dos principais afluentes na circulação hidrodinâmica da baía de São Marcos. Basicamente, os resultados numéricos foram avaliados em termos de campo de velocidades das correntes. Para tanto, alguns pontos de monitoramento foram escolhidos (P1, P2, P3, P4, P5 e P6), localizados na desembocadura da baía, próximo à região portuária, na extremidade sul da baía e suas localizações estão indicados na Figura 25. Nestes pontos foram analisadas as influências dos mecanismos forçantes na circulação da baía.

a) Simulação utilizando a maré como forçante

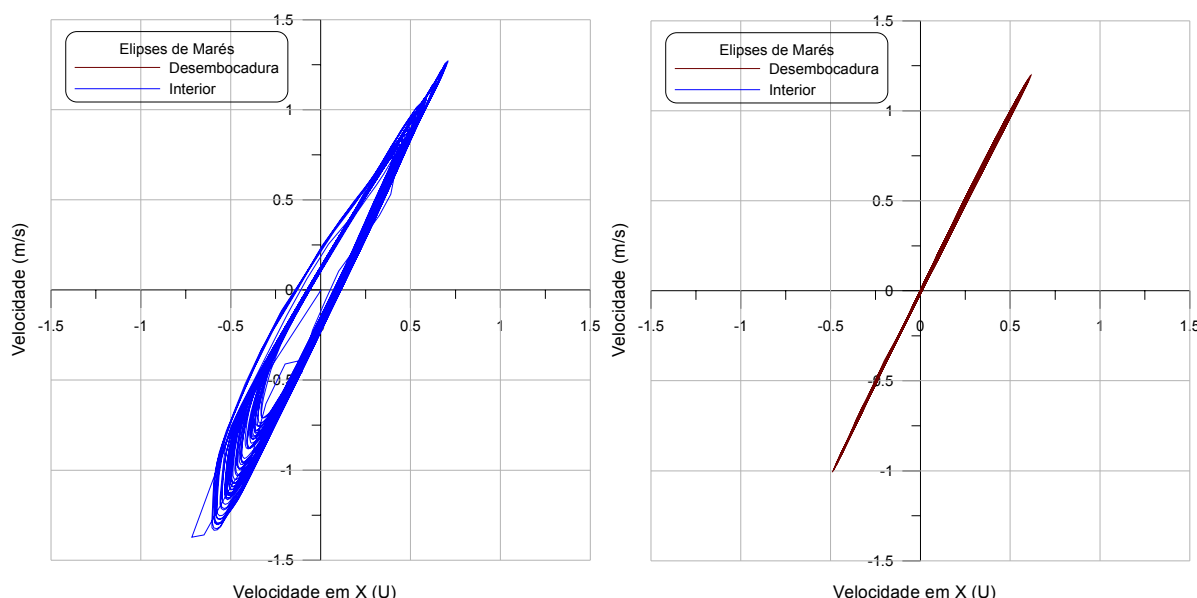
Na primeira simulação, apenas as constantes harmônicas de maré foram prescritas no contorno aberto do modelo, como o objetivo de investigar sua influência na circulação causada na baía de São Marcos. Posteriormente, nas simulações seguintes procurou-se investigar a contribuição dos ventos e das descargas fluviais na circulação da baía, assim como, as diferenças causadas nas camadas mais superiores em relação às mais profundas, através de modelos tridimensionais.

b) Caracterização da baía

Uma importante característica relativa à assimetria da maré pode ser verificada ao longo da sua propagação pela baía de São Marcos. Alguns fatores como a interação

não-linear de componentes harmônicos gerando componentes de águas rasas, assim como a geometria e hipsometria da baía, são responsáveis pelo comportamento assimétrico das marés, resultando que o estuário seja classificado como dominante de vazante. De fato, a maré vazante na baía de São Marcos tem maior período de duração e apresenta velocidades de correntes mais intensas comparadas a maré enchente.

Na Figura 35 podem ser observadas as elipses de maré produzidas para dois pontos da malha modelada, o ponto 3 relativo ao canal principal na desembocadura da baía (marrom) e o ponto 4 relativo ao interior da baía (azul). As velocidades das correntes de vazante (1º quadrante) no ponto correspondente a desembocadura são maiores que aquelas de enchente (3º quadrante). Para o ponto correspondente ao interior da baía, as velocidades de enchente e vazante passa a ter a mesma intensidade, porém as correntes de enchente possuem maior variação na sua direção (3º quadrante).



Figuras 38: Elipses de maré para o interior - P4 (a) e a desembocadura – P3 (b) da baía de São Marcos

A defasagem da maré ao longo da baía pode ser verificada na Figura 36. As preamares e baixamars acontecem espaçadas por, aproximadamente, uma hora na desembocadura em relação ao interior da baía. À medida que a onda de maré se propaga na baía, ela perde a estacionaridade, típica nas águas mais profundas da plataforma continental, e se torna mais progressiva, não existindo mais a concomitância entre as preamares e baixamars com suas respectivas estofas de enchente e vazante. A Figura

39 ilustra este comportamento de maré mista, comparando as elevações de maré com as velocidades da corrente na região próxima aos terminais portuários.

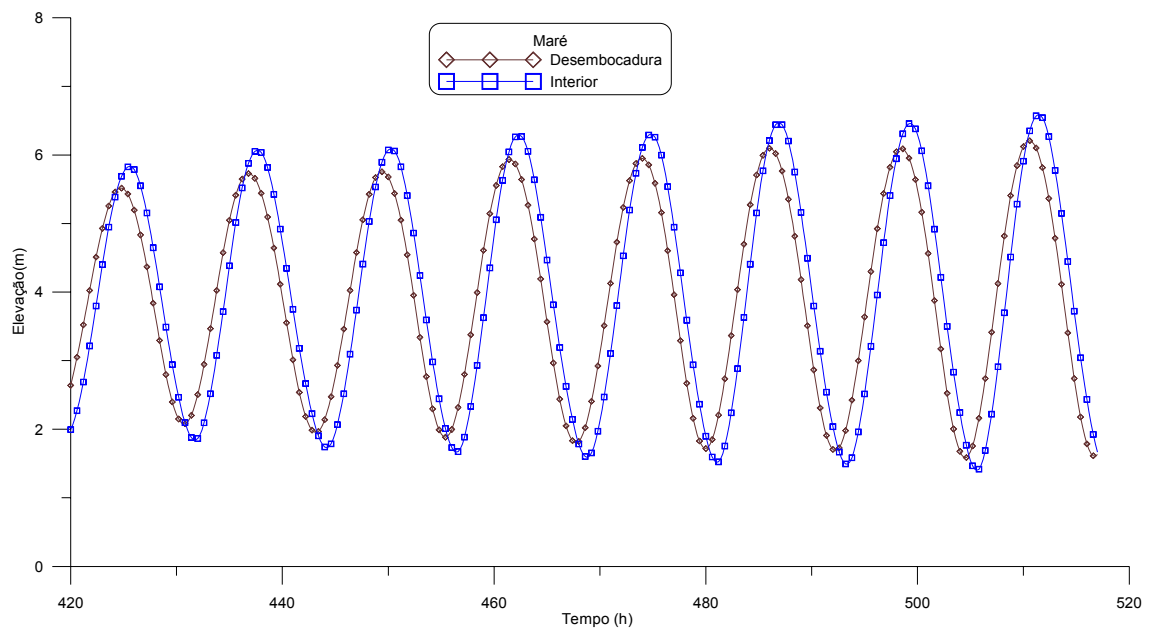


Figura 39: Série temporal de elevação da maré na desembocadura P3 e interior P4 da baía de São Marcos

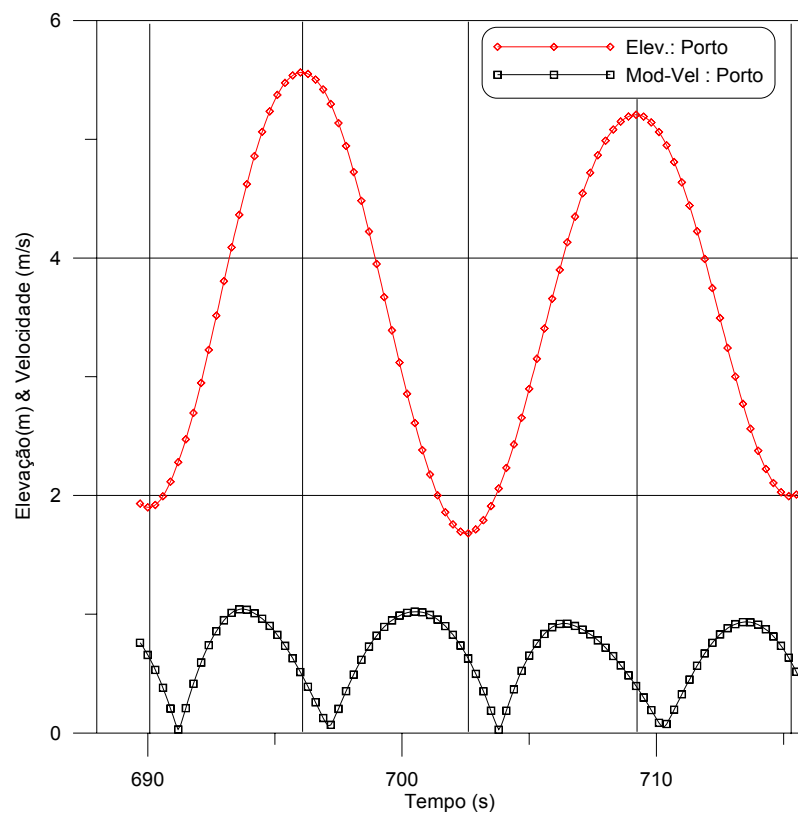


Figura 40: Característica de maré mista próxima à região portuária P4 e P5

As Figuras 39 a 42 mostram campos de corrente típicos das marés vazante e enchente respectivamente, indicando a distribuição de velocidades e direções médias assumidas pelas correntes de maré nestes instantes. A indicação dos instantes na série temporal de elevação de maré e correntes está esquematizada na Figura 38. Por se tratar de um modelo 2DH, os valores de velocidade e direção das correntes são relativos a toda a coluna d'água, representando sua média. Foram verificadas velocidades mais acentuadas no canal principal, especialmente no estrangulamento da baía, com valores de até 2,00 m/s na vazante e 1,90 m/s na enchente.

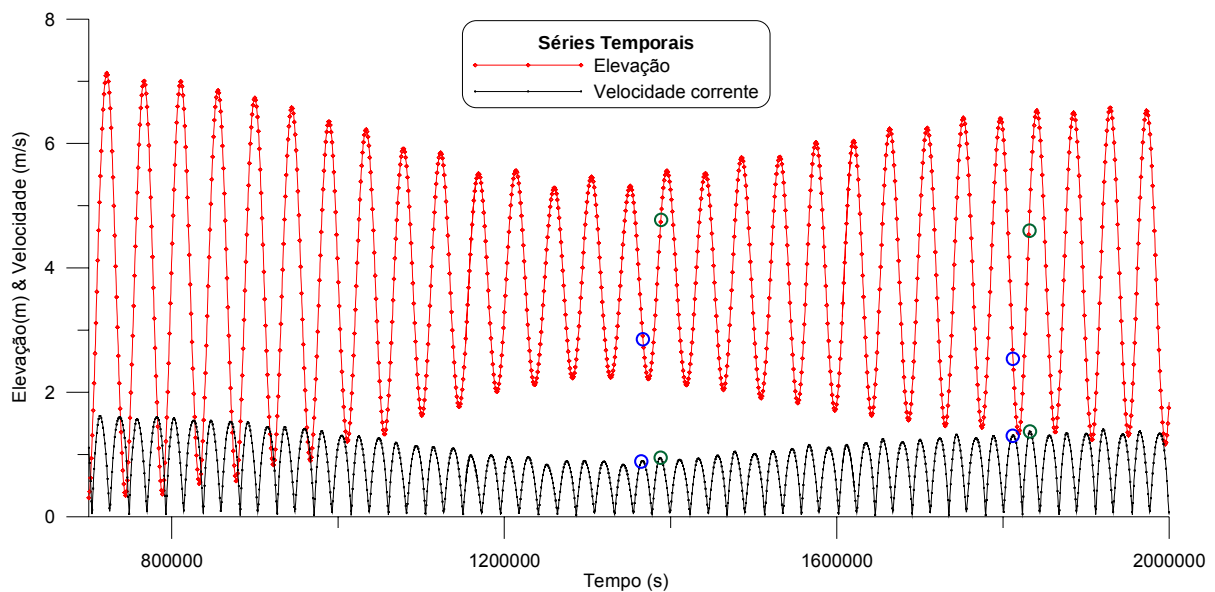


Figura 41: Instantes selecionados para apresentação das Figuras 39-42, correspondentes a enchente (azul) e vazante (verde) para condições de sizígia e quadratura

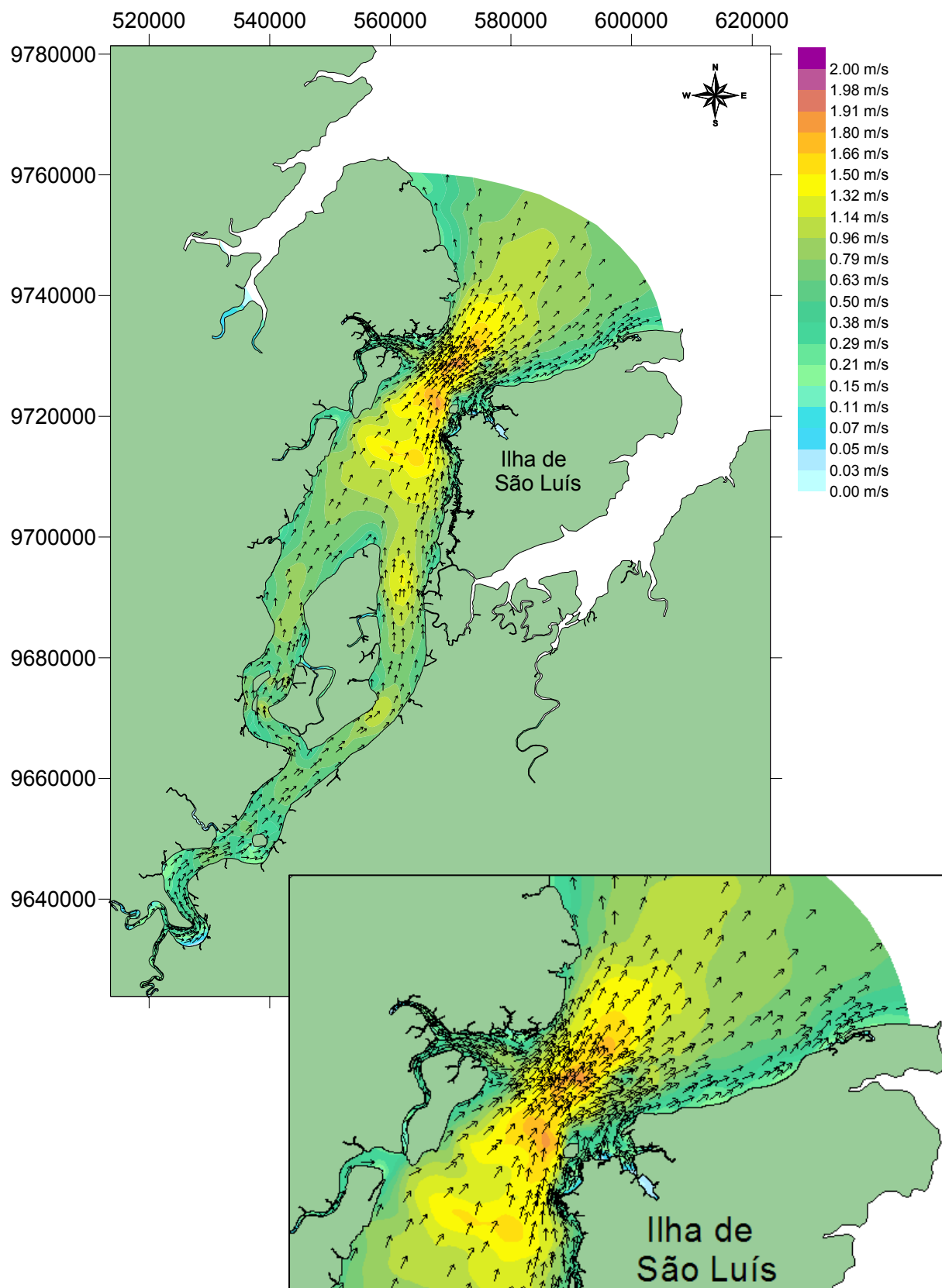


Figura 42: Campo de correntes típico da maré vazante

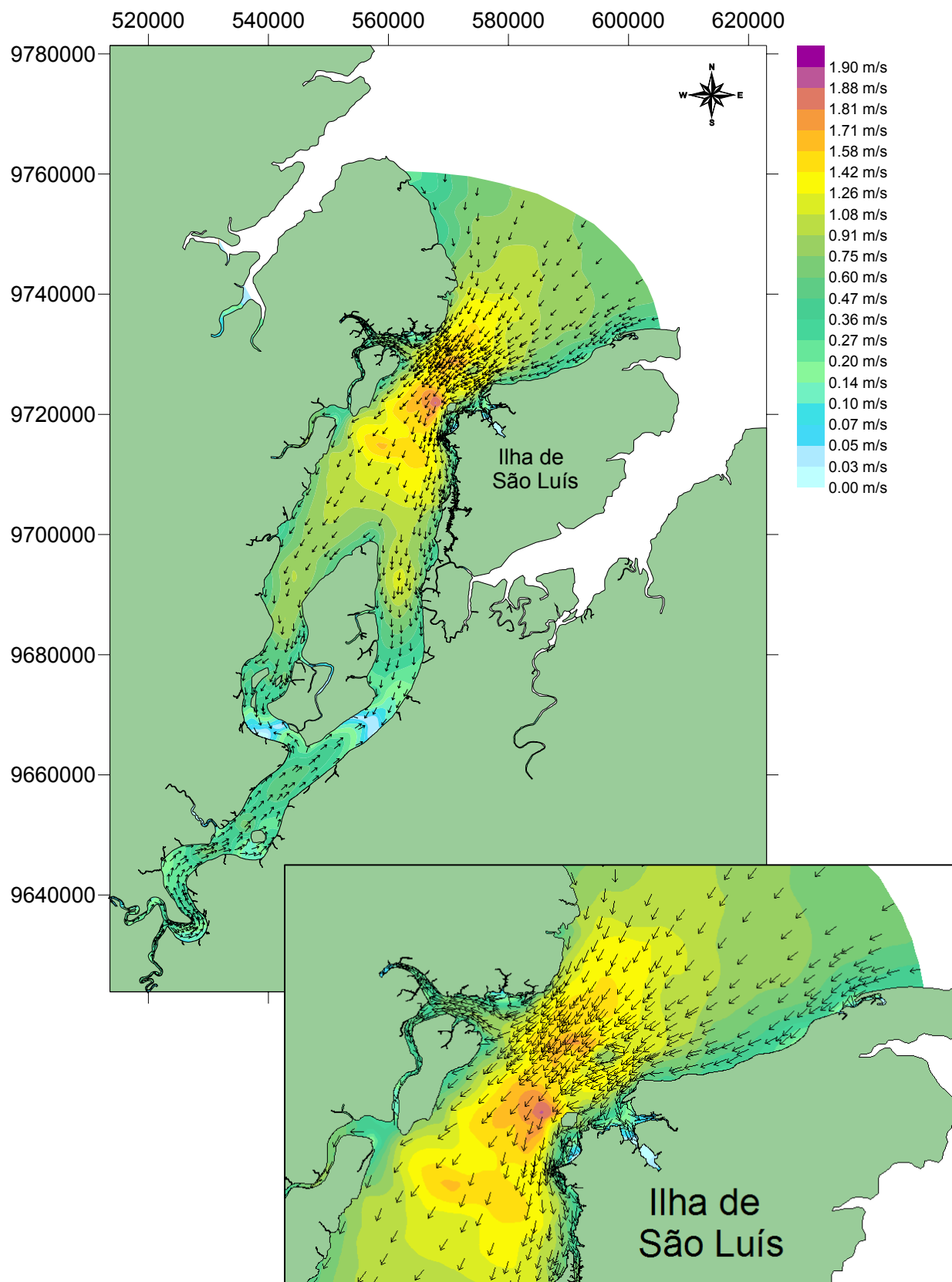


Figura 43: Campo de correntes típico da maré enchente

A propagação da maré na baía de São Marcos é afetada principalmente pela sua morfologia de confinamento lateral e redução das profundidades, o que resulta na concentração de energia em forma de grandes amplitudes e fortes correntes de maré. A velocidade destas correntes tende a ser amplificada à medida que a maré se propaga na baía, partindo da desembocadura e atinge maiores velocidades no estrangulamento entre Alcântara e a Ilha do Cajual e as Pontas de São Marcos e da Madeira. Em direção ao sul da baía, as velocidades perdem intensidade devido à redução crescente de profundidade e ao atrito do fundo associado. Na Figura 44, pode ser observada a amplificação da velocidade de corrente comparando uma série temporal para um nó localizado na desembocadura (P3) e outro localizado no referido estrangulamento próximo as instalações portuárias da Ponta da Madeira (P4).

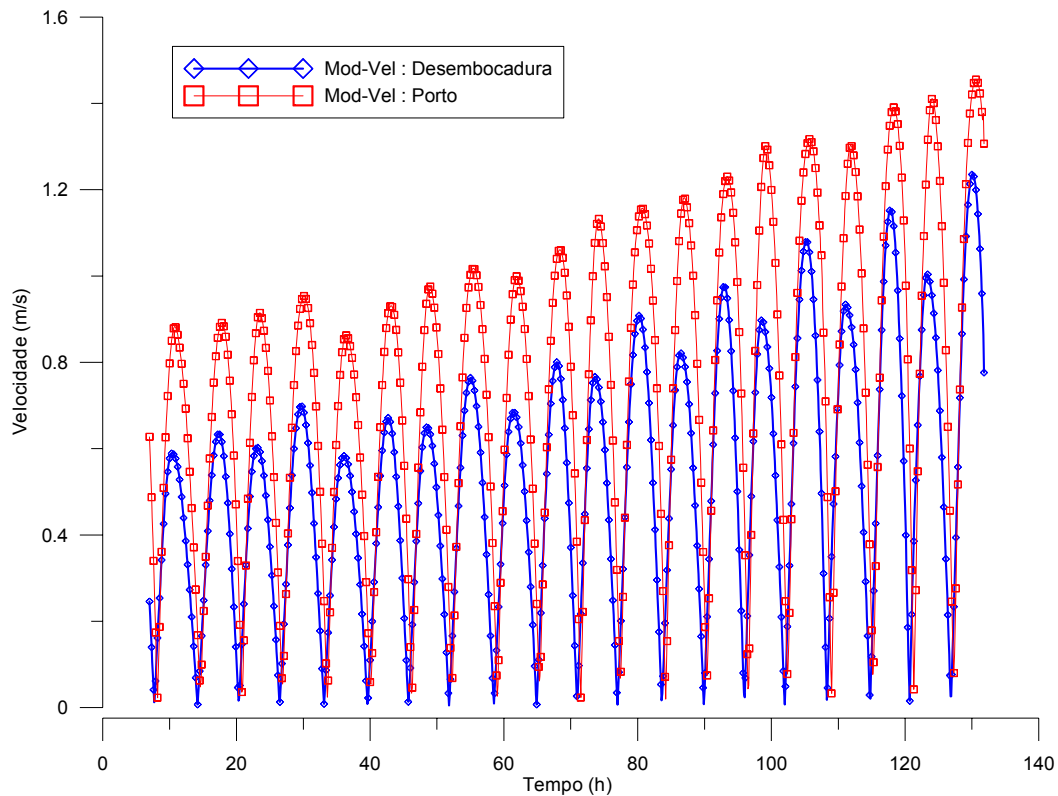


Figura 44: Amplificação das velocidades de corrente na região portuária P4

A Figura 45 mostra a intensificação da velocidade da corrente em função da altura de maré que está se propagando no estuário. Foram comparadas neste caso as alturas de 3,1, 4,4 e 5,6 metros, representativas das frequências de ocorrência de 20%, 50%, 20% respectivamente. Também pode ser observado na Figura 45, que as velocidades máximas de enchente e vazante não ocorrem no mesmo instante do ciclo de maré para diferentes amplitudes. Isto significa que a característica de onda mista de

maré sofre pequenas variações de fase para diferentes amplitudes de maré, contribuindo para a complexidade da assimetria da maré.

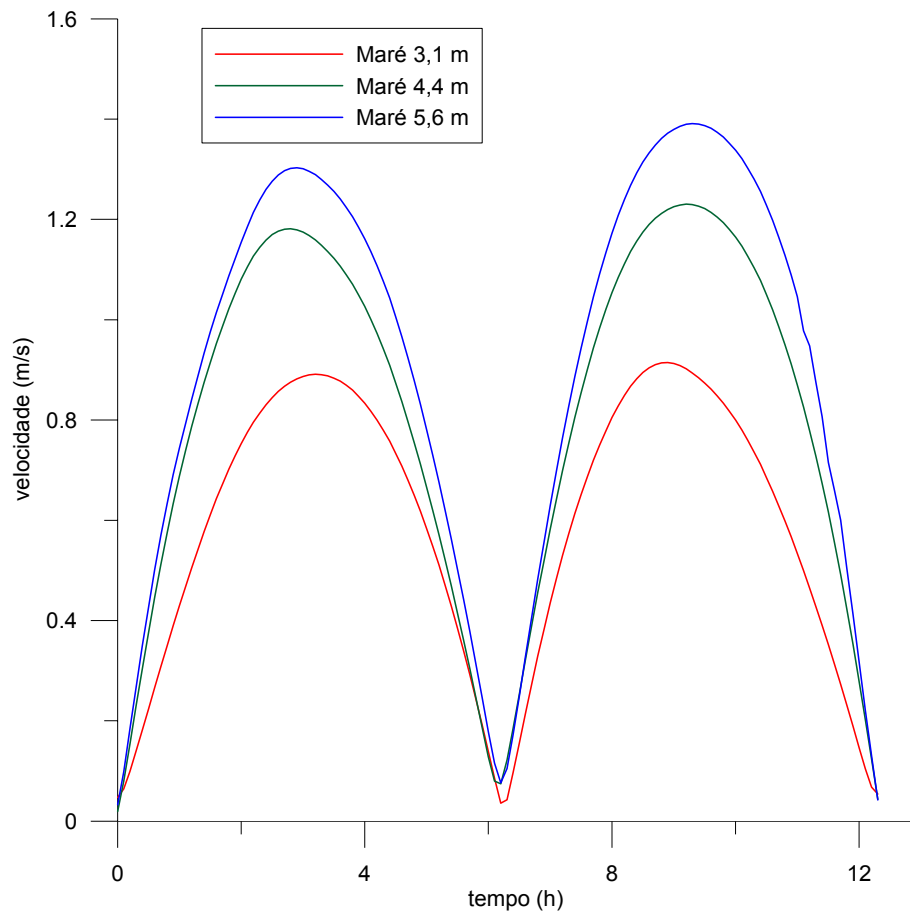


Figura 45: Intensidade da velocidade da corrente em função da variação de maré

c) Simulação somente com a maré utilizando modelagem 3D

Nesta simulação foi utilizado o modelo tridimensional analítico-numérico, que é uma opção computacional mais eficiente no SisBaHiA, considerando apenas a aceleração advectiva no módulo 2DH e segundo a Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN, 2011):

“Nesta opção, os perfis de velocidade são computados através de uma solução que é função das velocidades 2DH promediadas na vertical, elevação da superfície livre, rugosidade equivalente de fundo do módulo 2DH, e da velocidade do vento atuando na superfície livre da água.”

Através do modelo 3D é possível obter resultados para a corrente em diferentes camadas da profundidade e, desta forma, compreender a distribuição das velocidades ao

longo da coluna d'água. Foram selecionadas 5 camadas ao longo da profundidade, a partir das quais foi possível avaliar as influências da superfície livre e do fundo na intensidade da corrente. A Figura 46 mostra as velocidades da corrente simuladas em três camadas: superfície, 2 abaixo e 3 abaixo durante dois ciclos de maré para um nó no canal principal da desembocadura da baía. As diferenças no módulo da velocidade das correntes é de 6,7% e 7,2% entre a superfície livre e 2 camadas abaixo e entre esta e 3 camadas abaixo respectivamente. Na quarta camada abaixo, que é o fundo, a velocidade é constante igual a zero.

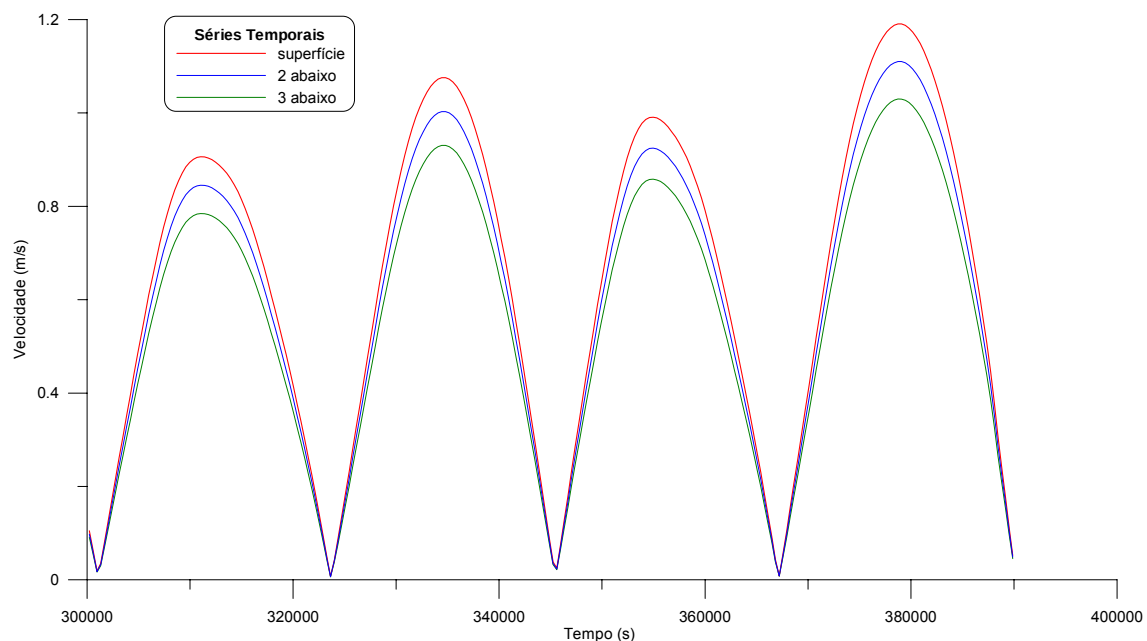


Figura 46: Velocidades ao longo da profundidade do nó localizado na desembocadura

A Figura 47 apresenta a velocidade das correntes ao longo de três ciclos de maré, mostrando a variação da sua intensidade desde a superfície livre até o fundo. É possível observar a influência dos ciclos semidiurnos na velocidade, bem como a influência da passagem da maré de quadratura, na qual as velocidades máximas chegaram em 1,0 m/s, para a sizígia, com velocidades de até 1,6 m/s.

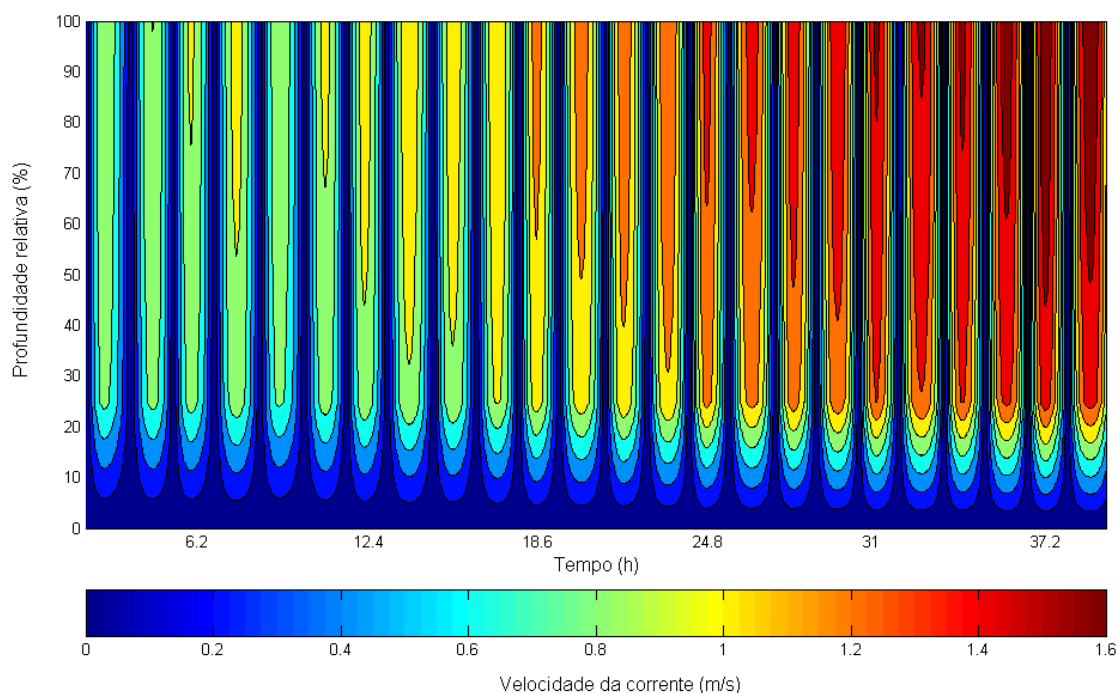


Figura 47: Variação das velocidades da corrente na profundidade ao longo de três ciclos de maré

d) Influência do vento

As características da circulação na baía de São Marcos são predominantemente influenciadas pela grande variação de maré, responsável pela formação de fortes correntes, que podem ultrapassar 3 m/s. Contudo, condições de ventos moderados podem ser significativas na indução da circulação em estuários, especialmente nas camadas mais superficiais, o que foi o propósito da investigação desta simulação.

O SisBaHiA permite que várias opções de entrada das condições de vento possam ser escolhidas entre: permanente e uniforme, variável e uniforme, prescrição através de registros temporais, de estações meteorológicas ou ainda diretamente nos nós. Neste caso, optou-se pela prescrição de um vento moderado e constante de 8 m/s com a direção de 45° em relação ao eixo x, o que corresponde aproximadamente a mesma direção das correntes de vazante na desembocadura da baía de São Marcos. Desta forma, os ventos estariam a favor do escoamento de vazante e se opondo à enchente, situação esta bastante frequente verificada nesta região. A Figura 48, retirada da Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN, 2011), ilustra bem a relação entre a orientação do vento e o escoamento ao longo da profundidade.

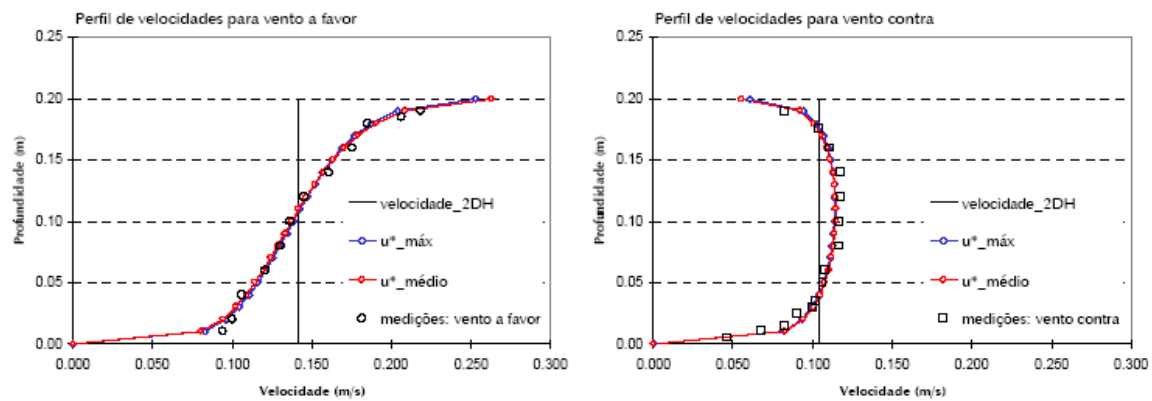


Figura 48: Influência da orientação do vento, (a) a favor (b) contra, na circulação ao longo da profundidade

A Figura 49 apresenta um resultado desta simulação para um ciclo de maré, comparando com a situação na qual o vento não foi prescrito no modelo. Pode ser observada a contribuição do vento na corrente de vazante (à esquerda) e a redução na corrente de enchente (à direita). O incremento e redução da velocidade da corrente foi menor que 1%, o que significa dizer que embora na situação real a contribuição seja de maior magnitude, esta não é significativa frente a influência da maré nas correntes.

Outro aspecto relevante deve-se ao fato da modelagem 2DH calcular a média das velocidades da corrente ao longo da coluna d'água, o que acaba por distribuir a influência do vento na profundidade, mesmo tratando-se de um efeito de superfície. De maneira semelhante, a modelagem 3D analítico-numérica, devido a sua concepção numérica, é interdependente do modelo 2DH, no qual, segundo a Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN, 2011): “As tensões de atrito no fundo para o cálculo do escoamento 2DH depende dos perfis de velocidade 3D, que por sua vez, dependem da solução do escoamento 2DH”. Por esta razão, situações que estejam relacionadas a fortes variações nos termos advectivos, como neste caso a contribuição do vento na camada superficial, apresentam melhores resultados quando modeladas em modelo 3D geral, isto é, com o seu esquema numérico desacoplado do modelo 2DH.

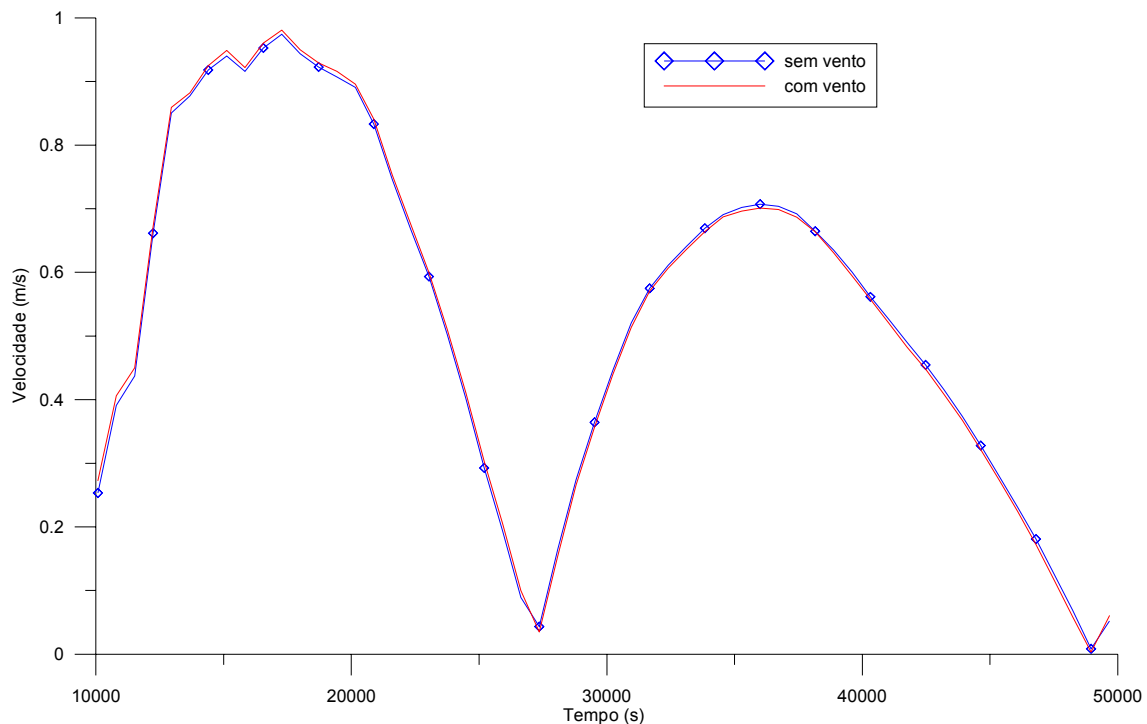


Figura 49: Comparação das correntes de maré considerando situações de vento permanente e uniforme de 8 m/s e direção de 45° e sem vento

e) Simulação associando as marés e as descargas fluviais dos rios Pindaré e Mearim-Grajaú

Conforme discutido anteriormente, vários fatores podem ser responsáveis por permitir o aparecimento de padrões assimétricos da maré no interior de estuários. Dentre esses fatores, efeitos complexos decorrentes da geometria e topografia do estuário e das interações de componentes de águas rasas podem ser representados no modelo através da elaboração cuidadosa do domínio de modelagem, linha de costa, batimetria, rugosidade e prescrição das componentes harmônicas incluindo as de água rasa. No caso da baía de São Marcos, existem outros elementos peculiares que definem as transformações sofridas pela maré e correntes ao longo da sua propagação no estuário, como a formação de imensas planícies de maré ao longo das margens, por muitas vezes, associadas a manguezais e a descarga fluvial de inúmeros rios em toda a sua extensão.

Neste sentido, procurou-se introduzir as descargas fluviais dos principais rios formadores da baía, que apresentam as maiores vazões contribuintes da baía: a dos rios Pindaré e Mearim-Grajaú. A prescrição das vazões dos rios na malha foi realizada utilizando o conceito de vazão distribuída, i.e., a vazão total do rio dividida pela largura

da seção, fornecida em $\text{m}^3/\text{s.m}$ ou m^2/s . Este valor de vazão distribuída é associado aos nós que compõe a seção do rio e o modelo automaticamente calcula a vazão naquela seção. O tipo de nó de fronteira de terra também deve ser alterado para os tipos definidos para reprodução de vazão em rios, como o tipo 3, 6 e 9.

Para a situação de estiagem dos rios, os valores foram obtidos em Montes (1997), correspondendo a $38,6 \text{ m}^3/\text{s}$ para o Mearim e $32 \text{ m}^3/\text{s}$ para o Grajaú. Estas vazões foram linearizadas para os valores de $-0,162 \text{ m}^2/\text{s}$ para o Mearim e $-0,216 \text{ m}^2/\text{s}$ para o Grajaú, considerando as áreas das seções transversais dos rios neste ponto. Enquanto para a situação de cheia dos rios, os valores adotados foram de $337 \text{ m}^3/\text{s}$ para o Mearim e $493,7 \text{ m}^3/\text{s}$ para o Grajaú, linearizadas a partir das seções transversais dos rios para $-41,53 \text{ m}^2/\text{s}$ para o Mearim e $-66,58 \text{ m}^2/\text{s}$ para o Grajaú. Os sinais negativos representam que as vazões estão no sentido de fora para dentro do modelo.

Os prismas de maré ao longo do tempo foram calculados pelo modelo para a seção transversal equivalente à fronteira aberta (Ponto 3) e junto à confluência dos rios Pindaré e Mearim (Ponto 6), constantes nas Figuras 50 e 51, respectivamente.

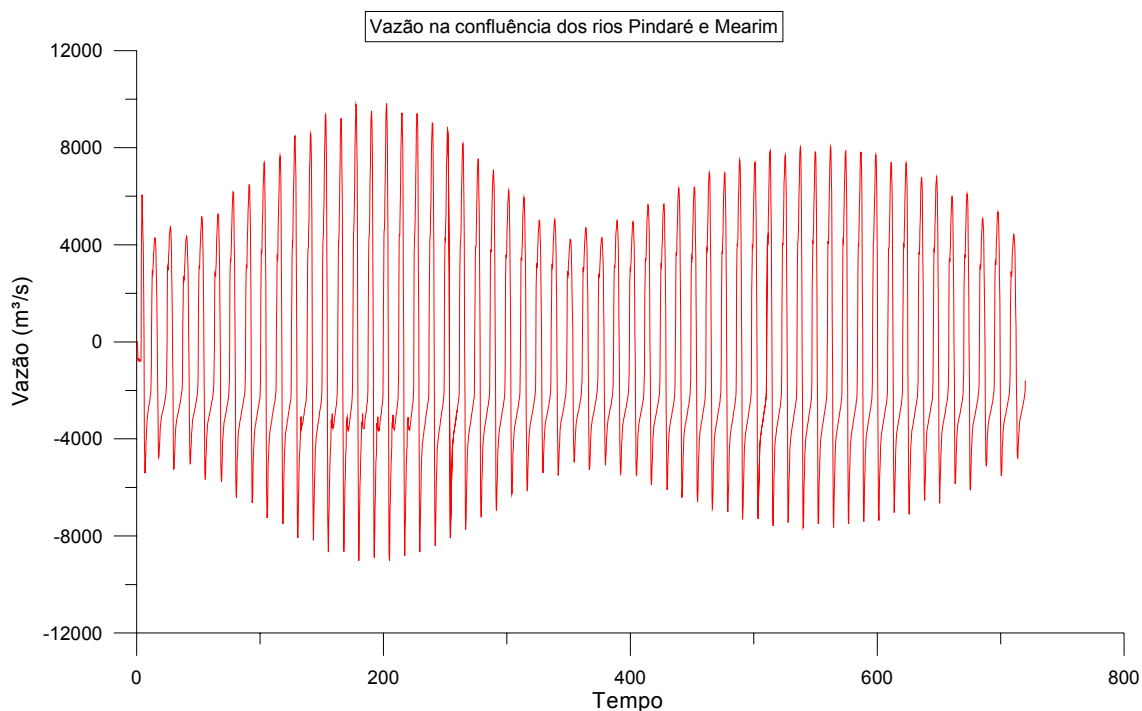


Figura 50: Prisma de maré junto à confluência dos rios Pindaré e Mearim P6

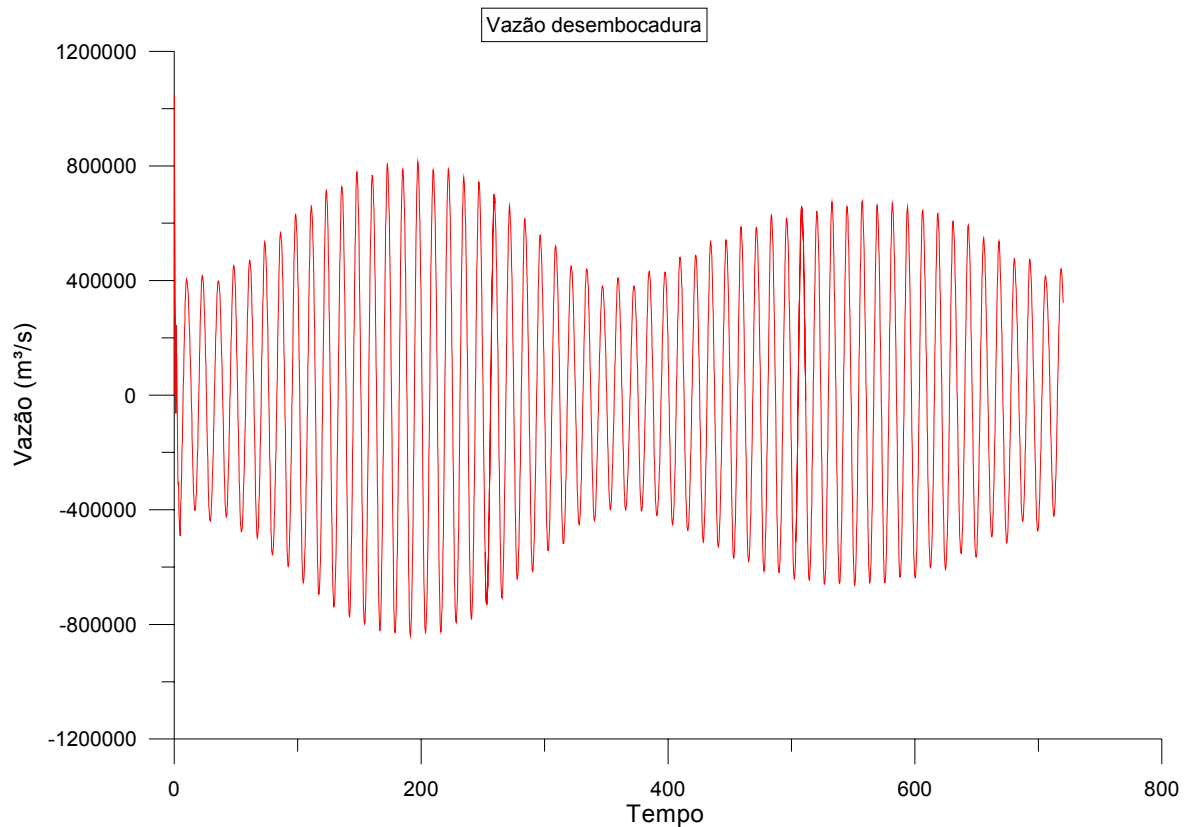


Figura 51: Prisma de maré na desembocadura na estação P3

Pode ser observado a partir destes resultados, que o aporte de água doce na baía promovido pelos rios Pindaré e Mearim da ordem de $800 \text{ m}^3/\text{s}$ na época de cheia é insignificante, uma vez que junto à confluência dos dois rios, o prisma de maré é da ordem de 4.000 a $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$ para condições de quadratura e sizígia. Na desembocadura da baía de São Marcos no oceano Atlântico, o prisma de maré trocado é da ordem de $400.000 \text{ m}^3/\text{s}$ na quadratura e $800.000 \text{ m}^3/\text{s}$ na sizígia.

O escoamento residual é obtido através da promediação das correntes em um longo período de tempo, cobrindo vários ciclos de maré. De acordo com ZIMMERMAN (1981) este escoamento residual é induzido por interações não-lineares da propagação da maré com a batimetria variável, ocasionando sobremarés e marés compostas, que, por sua vez, podem gerar assimetrias na maré, mudanças na elevação da maré e transporte de materiais. Devido a essa não linearidade, modelos numéricos são utilizados frequentemente para investigar o campo de escoamento residual em regiões costeiras. Nesta simulação foi realizado o cálculo do escoamento residual ao longo de um mês sem considerar descargas fluviais e considerando as vazões de cheia do rio Mearim e Pindaré. O campo de velocidades de corrente residual está apresentado nas Figuras 52 e 53, respectivamente sem e com influência da descarga fluvial.

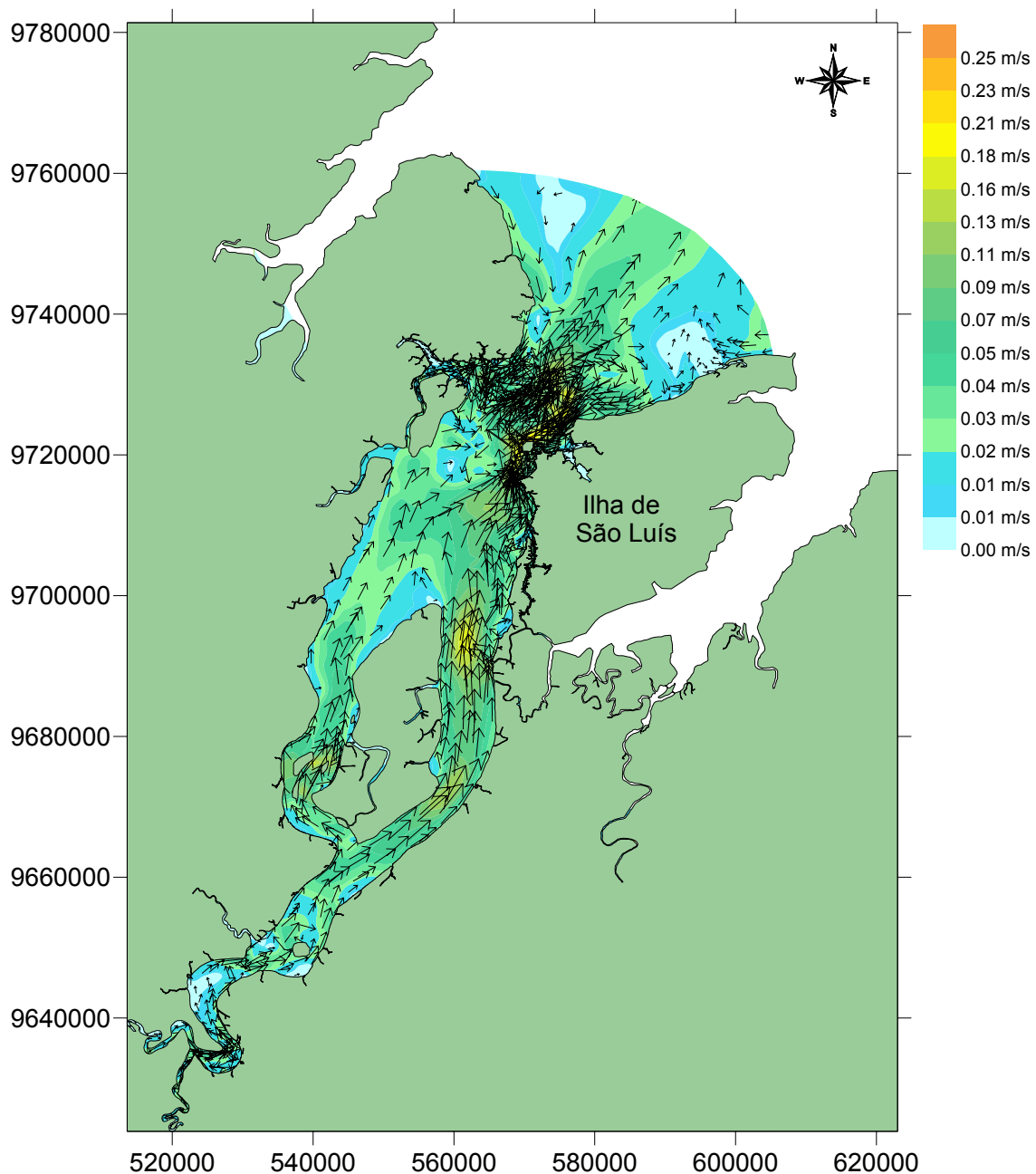


Figura 52: Escoamento residual ao longo de 1 mês sem considerar descargas fluviais

Adicionalmente às interações não-lineares causadas pela maré e a batimetria, as descargas fluviais também contribuem no escoamento residual. A partir da comparação entre as Figuras 52 e 53, pode ser observado o campo de correntes residuais sem considerar quaisquer descargas fluviais e o mesmo campo quando influenciado pelas vazões de cheias dos maiores afluentes, rios Mearim e Pindaré.

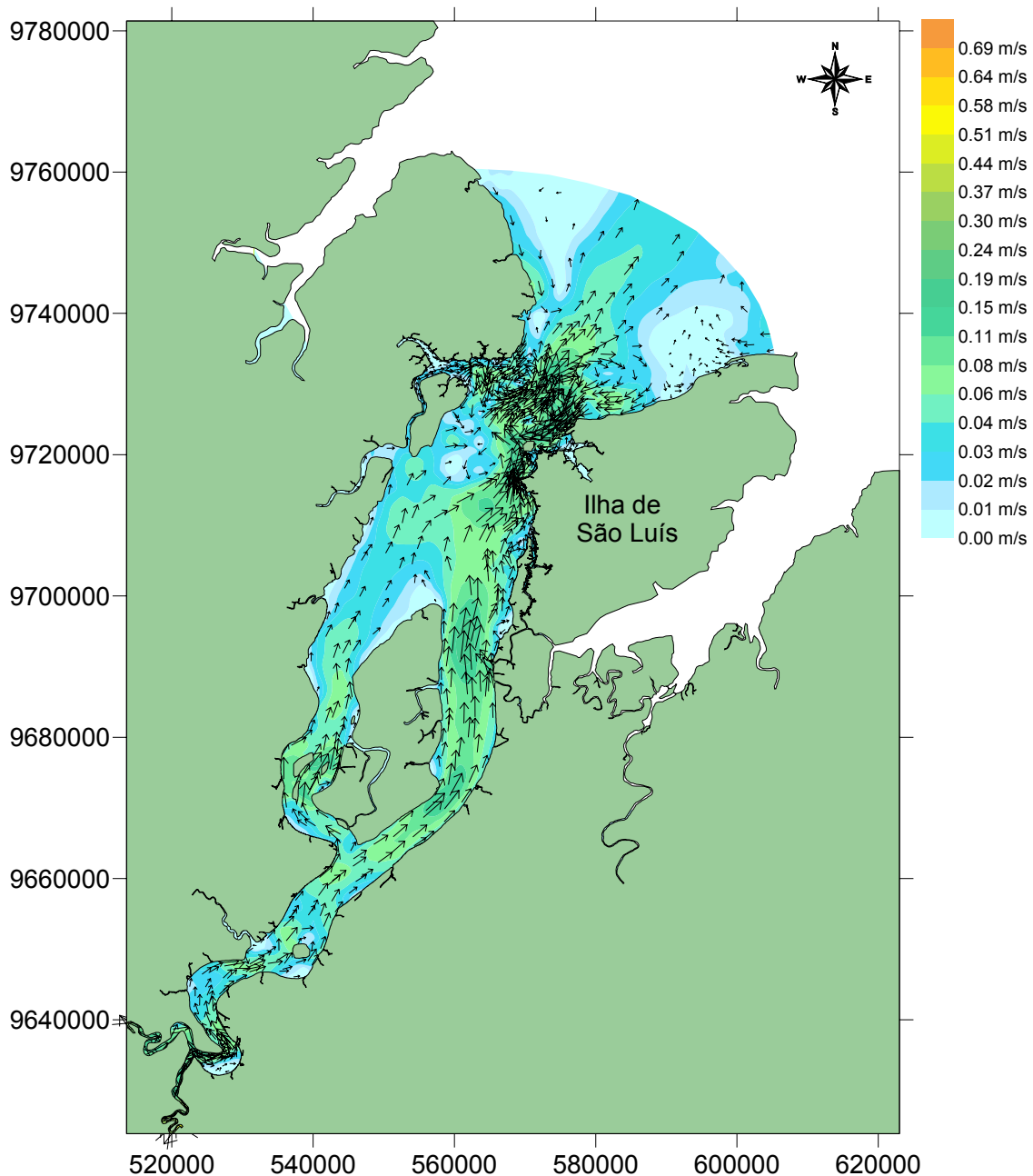


Figura 53: Escoamento residual ao longo de 1 mês considerando as vazões de cheia dos rios Mearim e Pindaré

Pode ser constatado a partir da Figura 53, que o incremento das velocidades de corrente residual é da ordem de 20 cm/s para 60 cm/s, próximo a confluência dos rios Mearim e Pindaré, no extremo sul da baía e de menos de 5 cm/s no restante da baía. O escoamento residual ocorre principalmente no canal principal, no qual a direção para o exterior da baía é bem definido, enquanto nas regiões mais rasas a direção é diversa e a velocidade é extremamente baixa.

f) Modelo 3D associando condições de marés, ventos e descargas fluviais

Finalmente, nesta simulação foi realizada a combinação dos forçantes anteriores: componentes harmônicas de maré, vento permanente e constante com a mesma orientação da vazante (frequente na região) e descargas fluviais de cheia dos principais afluentes Mearim e Pindaré. A simulação foi rodada em modelo 2DH e 3D, com o objetivo de comparação com os experimentos anteriores. A combinação de forçantes conforme introduzida nesta simulação torna a modelagem mais realística, procurando reproduzir não só qualitativamente, como quantitativamente, os dados registrados disponíveis.

Conforme mencionado na Seção 4.1, a influência da propagação da macromaré na região da baía de São Marcos é responsável praticamente por toda a circulação das correntes na baía. A contribuição de ventos moderados a fortes é negligenciável na intensificação/ redução das correntes, conforme mostrado através do experimento citado no Item 5.5 (d). Por outro lado, as descargas fluviais dos rios Mearim e Pindaré causam influência significativa somente junto à sua confluência com a extremidade sul da baía e, se torna mais notável em relação a sua contribuição ao escoamento residual.

Na Figura 54, uma série temporal de velocidades de corrente em Itaqui (correspondente a P4) extraída da camada superficial da simulação considerando a combinação dos forçantes e outra extraída da simulação que considerava somente a maré é apresentada. Pode ser observada a diferença da intensidade das correntes entre as duas simulações, principalmente para as velocidades mais baixas, que têm discrepâncias da ordem de 40%, sendo ainda maiores para a estufa de enchente do que para a de vazante. Para as velocidades de pico, as diferenças são de aproximadamente 13%. Estas diferenças podem ser explicadas devido à contribuição do vento e ao grau de liberdade dado à camada superficial, pois esta é computada separadamente das outras camadas na simulação tridimensional.

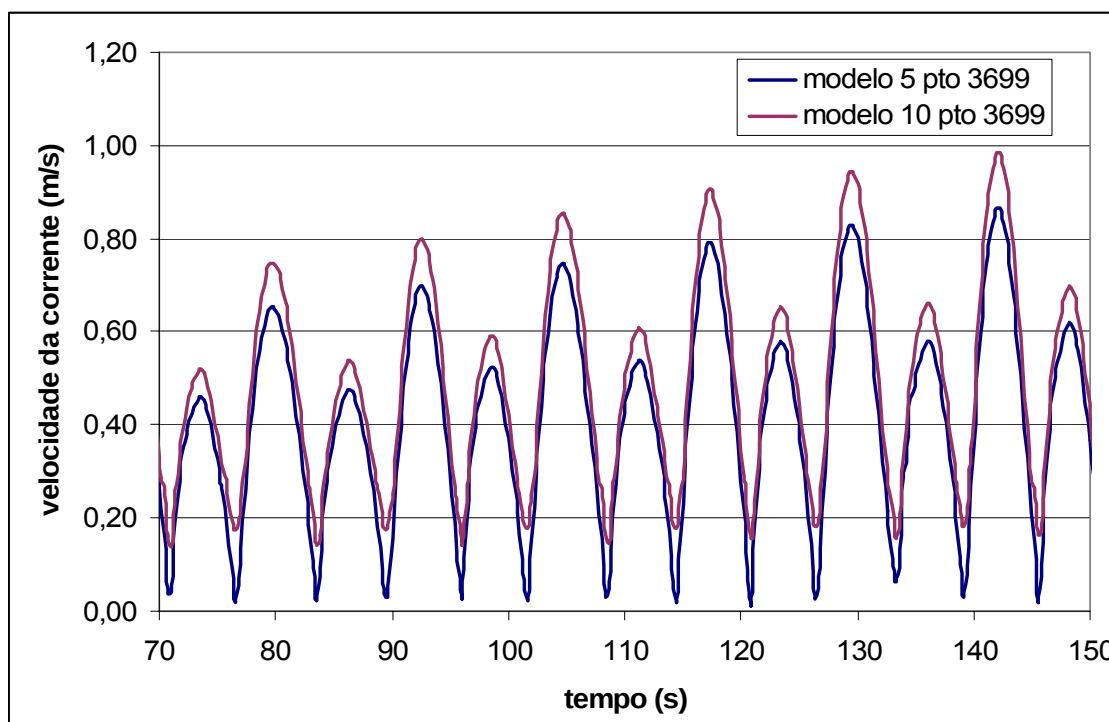


Figura 54: Comparação entre as simulações somente com maré e com a combinação das forçantes para uma série temporal de velocidades de corrente no ponto 4

As diferenças do vetor velocidade das correntes entre a simulação que somente considerava a maré como forçante e aquela simulada em modelo 3D combinando as contribuições de todas as forçantes estão apresentadas espacialmente no mapa da Figura 55. As direções do vetor velocidade são as mesmas nas duas simulações, enquanto a intensidade é ligeiramente maior na simulação com a combinação das forçantes (vetor em vermelho).

Como conclusão, diferentes simulações numéricas foram realizadas e tiveram como objetivo avaliar os mecanismos de circulação na baía. Os resultados aqui apresentados mostraram que realmente as grandes variações de maré são o principal mecanismo na formação das fortes correntes observadas na baía. A partir da simulação somente considerando a maré como forçante, pode ser feita a caracterização da baía de São Marcos. Foram demonstradas características como a amplificação das marés e atraso de fase na sua propagação para o interior da baía, as elipses de maré de forma unidirecional na parte norte e mais rotativa em direção ao sul e a característica de maré mista em relação à estacionariedade da onda de maré. Também foi mostrado que existe um incremento da velocidade da corrente dependendo da altura da maré que se propaga no estuário.

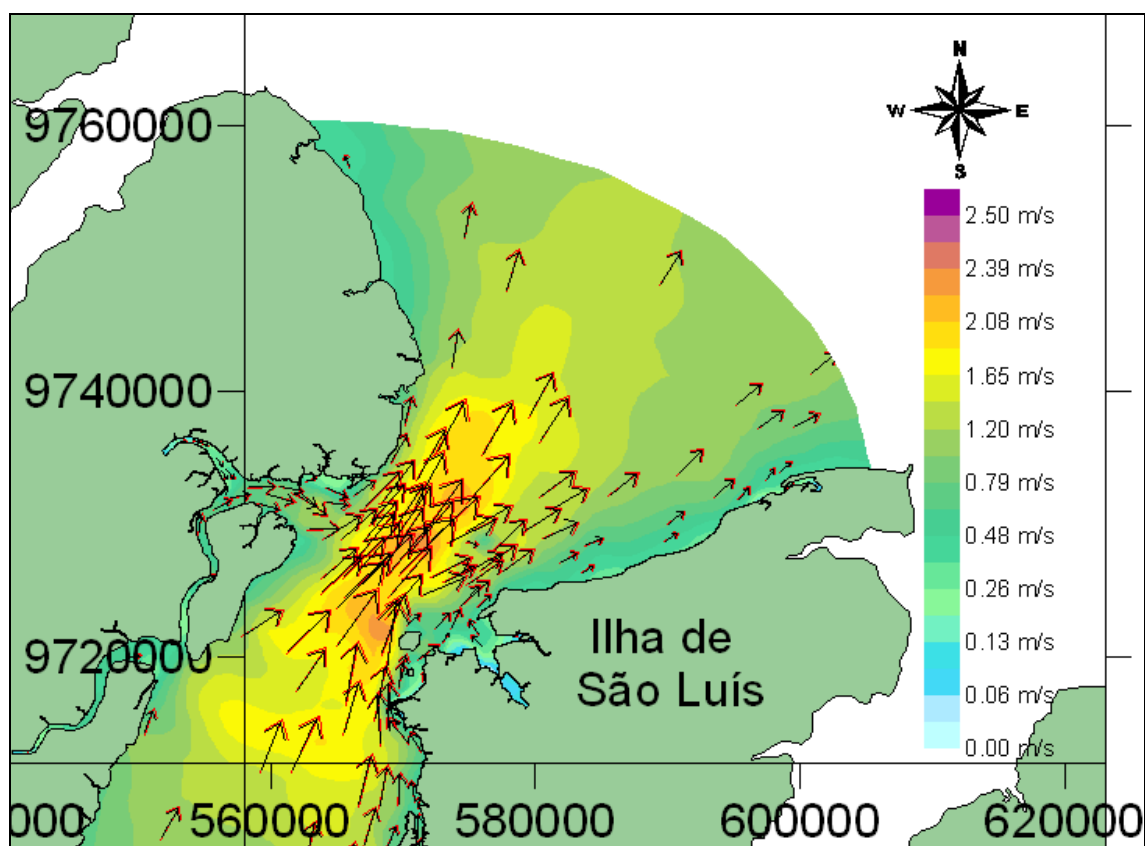


Figura 55: Diferenças no campo de velocidades entre a simulação da combinação das forçantes (vetores em vermelho) e aquela utilizando somente a maré (vetores em preto)

O experimento considerando um vento constante de intensidade de 8 m/s indicou que não há influência significativa na magnitude das correntes. As contribuições dos maiores afluentes da baía, rios Mearim e Pindaré, têm efeito somente próximo às suas desembocaduras, no tocante a incremento de velocidade ou aporte de vazão de água doce. Também foi observada a contribuição desses afluentes no escoamento residual da baía. Adicionalmente, a modelagem tridimensional, realizada com 5 camadas, indicou que as camadas superiores apresentam um pequeno incremento em relação às inferiores, fato que deve ser melhor investigado através de medições locais.

6. RESULTADOS DA INTERFEROMETRIA *ALONG-TRACK* SAR

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados obtidos da aplicação da técnica de medição de correntes por interferometria *along-track* SAR orbital para obtenção dos campos de velocidade na baía de São Marcos (Maranhão). O modelo M4S foi utilizado para computar as diversas simulações de imageamento SAR sobre a região de estudo, considerando diferentes cenários ambientais, como condições de intensidade e direção do vento e condições de maré enchente e vazante, assim como, diferentes parâmetros do sistema imageador SAR: frequência do radar, polarização, ângulo de incidência, distanciamento das antenas e efeitos de filtragem no pós-processamento.

Como dados de entrada no modelo M4S, foram utilizados campos de corrente provenientes da modelagem hidrodinâmica realizada com o SisBaHiA (Capítulo 5). O objetivo das simulações pretendidas aqui não é de executar a técnica de interferometria *along-track* SAR sobre imagens reais obtidas por satélite sobre a região de estudo, outrossim, testar diferentes condições de imageamento, tanto por parte de diferentes condições ambientais, como também diferentes configurações do sistema imageador SAR. Desta forma, a simulação foi realizada em ambiente numérico-computacional, através do modelo M4S, e necessitou da prescrição de um campo de correntes, que na ausência da verdade de campo, foram utilizados resultados instantâneos da modelagem hidrodinâmica.

As vantagens em se utilizar um modelo numérico de imageamento SAR, a exemplo do M4S, residem no fato de possibilitar a simulação de uma maior gama de condições e, assim, podendo servir como balizador para a aquisição das imagens reais, para avaliação da efetividade da interferometria aplicada a estas imagens e para orientação das características dos sistemas sensores SAR mais adequadas para o emprego da interferometria *along-track* SAR para medição de correntes.

6.1. DADOS DE ENTRADA NO MODELO M4S

Um campo de correntes instantâneo foi extraído dos resultados da modelagem hidrodinâmica no SisBaHiA, apresentada no capítulo 5, o qual é equivalente às fortes correntes associadas à maré vazante. Uma área menor da baía de São Marcos foi escolhida para ser a base de entrada no modelo M4S, a qual tem dimensões de 3,5 km por 5 km e abrange a parte externa da baía e sua conexão com o oceano Atlântico (Figura 56). Neste ponto, as correntes passam a ter sua orientação mais alinhada com a

direção leste-oeste, que é um dos requerimentos para sistemas imageadores SAR, pois possuem visada nesta mesma direção.

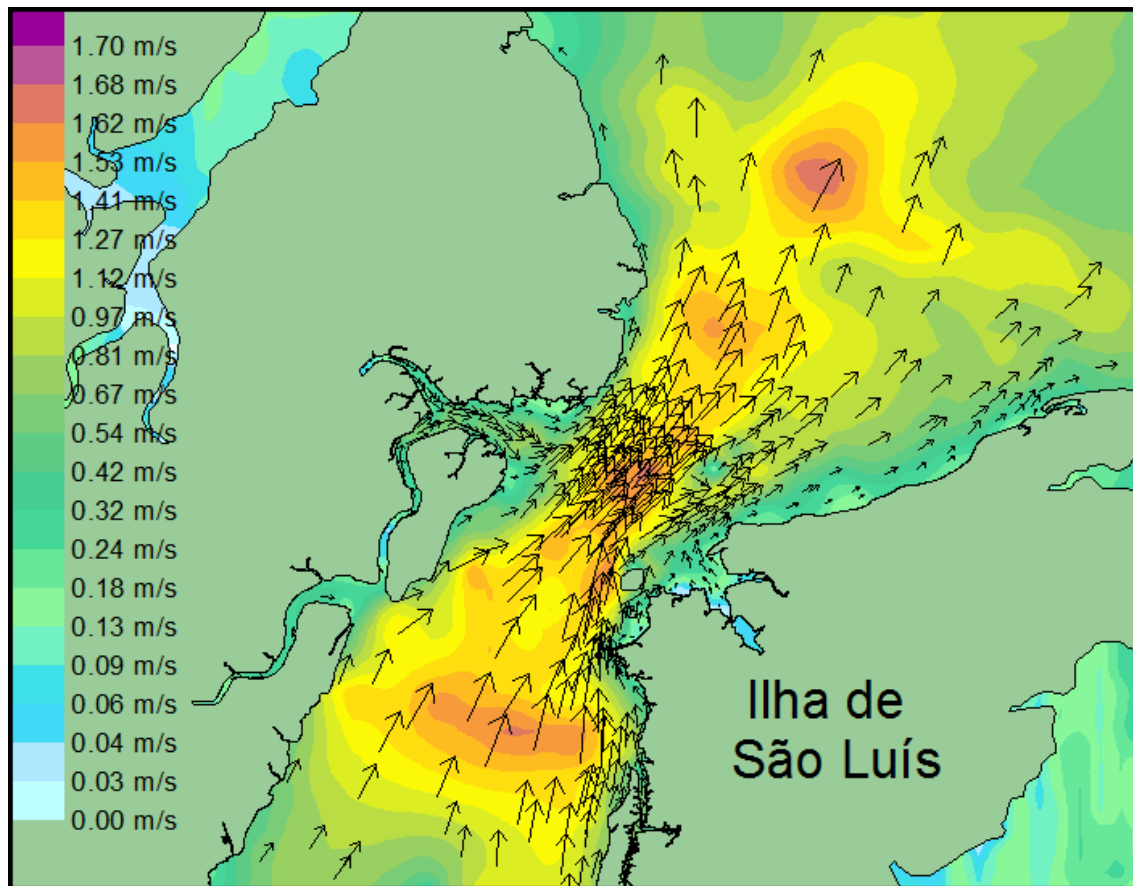


Figura 56: Área selecionada da baía de São Marcos para as simulações no M4S

O sistema de coordenadas teve que ser ajustado, uma vez que os elementos quadrangulares do SisBaHiA tinham diferentes tamanhos e formas e, por outro lado, o M4S utiliza um sistema de coordenadas cartesiano eqüidistante. Portanto, os dados foram reamostrados em pontos espaçados por 100 metros, tanto na direção longitudinal e transversal.

Outro ajuste estava relacionado aos pontos correspondentes a terra, os quais são incluídos nos cálculos do M4S e não devem afetar os resultados. Por esta razão, um algoritmo foi desenvolvido no Matlab a fim de que criasse uma transição suave a partir da água para a terra e, desta forma, evitando a formação de feições indesejáveis. A Figura 57 mostra o campo de correntes usado como entrada nas simulações, após os processos de reamostragem e suavização.

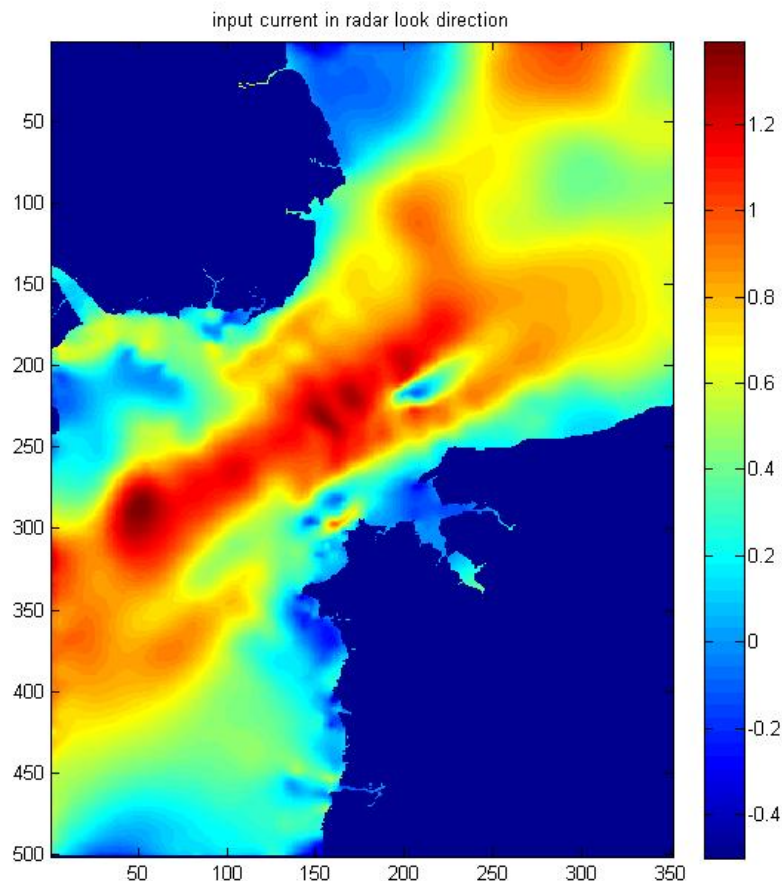


Figura 57: Campo de correntes de entrada (em m/s) na direção de visada do radar após os processos de reamostragem e suavização

O módulo de onda do M4S requer a entrada de campos de correntes e ventos para que possa gerar o espectro de ondas. O campo de correntes foi retirado dos resultados da modelagem hidrodinâmica no SisBaHiA e é equivalente ao instante 212.400 segundos, sendo a corrente mais forte da maré vazante, como mencionado anteriormente. Para as condições de vento, foi considerado um vento constante e homogêneo por toda a área, com 6 m/s de intensidade e orientado para a direção nordeste. Nas simulações seguintes, as condições de vento foram mudadas para 6 m/s direção SE e 10 m/s direção NE respectivamente. Adicionalmente, outras condições de correntes foram simuladas e serão descritas mais adiante. O principal objetivo dessas simulações foi de entender se estas condições ambientais e estes parâmetros de radar são favoráveis ao mecanismo de imageamento SAR, produzindo imagens efetivas para o processamento interferométrico de identificação das correntes oceânicas. Os parâmetros de radar usados no segundo modulo do M4S foram escolhidos para serem similares aqueles do radar embarcado do TerraSAR-X e estão enumerados na Tabela 1.

Tabela 11: Parâmetros de Radar usados

Parâmetros	Valores
Frequência do radar	9,65 GHz
Polarização do radar	VV
Ângulo de incidência	30, 45, 60°
Direção da visada	7°
Altitude da plataforma	514 km
Velocidade da plataforma	7.500 m/s
<i>Baseline</i> ATI efetiva	1,0 m e 3,0 m
Nº de visadas efetiva	1111
Ruído equivalente ao NRCS	-22 dB

O módulo de radar pode calcular diferentes produtos SAR e InSAR, considerando diferentes opções de cálculo definidas pelo analista. A componente horizontal das correntes é calculada diretamente do arquivo de entrada. A intensidade da imagem pode ser calculada em termos do NRCS para cada ponto da malha, utilizando somente as contribuições do modelo Bragg ou através do modelo de superfície compósita completo. Também, as intensidades SAR são computadas levando em conta os artifícios SAR, chamada de valor esperado, e, novamente computada, incluindo propriedades estatísticas relativas ao número de looks e ruído do instrumento, chamada de realização da medida. Os desvios Doppler, os valores correspondentes de velocidade e as larguras de banda Doppler também são calculados. Em relação às fases InSAR, estas também são calculadas como valores esperados e como realização das medidas, seguindo a mesma lógica do cálculo da intensidade SAR. Por fim, a coerência correspondente a função de autocovariância do sinal e relacionado aos valores esperados de fase e a velocidade InSAR derivada do interferograma podem ser fornecidos pelo modelo.

6.2. SIMULAÇÕES PARA FORTES CORRENTES NA MARÉ VAZANTE

Como ilustração dos cálculos executados pelo módulo de radar do M4S, são apresentadas as imagens com a velocidade Doppler obtida sem e com os artifícios introduzidos pelo SAR nas Figuras 58a e 58b e as diferenças de fase (interferograma), da quais serão derivadas as velocidades ATI-SAR, na Figura 59. Para efeito de

comparação, a componente horizontal da velocidade da corrente conforme prescrita no modelo está constante na Figura 57.

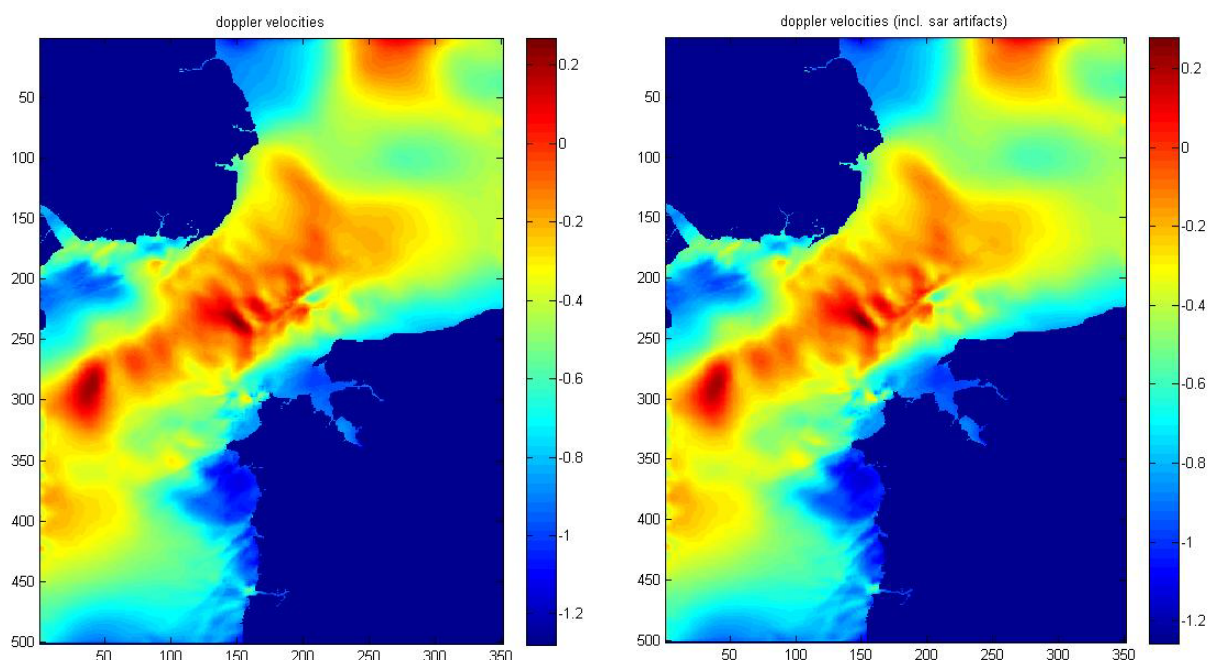


Figura 58: (a) Velocidades Doppler (em m/s) (b) Velocidades Doppler incluindo artifícios SAR (em m/s)

Devido ao fato do alvo estar em movimento, neste caso a superfície do mar, será causado na imagem SAR um desvio Doppler adicional àquele inerente ao artifício da abertura sintética. Este desvio Doppler será proporcional à velocidade do alvo na mesma direção da linha de visada do satélite. A interferometria *along-track* SAR explora a possibilidade de se detectar o *offset* Doppler, através da combinação de duas imagens SAR complexas adquiridas com um pequeno atraso de tempo, correspondente a separação das duas antenas imageadoras (ROMEISER & THOMPSON, 2000).

As velocidades Doppler (Figura 58a) refletem o *offset* Doppler causado na imagem SAR, uma vez que existem movimentos na superfície do mar da baía de São Marcos, associados às correntes de maré e ondas geradas pelo vento. Na Figura 58b, foram incluídas no cálculo as propriedades estatísticas relacionadas ao número de looks e ruído do instrumento, que foram prescritos na entrada do modelo com o objetivo de tornar a simulação mais realística.

As diferenças de fase ATI (Figura 59) foram obtidas após a multiplicação complexa das duas imagens SAR interferométricas sintetizadas. A partir dos valores da

diferença de fase é possível derivar as velocidades da superfície do mar na mesma direção de visada do satélite, o que será apresentado nas Figuras 61, 63 e 64.

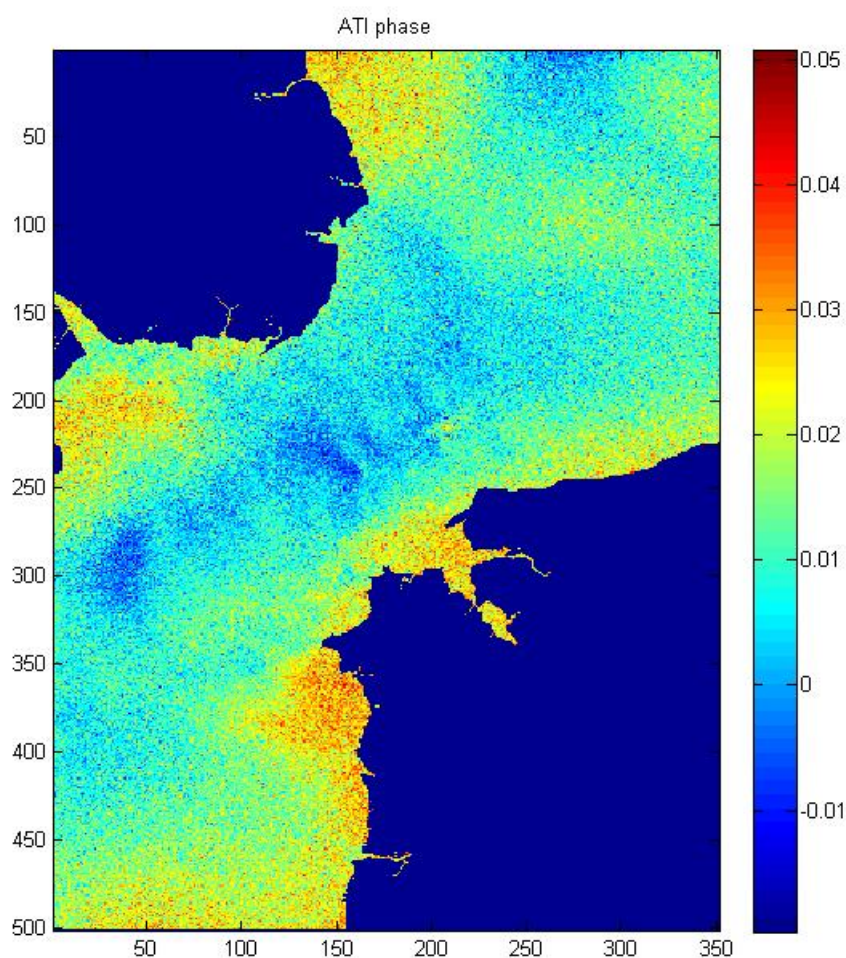


Figura 59: Interferograma com a diferença de fase ATI (em radianos)

A partir da conversão das fases ATI são obtidas as velocidades de deslocamento da superfície oceânica, logo para a detecção somente da contribuição das correntes na velocidade, faz-se necessário extrair os efeitos do movimento das ondas. Por este motivo, a conversão das diferenças de fase ATI em velocidade de corrente não é direta, embora, a técnica ATI-SAR se apresente muito mais linear, quando comparada a outros produtos gerados por sensores orbitais para medição de correntes.

Em ROMEISER *et al.* (2002), um algoritmo é recomendado para a detecção de correntes por ATI-SAR, que, diferentemente do algoritmo SAR, mostra que é possível a inversão direta da imagem real de diferença de fase gerando uma primeira aproximação do campo de correntes. Em paralelo, esta imagem de diferença de fase pode ser simulada em modelo numérico de imageamento SAR e comparada à imagem real, em

uma ferramenta de análise de dados e otimização. Este ciclo pode ser repetido iterativamente, até que seja obtido o campo de correntes verdadeiro. Outra vantagem do processamento ATI-SAR é que são fornecidos produtos adicionais, como imagens de intensidade SAR convencionais e imagens de coerência, esta a partir de mais processamento. Estes produtos podem ser usados para gerar informações adicionais e refinar o algoritmo de detecção de correntes.

Neste trabalho, as imagens de diferença de fase ATI foram convertidas em velocidades da superfície oceânica e, em seguida, foram descontados os efeitos do movimento das ondas para obtenção somente da velocidade das correntes, conforme a inversão direta recomendada no algoritmo mencionado. A conversão das fases ATI em velocidade foi efetuada através da multiplicação por um fator que leva em consideração a frequência do radar f_e , o ângulo de incidência θ e o atraso de tempo τ entre a aquisição das imagens e está descrita na Equação 46, reescrita novamente aqui:

$$\frac{\Delta v_{ATI}}{\Delta \phi} = \frac{c}{720 f_e \sin \theta} \frac{1}{\tau} \left[\frac{ms^{-1}}{(^{\circ})} \right]$$

Uma primeira aproximação do efeito causado pelo movimento das ondas na velocidade da superfície pode ser estimada através da ferramenta do M4S que calcula valores singulares de NRCS, *offset* e largura de banda Doppler para um determinado parâmetro de vento e de radar. Na verdade, o campo de correntes neste cálculo é tomado como zero e, então, a velocidade resultante da superfície oceânica somente teria a contribuição do movimento das ondas. Como saída, esta ferramenta do M4S fornece o *offset* Doppler em Hertz, que é convertido em velocidade em m/s através de fórmula semelhante à acima descrita. Conforme o algoritmo descrito acima, é desejável que se utilize outras fontes de dados externos ou a própria imagem simulada numericamente, associada a uma ferramenta de otimização de maneira iterativa para que se obtenha um melhor entendimento dos efeitos de onda e correntes no movimento total da superfície oceânica.

6.2.1. Efeitos de filtragem

Uma das mais importantes características dos produtos derivados no SAR a serem solucionadas está relacionada ao alto nível de ruído inerente ao instrumento. A razão sinal-ruído (SNR) pode ser aumentada através do processo de promediação entre os pixels, permitindo identificar melhor as fases ATI. Esse processo de promediação ou

filtragem pode ser feito utilizando uma janela que calcula a média dos pixels vizinhos. Entretanto, quanto maior é a janela da média, mais resolução espacial é degradada no processo. Por exemplo, para aplicações com o TerraSAR-X, o ruído do instrumento é muito alto, o qual pode ser reduzido pela promediação sobre vários pixels (ROMEISER *et al.*, 2009). Por outro lado, a resolução espacial alcançada pelos sistemas sensores SAR atuais e porvir permitirão que mais pixels de fase sejam promediados mantendo uma resolução espacial satisfatória.

A filtragem foi realizada sobre o interferograma usando uma janela de tamanho 3 x 3 pixels e repetindo o processo por 1, 5 e 10 ciclos iterativos. A vantagem em repetir a promediação iterativamente, ao invés de aumentar o tamanho da janela, se deve ao fato de que os pixels mais longe são incluídos com menor peso de ponderação no cálculo da média de um simples pixel, assemelhando-se a uma curva gaussiana. Na Figura 60, os efeitos da filtragem com diferentes ciclos de repetição podem ser observados.

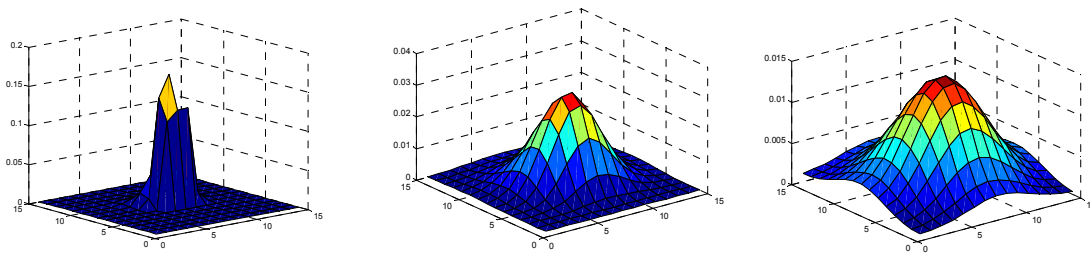


Figura 60: Efeitos de filtragem sobre os pixels (a) janela 3x3 em um ciclo de repetição (b) janela 3x3 em 5 ciclos (c) janela 3x3 em 10 ciclos

Na Figura 61, os efeitos resultantes da filtragem sobre a imagem com ângulo de incidência de 60° pode ser observada.

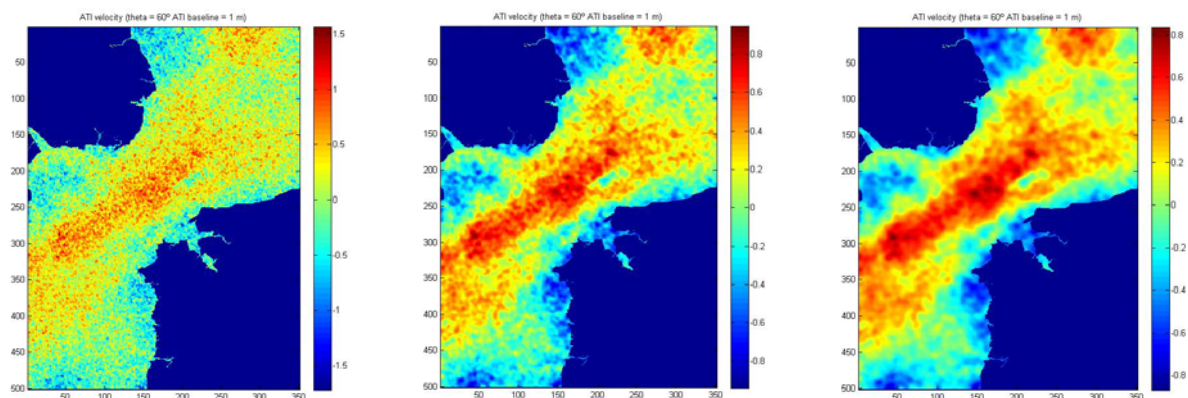


Figura 61: Efeitos resultantes da filtragem para a imagem com 60° de ângulo de incidência (a) 1 ciclo (b) 5 ciclos e (c) 10 ciclos (em m/s)

Como o processo de filtragem causa degradação na resolução especial, é importante definir até quando pode ser filtrada a imagem, evitando a degradação até uma escala espacial aceitável. O problema pode ser traduzido em termos de quantos pixels vizinhos devem ser incluídos ao longo do processo de filtragem no sentido de eliminar o ruído entre eles. Esta é uma solução de compromisso, na qual uma escala especial razoável deve ser preservado e, ao mesmo tempo, o ruído deve ser menos pronunciado.

Um exercício foi realizado usando uma das simulações obtidas com o M4S e o seu objetivo foi de indicar qual escala espacial a filtragem não melhora mais o SNR. As Figuras 62 a e b mostram os gráficos entre a escala x e a escala y (em pixels) e o incremento do SNR (medido através do coeficiente de correlação). A região de inflexão da curva indica o local geométrico onde o acréscimo do coeficiente de correlação entre as imagens de entrada e a proveniente do ATI-SAR não compensa mais o incremento das escalas de filtragem.

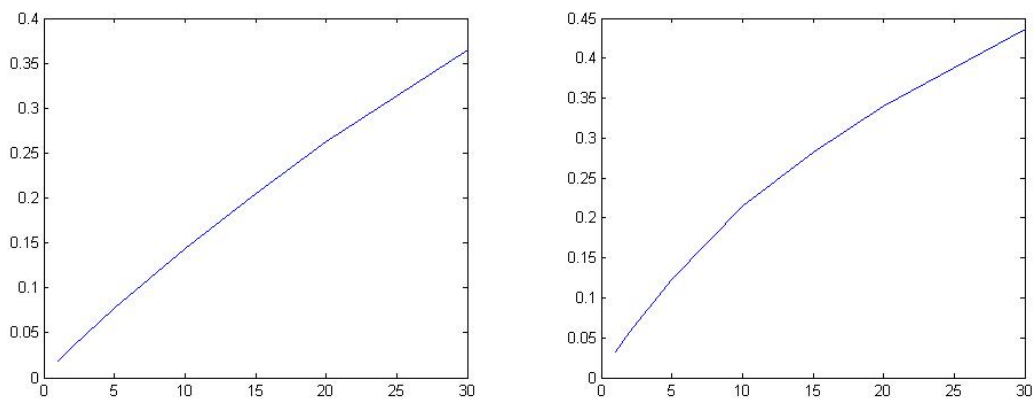


Figura 62: Incremento da correlação para diferentes escalas de filtragem (a) direção x (em pixels) (b) direção y (em pixels)

6.2.2. Efeito dos parâmetros de radar

Os principais parâmetros de radar requeridos para efetuar a ATI-SAR são: frequência do radar, polarização, ângulo de incidência, distanciamento das antenas ou *baseline along-track* entre outros.

Para ângulos íngremes, a contribuição da componente vertical dos movimentos da onda afeta a modulação hidrodinâmica, resultando em não-linearidades ao mecanismo de imageamento. Por outro lado, para ângulos de incidência maiores o NRCS diminui e, também, o SNR e a coerência. No sentido de encontrar o ângulo de

incidência mais adequado para aplicação da técnica ATI-SAR, as simulações com o M4S incluíram casos de 30°, 45° e 60° de incidência.

Em relação à polarização do radar, foi enunciado por ROMEISER & THOMPSON (2000) que é possível obter melhor SNR na polarização VV ao invés da HH, tratando-se de medições sobre a superfície do mar. Por esta razão, todas as simulações consideraram apenas o caso da polarização VV.

No sensoriamento remoto dos oceanos, as frequências de radar preferenciais estão associadas às bandas X (3 cm), C (5 cm) e L (11 cm). Uma extensa discussão sobre as propriedades das frequências de radar para medição dos oceanos pode ser encontrada em ROMEISER & THOMPSON (2000). Entretanto, este parâmetro não é tão crítico para as medições ATI.

Embora os parâmetros de radar tenham sido escolhidos baseados naqueles instalados no satélite TerraSAR-X, uma *baseline* ATI diferente foi simulada com o objetivo de avaliar os benefícios caso as antenas fossem instaladas mais separado. Neste caso, é esperado que a coerência entre as duas imagens adquiridas aumente, assim como a sensibilidade da fase interferométrica. Quanto menor a *baseline*, menor será a velocidade de corrente superficial detectada. Para *baselines* longas, o sinal decorrelaciona muito rápido nas medições oceânicas. Também, o intervalo de velocidades mapeado num intervalo de fase se torna maior do que 2π , causando dobramento da fase. Mesmo que a *baseline* seja curta, é possível reduzir o ruído através da promediação sobre vários pixels para obter melhor SNR.

Na Figura 63, a simulação considerando 3 metros de *baseline* ATI é apresentada. Os valores fornecidos são de velocidade da superfície, obtidos através da multiplicação das diferenças de fase ATI por um fator calculado através da Equação 44, que relaciona a fase interferométrica com a velocidade do alvo associada. Para descontar o efeito do movimento das ondas, a aproximação foi realizada a partir da ferramenta M4Squick, que fornece um valor singular de *offset* Doppler calculado somente devido ao efeito de ondas na ausência de correntes. Este valor de *offset* Doppler inicialmente fornecido em Hertz também é convertido em m/s através de equação similar a Equação 44. Para o caso da Figura 63, o efeito do movimento das ondas foi estimado em 0,96 m/s e está apresentado na legenda antes e após a correção do *offset*.

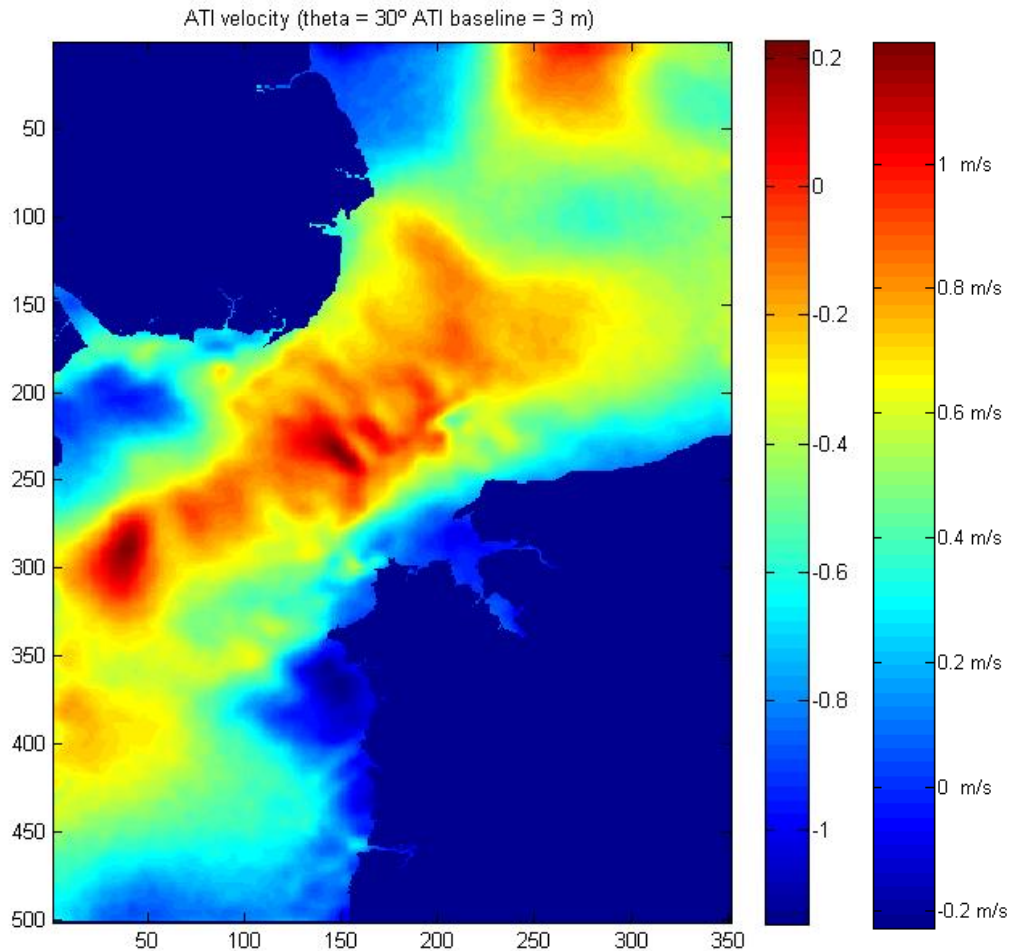


Figura 63: Fase interferométrica para 3 metros de baseline ATI e 30° de ângulo de incidência (em m/s)

6.2.3- Efeito das condições de vento

As condições típicas de vento na baía de São Marcos foram obtidas em artigos científicos apresentados no Capítulo 4. Nestes trabalhos, é indicado que o vento predominante tem direção NE e para meses específicos SE, associados a intensidades da ordem de 6 m/s. As primeiras simulações descritas anteriormente foram conduzidas considerando campos de vento de 6 m/s e direção NE. No sentido de investigar a influencia das condições de vento no imageamento de radar orbital, novas simulações foram realizadas também para a direção NE e para a velocidade de vento de 10 m/s (Figura 64).

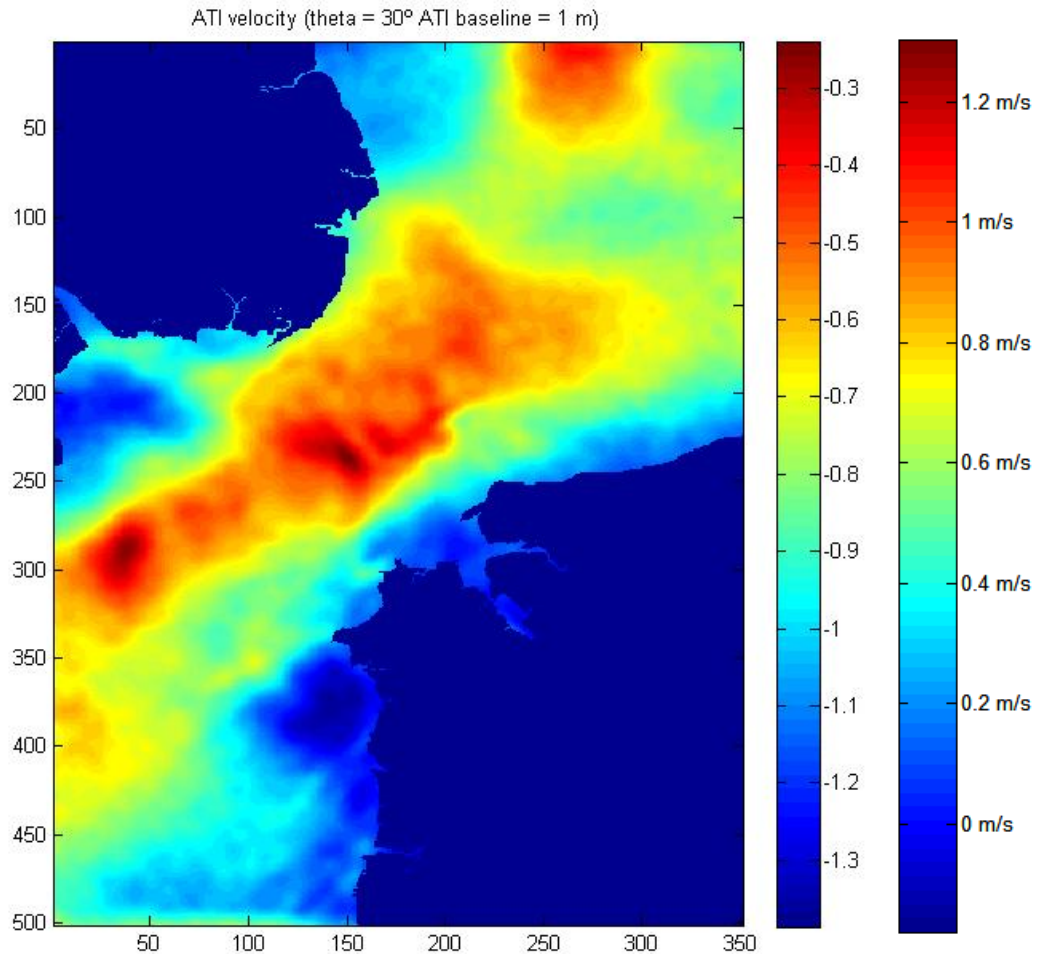


Figura 64: Simulação para velocidade do vento de 10 m/s e direção NE (em m/s)

6.2.4- Estatística dos resultados

O principal objetivo das diferentes simulações realizadas através do modelo M4S era de investigar se nas condições usuais nas quais as imagens reais serão obtidas, será possível efetuar a medição das correntes pela técnica ATI-SAR. Desta forma, a atividade de simulação numérica no M4S, previamente à aquisição de imagens reais, pode orientar em relação à utilidade da imagem real para este fim. Adicionalmente, é possível identificar as melhores condições de imageamento e planejar o monitoramento ao longo do tempo das correntes superficiais de uma determinada região costeira ou oceânica, neste caso à baía de São Marcos.

Neste sentido, os resultados obtidos nas simulações com o M4S foram submetidos a comparações estatísticas. Primeiramente, três métodos estatísticos foram

aplicados nas imagens de entrada e de saída: análise de regressão, coeficiente de correlação e erro médio quadrático. A análise de regressão foi usada para investigar a similaridade entre os dois conjuntos de dados que representam as imagens, uma oriunda das correntes de entrada e a outra obtida das correntes derivadas do M4S. O coeficiente de regressão (b_1) indica a tendência da série de dados em relação à curva $y = x$, onde o mesmo pixel nas duas imagens é igual (Equação 76). Por outro lado, esta ferramenta não avalia o quão longe estão os dados distribuídos em torno da curva de tendência. No sentido de avaliar essa dispersão, o coeficiente de correlação (r) e de determinação (r^2) foram também calculados, os quais analisam a precisão total de acerto (Equação 77). Finalmente, o erro médio quadrático ($erms$) foi calculado para que considerasse não só a média, mas a variância dos dados em relação à tendência geral (Equação 78).

$$b_1 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (76)$$

$$r = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}}} \quad (77)$$

$$erms = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-2}} \quad (78)$$

onde, x_i e y_i são os valores dos pixels da imagem de entrada (x) e simulada (y);

$\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias dos pixels das imagens de entrada e simulada;

n é o número de pixels na imagem.

As Figuras 65 a 72 mostram os resultados estatísticos para diferentes simulações realizadas no M4S. Em todos os gráficos, a equação de regressão linear (b_1), o coeficiente de correlação (r) e o erro médio quadrático ($erms$) estão apresentados. A curva de ajuste linear está apresentada com linha vermelha e a curva $y = x$ com linha preta.

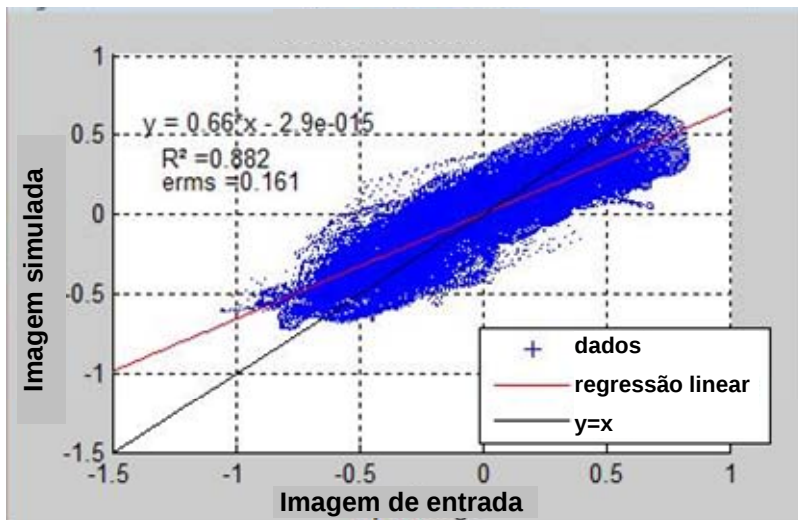


Figura 65: 30° de incidência e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos

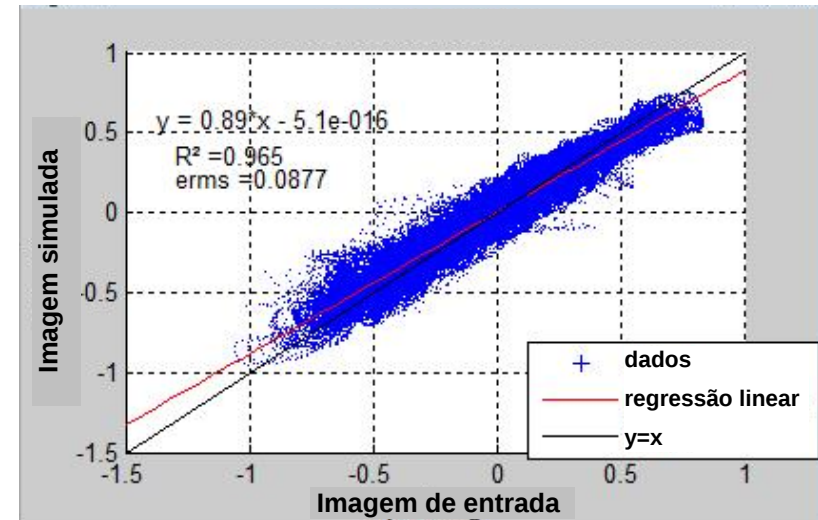


Figura 66: 60° de incidência e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 por 10 ciclos

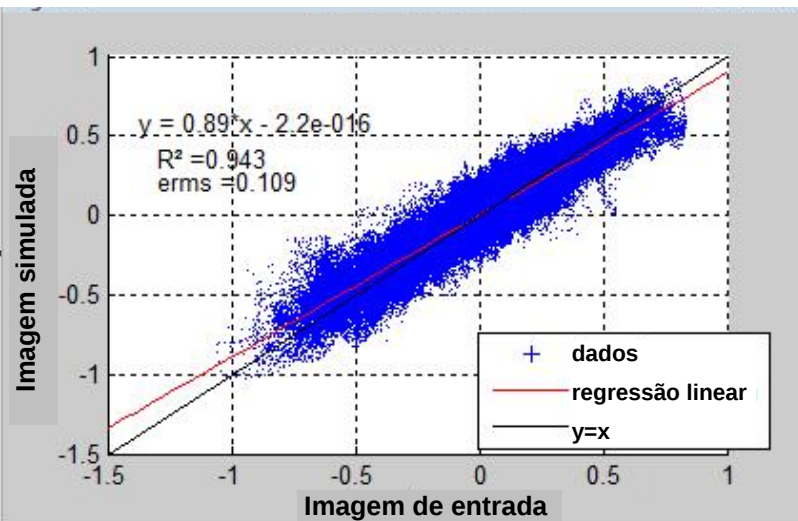


Figura 67: 60° de incidência e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos

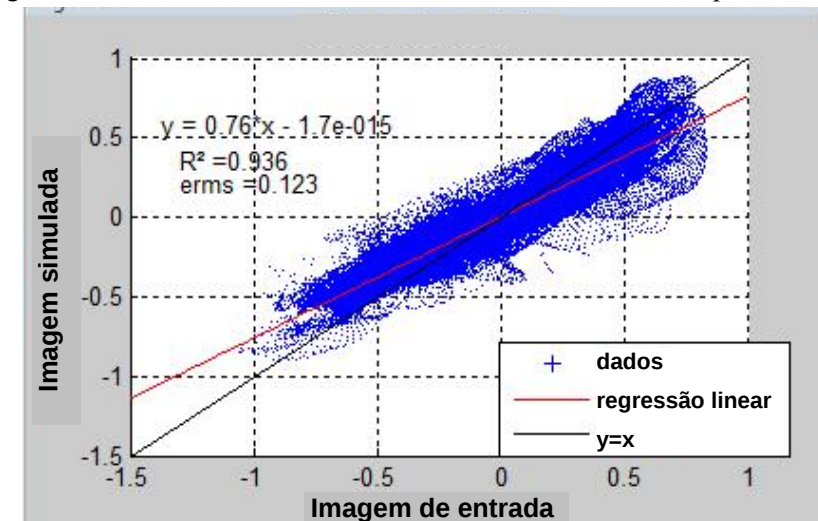


Figura 68: 30° de incidência e vento de 6 m/s SE filtrado 3x3 por 5 ciclos

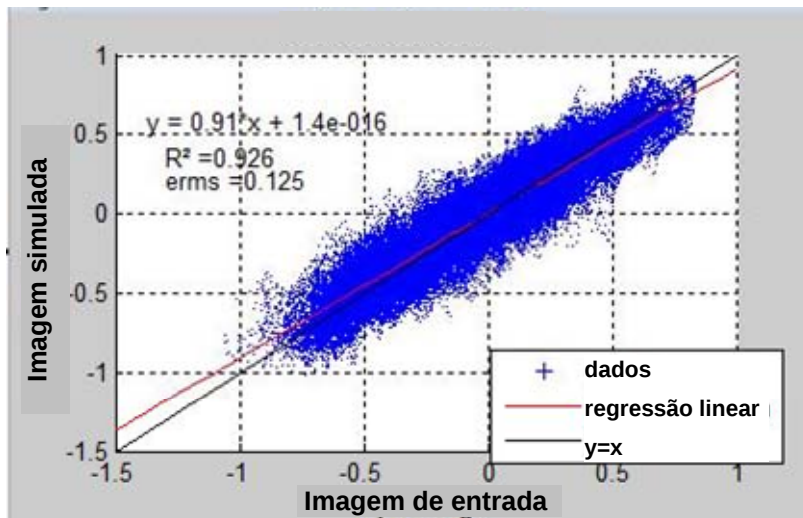


Figura 69: 60° de incidência e vento de 6 m/s SE filtrado 3x3 por 5 ciclos

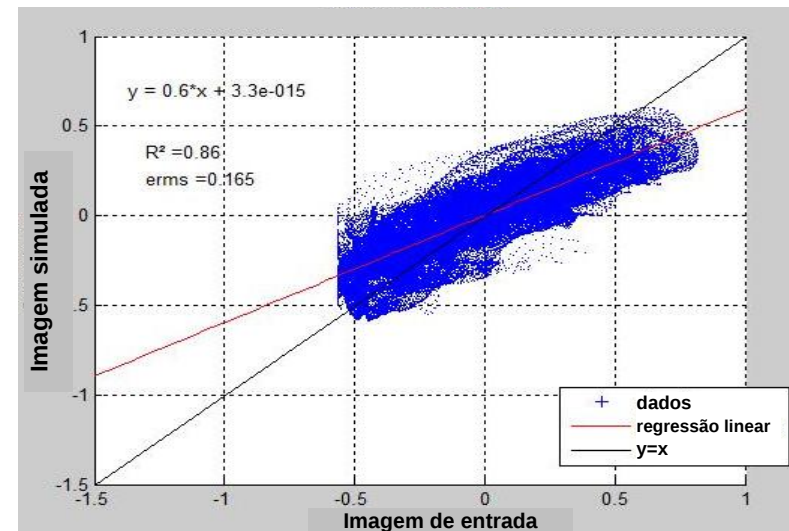


Figura 70: 30° de incidência e 10 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos

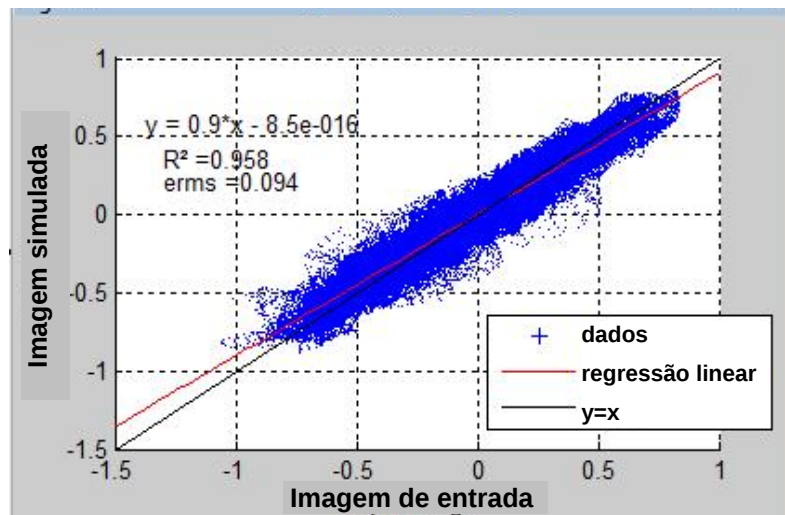


Figura 71: 60° de incidência e vento de 6 m/s SE filtrado 3x3 por 10 ciclos

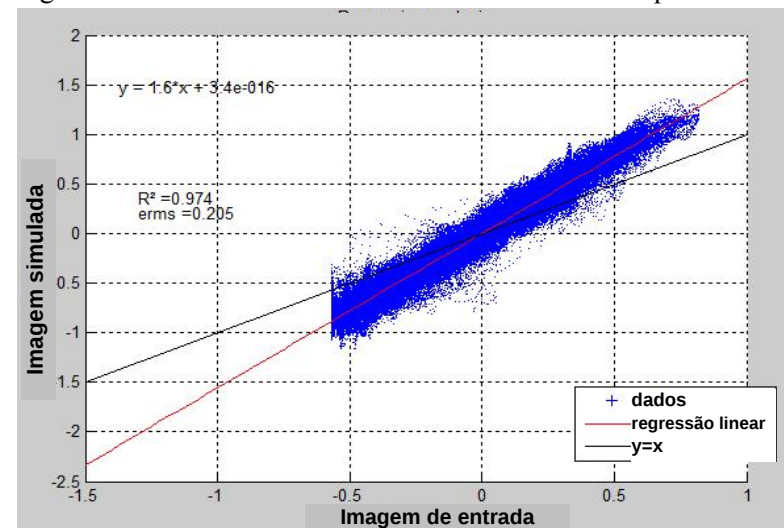


Figura 72: 60° de incidência e vento de 10 m/s NE filtrado 3x3 por 5 ciclos

A Tabela 12 resume os resultados estatísticos encontrados nas Figuras 65 a 72. Pode ser observado a partir desses resultados que os melhores ângulos de incidência estão perto do 60° e a partir de mais filtragem, os quais apresentam maiores valores no coeficiente de regressão e correlação e os menores erros RMS. O mapeamento de correntes realizado com grandes ângulos de incidência tende a ser mais linear comparado a ângulos menores, de acordo com as constatações feitas por ROMEISER & THOMPSON (2000).

Tabela 12: Resumo dos resultados estatísticos para diferentes ângulos de incidência e processos de filtragem

Fig.	Ângulo de incidência (°)	Janela de filtragem	Condições de vento	Coef. de regressão (b_1)	Coef. de correlação (r)	Erro RMS (erms)
65	30	3x3 ciclos 5	6 m/s NE	0,66	0,882	0,161
66	60	3x3 ciclos 5	6 m/s NE	0,89	0,943	0,109
67	60	3x3 ciclos 10	6 m/s NE	0,89	0,965	0,088
68	30	3x3 ciclos 5	6 m/s SE	0,76	0,936	0,123
69	60	3x3 ciclos 5	6 m/s SE	0,91	0,926	0,125
70	60	3x3 ciclos 10	6 m/s SE	0,9	0,958	0,094
71	30	3x3 ciclos 5	10 m/s NE	0,6	0,860	0,165
72	60	3x3 ciclos 5	10 m/s NE	1,6	0,974	0,205

Em relação ao processo de filtragem, 10 ciclos ao invés de 5 ciclos somente aumenta o coeficiente de correlação, através da eliminação de pontos extremos da série de dados. Essa melhora é menos significativa comparada à perda de resolução espacial que está sendo perdida durante o processo de filtragem, logo o número de ciclos deve ser decidido pelo analista em cada caso particular. As condições de vento indicam resultados ligeiramente melhores quando a direção NE é substituída pela SE e piores resultados para ventos fortes, por exemplo, 10 m/s comparado com 6 m/s.

Como mencionado anteriormente nesta seção, a sensibilidade da fase ATI melhora com o aumento da *baseline*, uma vez que para *baselines* curtas as pequenas variações da corrente superficial podem não ser detectadas. Entretanto, o sinal decorrelaciona muito rápido para *baselines* longas, especialmente em aplicações oceânicas. Outro problema associado com longas *baselines* é o fato de que o intervalo de velocidade mapeado em um intervalo de fase fica maior do que 2π , gerando dobramento da fase. Por esta razão, foi simulado um cenário com uma *baseline* mais longa de 3,0 metros e investigado a melhora da sensibilidade

da fase ATI. A Figura 73 mostra as estatísticas para a baseline ATI de 3,0 metros, vento de 6 m/s e direção NE.

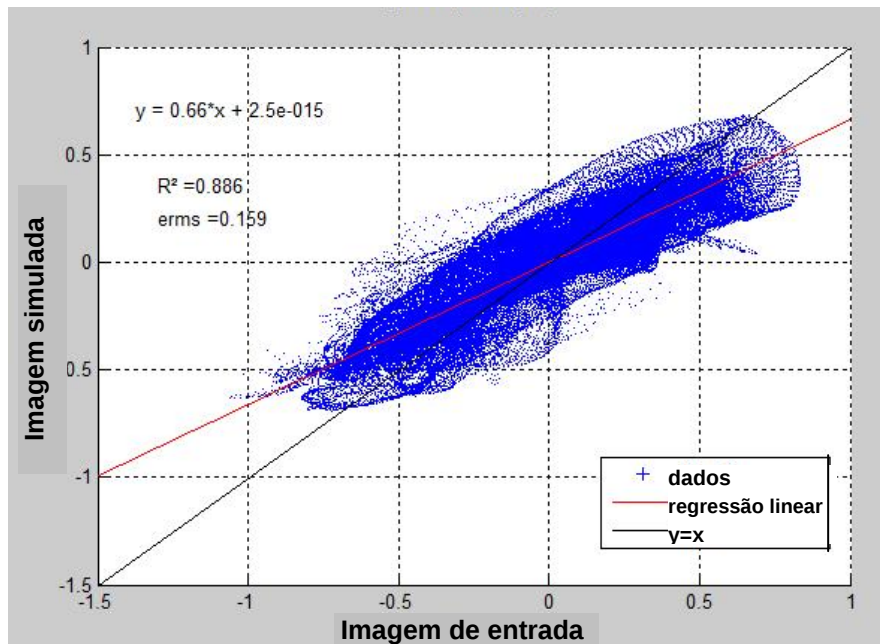


Figura 73: Estatística para *baseline* de 3,0 m, 30° e vento de 6 m/s NE, filtrado 3x3 por 5 ciclos

A partir dos parâmetros estatísticos da Figura 73 com a *baseline* ATI de 3,0 metros, diferentemente do aumento de sensibilidade esperado, pode ser observadas apenas pequenas diferenças comparadas com a Figura 65 (a mesma simulação, porém com a *baseline* ATI de 1,0 metro). Este fato pode ser explicado devido à filtragem, a qual é responsável pelo aumento do SNR, tornando menos significante a distância da *baseline* neste caso.

6.3. SIMULAÇÕES PARA AS FORTES CORRENTES DA MARÉ ENCHENTE

Outro instante do ciclo de maré relacionado às fortes correntes da maré enchente também foi investigado através da técnica de imageamento ATI-SAR. Seguindo os mesmo procedimentos realizados na simulação das fortes correntes da maré vazante, o campo de correntes foi obtido a partir dos resultados da modelagem no SisBaHiA, correspondente ao instante 237.600 segundos de simulação. Este campo de correntes está mostrado na Figura 74.

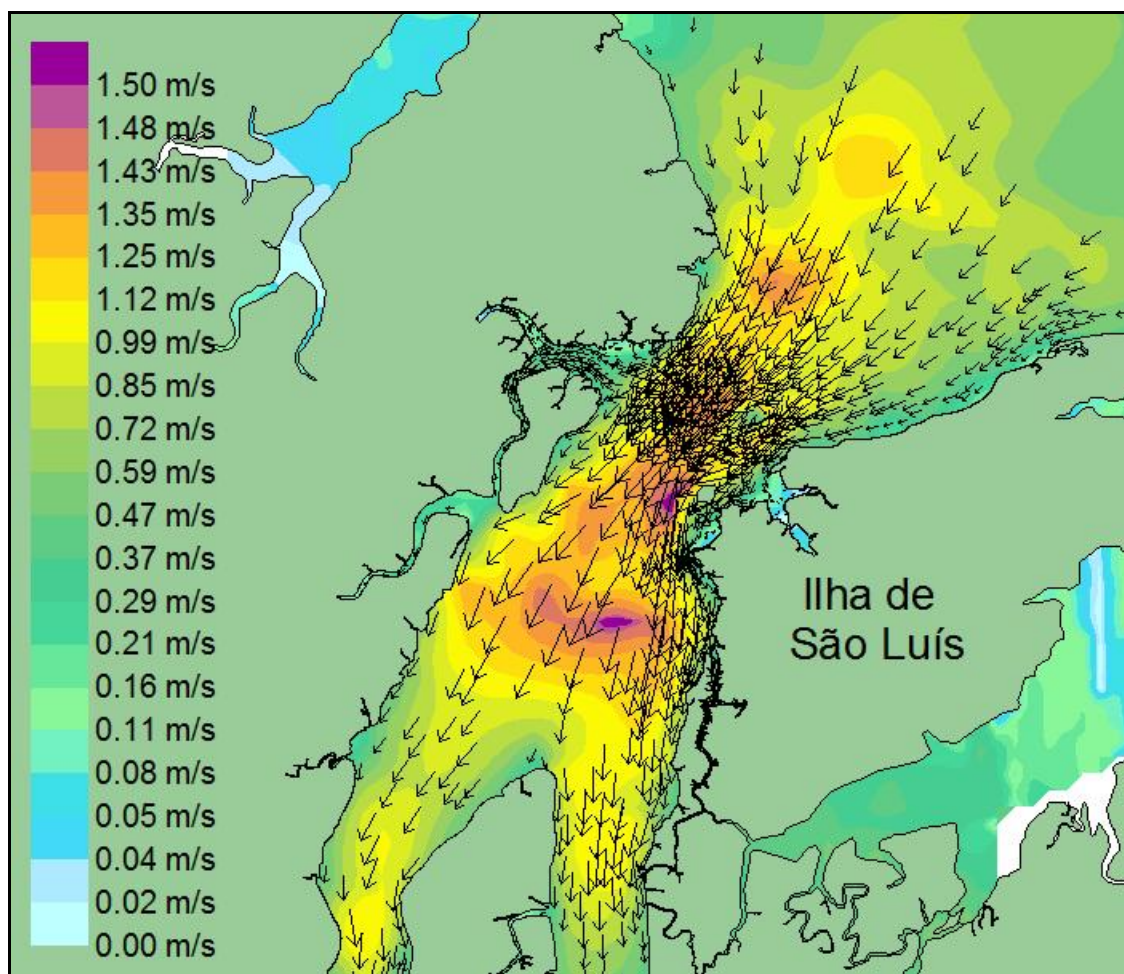


Figura 74: Fortes correntes associadas à maré enchente obtida no SisBaHiA

O próximo passo foram os processos de reamostragem e suavização para satisfazer o sistema de coordenadas do M4S e reduzir as transições entre as partes de água e de terra, respectivamente. Então, este campo de correntes foi usado como informação de entrada no modelo M4S, juntamente com condições de vento de 6 m/s e direção NE e os parâmetros de radar apresentados na Tabela 11. As correntes derivadas da técnica ATI estão apresentadas na Figura 75.

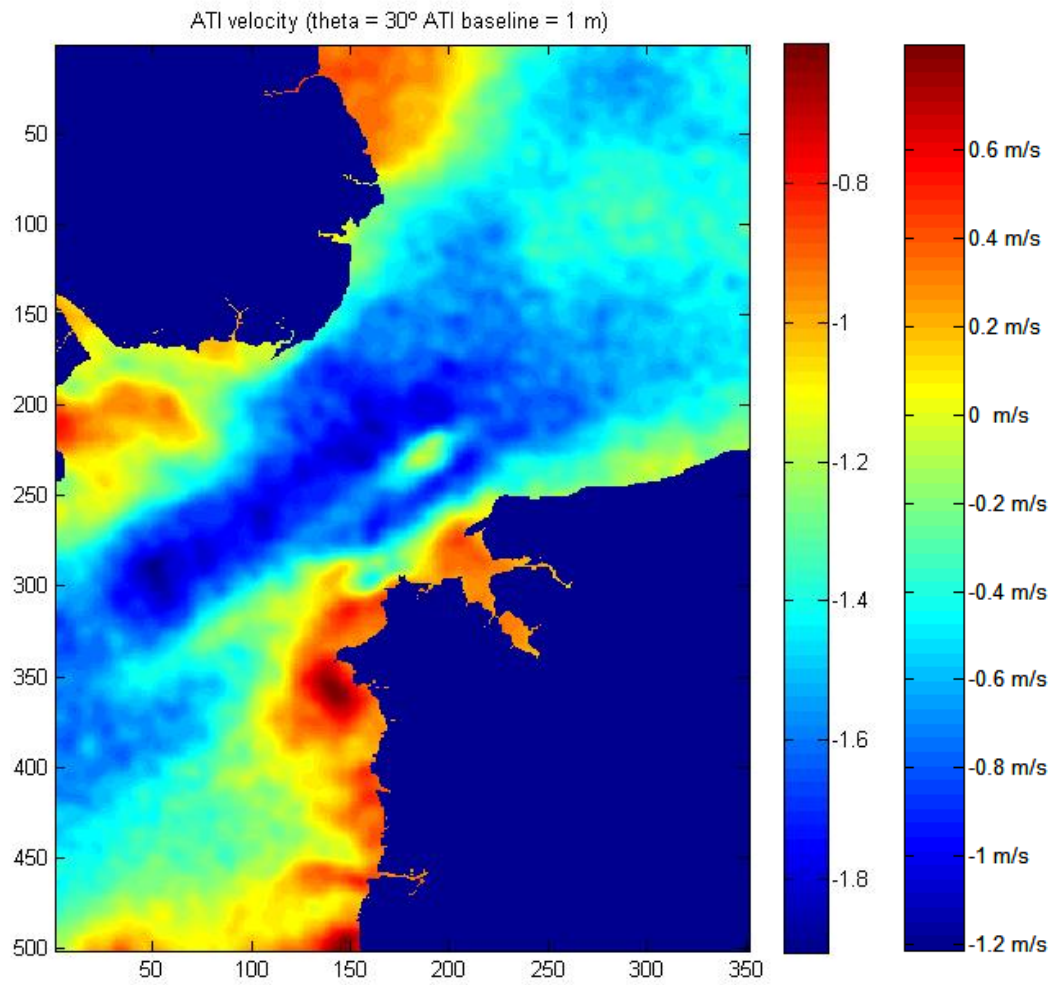


Figura 75: Correntes derivadas para 30° de ângulo de incidência e vento de 6 m/s durante a maré enchente (em m/s)

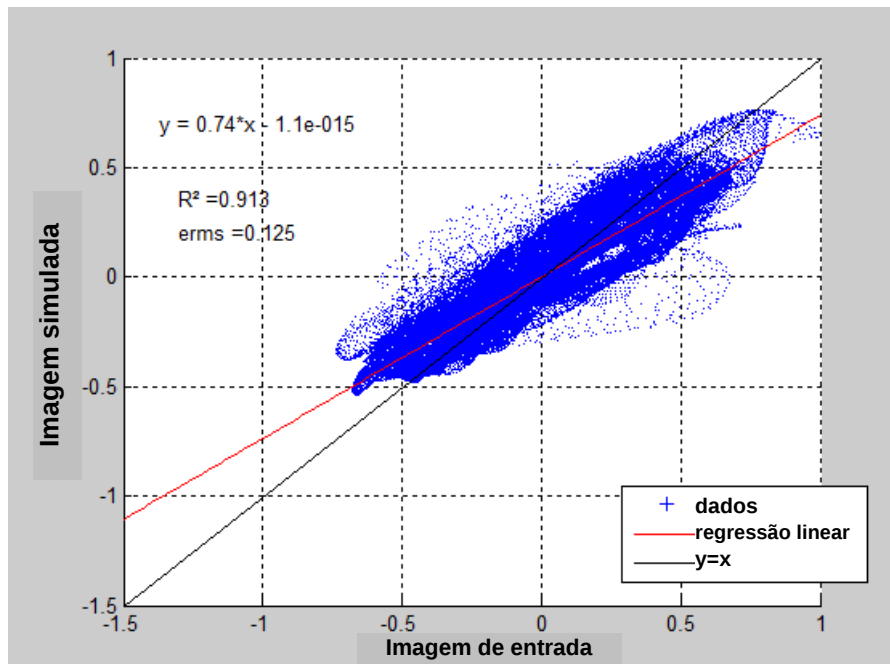


Figura 76: Estatística para 30 e vento de 6 m/s NE filtrado 3x3 através de 5 ciclos

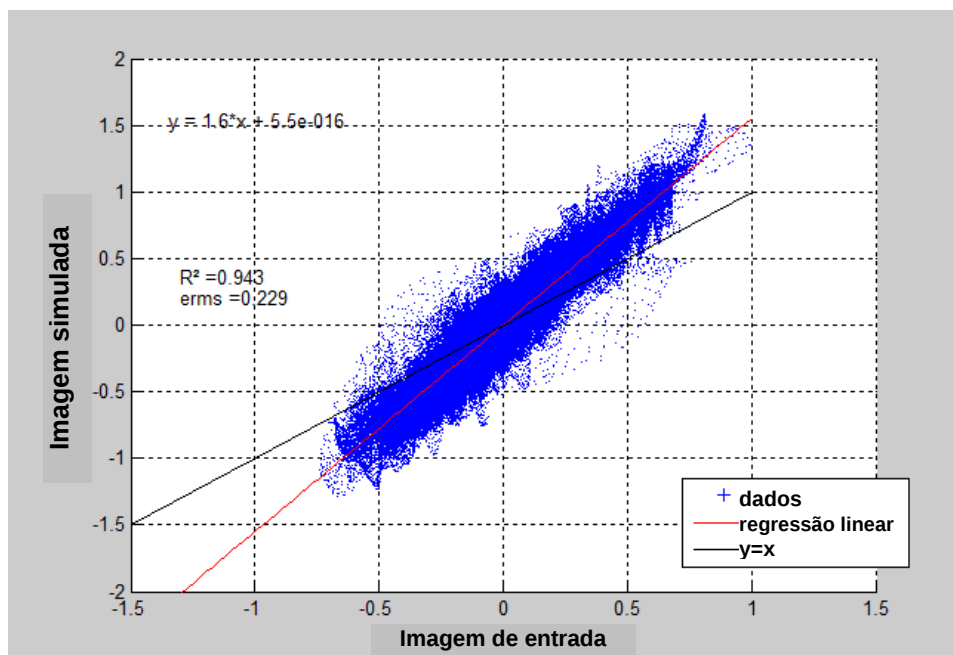


Figura 77: Estatística para 60 e vento 6 m/s NE filtrado 3x3 através de 5 ciclos

6.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MONITORAMENTO DO CICLO DE MARÉ POR SAR ORBITAL

O campo de correntes derivado da técnica ATI-SAR está relacionado somente a um instante de tempo, no qual a imagem foi adquirida, em outras palavras, esta técnica é capaz de prever a velocidade da corrente superficial no mesmo tempo do imageamento do satélite. Com o objetivo de monitorar todo o ciclo de maré, i.e., maré enchente e vazante, estofas de maré, ciclos de sizígia e quadratura etc, é necessário obter mais imagens durante estes períodos específicos. Neste sentido, é possível conhecer as mudanças de velocidade de corrente devido a diferentes períodos da maré astronômica. A característica mais importante que deve ser levada em consideração é o tempo de revisita do satélite. Por exemplo, o satélite alemão TerraSAR-X demora 11 dias para sobrevoar o mesmo local sobre a superfície terrestre. Portanto, um plano detalhado é imprescindível para indicar quando os satélites devem adquirir as imagens e de qual período das marés estas serão representativas.

A partir do site oficial do TerraSAR-X, a aquisição de imagens sobre a baía de São Marcos foi consultada, vide Figura 78. A área de interesse está indicada em azul e as imagens do tipo *stripmap* disponíveis em preto.

The screenshot shows the TerraSAR-X Archive website interface. The main map displays the coastal region of São Marcos, with an 'Area of Interest' highlighted in blue. The interface includes a 'Basic Filter' section with checkboxes for 'High Resolution SpotLight (HS)', 'SpotLight (SL)', 'StripMap (SM)', and 'ScanSAR (SC)'. Below this is an 'Acquisition Time' section with 'Start' and 'End' date and time pickers. A 'Legend' section on the left lists the imaging modes with corresponding color-coded boxes. The 'Available Scenes in the Area of Interest' table lists the following data:

Imaging Mode	Polarisation	Start Time	Path Direction	In
Stripmap (SM)	HH	2010-02-16T21:13:20...	ascending	35
Stripmap (SM)	HH	2009-05-12T21:05:09...	ascending	15
Stripmap (SM)	HH	2009-05-23T21:05:09...	ascending	15

Buttons for 'add', 'remove', and 'remove all' are provided for each row. The 'Scenes Selected for Request' table is currently empty. A 'Send Request' button is located at the bottom right of the interface.

Figura 78: Imagens disponíveis no site oficial do TerraSAR-X para a área de interesse

As cartas de corrente de maré publicadas da Marinha brasileira apresentam condições de velocidade de corrente para a área específica em diferentes horas em relação à preamar. É possível através de aquisições sucessivas de imagens interferométricas de SAR embarcado em satélites derivar campos de corrente instantâneos para diferentes horas ao longo do ciclo de maré. Um exercício foi realizado considerando o tempo de revisita do TerraSAR-X e sua capacidade em monitorar as correntes nas horas da maré. A Figura 79 mostra o ciclo de maré na baía de São Marcos (azul) e os instantes relativos a passagem do TerraSAR-X sobre a área (vermelho).

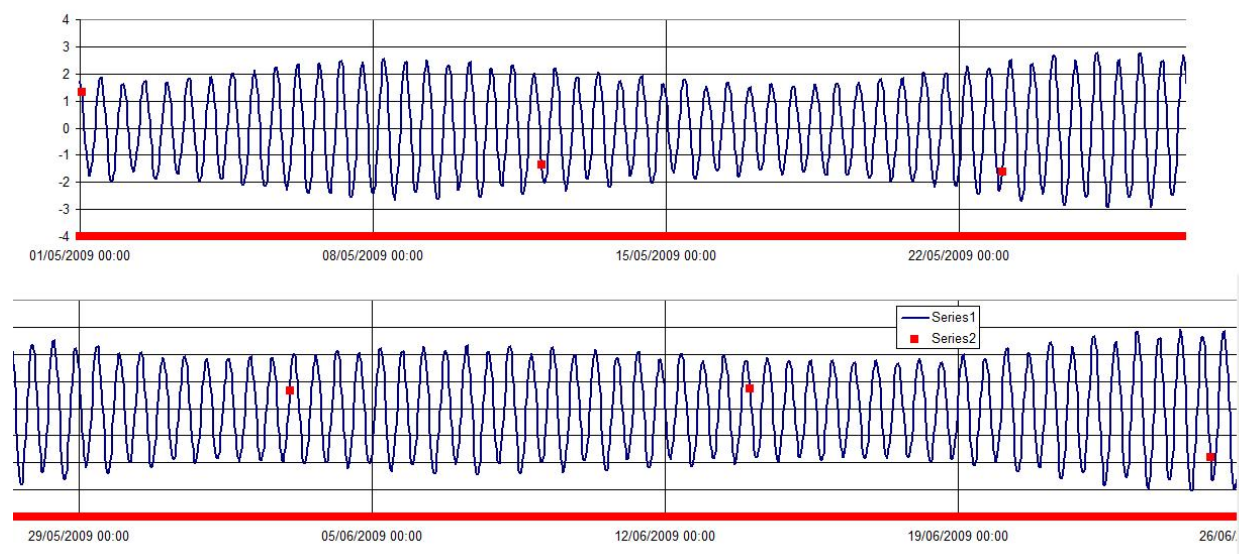


Figura 79: Ciclo de maré na baía de São Marcos e instantes de imageamento TerraSAR-X sobre a área

Para 100 dias de monitoramento, nove pares de imagens podem ser obtidos pelo satélite, os quais podem reconstituir a carta de correntes de maré. A Tabela 13 indica aproximadamente qual hora da maré que pode ser coberta por cada imageamento sucessivo.

Tabela 13: Lista das 9 imagens adquiridas e sua relação com a carta de correntes de maré

6 hs ant	5 hs Ant	4 hs ant	3 hs ant	2 hs ant	1 h ant	PM	1 h dep	2 hs dep	3 hs dep	4 hs dep	5 hs dep	6 hs dep
4 ^o	5 ^o		2 ^o	7 ^o		8 ^o ,9 ^o	1 ^o		6 ^o	3 ^o		

6.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A VARIABILIDADE DA VELOCIDADE DA CORRENTE DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE

Em todos os casos descritos anteriormente, o campo de correntes obtido pela técnica ATI-SAR indica as velocidades de corrente na camada superficial. Entretanto, a velocidade varia ao longo da profundidade, especialmente como consequência das condições de contorno na superfície e no fundo relacionado com o atrito. De acordo com HENDERSON (1966), a velocidade média verdadeira ao longo da profundidade não é necessariamente constante, porém pode ser corrigida pelo coeficiente de Coriolis. Esse coeficiente é igual a 1 em um canal idealizado e assume valores de 1,15 e 2 para canais simples e rios naturais respectivamente.

Usualmente, pode ser utilizada a lei de potência para descrever a variação da velocidade ao longo da profundidade, na qual o expoente é geralmente escolhido entre 7 e 10 (chamadas de lei de potência sétima ou décima). A Figura 80 apresenta o perfil de velocidade da corrente utilizando a lei de potência sétima. Para prever como ocorre a variação da velocidade da corrente a medida que se distancia da superfície, é recomendada efetuar uma simulação através de modelos hidrodinâmicos 3D, no qual as correntes derivadas do ATI-SAR podem servir de entrada nas condições de contorno de superfície.

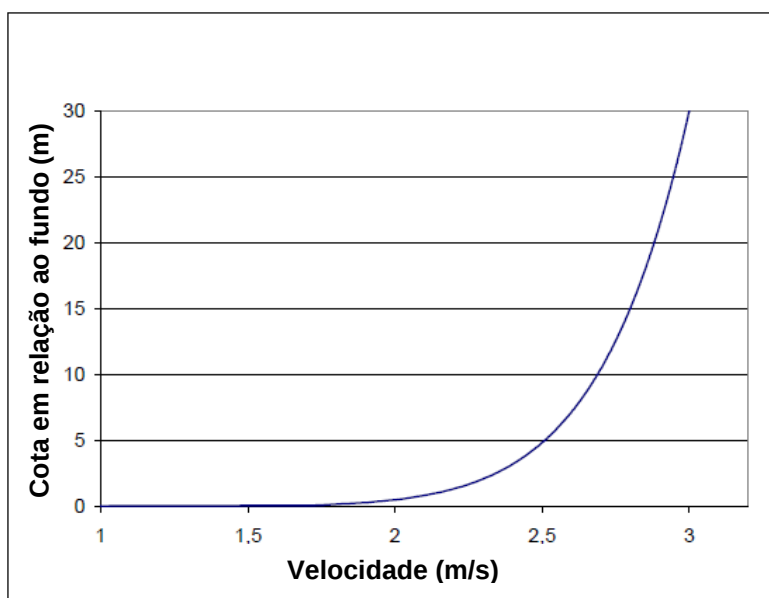


Figura 80: Perfil de velocidade ao longo da profundidade conforme a lei de potência

6.6. DISCUSSÃO

A medição de correntes por ATI-SAR é uma técnica promissora para investigar a variabilidade espacial e temporal das velocidades da corrente. Através da associação com modelos hidrodinâmicos, esta pode ser uma importante ferramenta para apoiar a avaliação de locais para exploração da energia das correntes. Especialmente, em extensas áreas típicas da região norte do Brasil, onde existem complexidades na obtenção de dados ambientais.

Neste Capítulo, os principais objetivos foram compreender se as condições usuais de imageamento, ou seja, considerando condições de vento e correntes e parâmetros de radar pertencentes a sistemas atualmente em órbita, permitem gerar imagens úteis ao processamento ATI-SAR. Este é uma importante conclusão que pode servir como balizador tanto na aquisição de imagens SAR interferométricas reais da área em estudo, como orientar na escolha dos parâmetros de radar dos sistemas orbitais futuros que sejam adequadas a esta utilização.

O modelo M4S foi utilizado para efetuar essas simulações, no qual é possível mudar os parâmetros de imageamento e prever como serão os resultados dos produtos SAR e InSAR. Em relação às condições ambientais, campos de vento de 6 m/s NE e SE e 10 m/s NE foram testados para avaliar a influência da intensidade e direção do vento no processo de imageamento. Adicionalmente, campos de corrente representativos das fortes correntes de maré vazante e enchente foram simulados. Os parâmetros de radar usados nas simulações com o M4S foram escolhidas tomando como base aqueles do satélite existente TerraSAR-X. Então, diferentes ângulos de incidência foram testados, 30, 45 e 60 graus e duas *baselines* ATI de 1 e 3 metros, além de diferentes ciclos de filtragem, com o objetivo de investigar as suas contribuições nos resultados do imageamento.

Como conclusão das simulações, os maiores ângulos de incidência, 60° por exemplo, apresentam-se como os mais adequados para o imageamento de radar sobre os oceanos, comparado a ângulos pequenos como 30°, devido ao fato de que para os maiores ângulos de incidência o mecanismo de imageamento é muito mais linear. A mudança da distância *baseline* de 1,0 para 3,0 metros não afetou significativamente os resultados, uma vez que o processo de filtragem foi mais responsável pela melhoria do SNR. Em relação aos ciclos de repetição da filtragem, foi mostrado que não há diferenças significativas se a imagem de saída é filtrada 5 ou 10 vezes, entretanto quanto mais a imagem é filtrada menor resolução espacial é obtida. Neste sentido, o analista deve escolher em cada caso particular quantos

ciclos de filtragem são suficientes para realçar a imagem e manter uma resolução espacial aceitável.

As condições ambientais indicaram algumas velocidades e direções de vento preferenciais entre aquelas existentes na região da baía de São Marcos. A direção sudeste apresentou melhores resultados do que a nordeste e as velocidades de 6 m/s melhores do que as de 10 m/s. Também, as simulações foram efetuadas para a maré enchente e vazante e foram realizadas considerações sobre o monitoramento das correntes durante todo o ciclo da maré através da medição ATI-SAR.

Finalmente, as variações do perfil de correntes de acordo com a profundidade e sua integração com modelos hidrodinâmicos 3D foi discutida. Esta é uma importante limitação a ser solucionada, principalmente devido ao fato que as turbinas conversoras de energia das correntes extraem a energia do fluxo de profundidades intermediárias.

7. MAPEAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS CORRENTES

Conforme visto no capítulo de revisão bibliográfica, para avaliar o recurso energético das correntes em determinado local é necessário primeiramente dispor de dados relativos ao campo de correntes, que podem ser obtidos por basicamente três abordagens: (1) medição *in situ*, (2) modelagem hidrodinâmica e (3) sensoriamento remoto. As duas últimas abordagens apresentam inúmeras vantagens, especialmente quando da fase de pré-seleção de locais favoráveis à instalação de turbinas em extensas áreas típicas dos litorais norte e nordeste brasileiro. Por se tratarem de atividades de escritório, a modelagem hidrodinâmica e o processamento de imagens de sensoriamento remoto podem reduzir os custos, indicando áreas prioritárias para posterior campanha de medição *in situ*, que geralmente é associada a altos custos de seus equipamentos e do tempo de duração.

Desta forma, a avaliação de locais favoráveis à exploração da energia das correntes é ilustrada neste trabalho através do mapeamento do potencial energético das correntes na baía de São Marcos, Maranhão. Para a realização deste mapeamento, foi utilizado os campos de corrente da região, provenientes das simulações em modelo hidrodinâmico SisBaHiA e, também, aqueles derivados da interferometria *along-track* SAR simulada no modelo M4S. Conquanto a técnica de interferometria *along-track* SAR para medições de corrente ainda não está em fase operacional, principalmente devido à difícil disponibilidade das imagens interferométricas *along-track* produzidas, as aplicações promissoras desta técnica estão sendo testadas em ambiente numérico-computacional a partir da utilização do modelo M4S.

Além da aplicação direta para obtenção das correntes superficiais oceânicas, a técnica de interferometria SAR pode produzir dados de entrada em modelações, calibração ou validação de modelos numéricos. Economicamente vantajosa quando comparada com levantamentos *in situ*, que prevê campanhas com custos proporcionais a sua abrangência espacial, cobertura temporal e sofisticação dos equipamentos empregados, a interferometria SAR orbital apresenta custos menores relacionados somente à aquisição da imagem de satélites que já se encontram em órbita.

O mapeamento do potencial energético da baía de São Marcos foi realizado utilizando os resultados do modelo hidrodinâmico e apresentado em forma de mapas, explicitando a variabilidade espacial de densidade energética e em forma de gráficos de séries temporais, indicando a variabilidade temporal. Nas Figuras 81, 82 e 83, estão representados os mapas de densidade energética para três típicos instantes do ciclo de maré: enchente, vazante e estofa de baixamar, respectivamente.

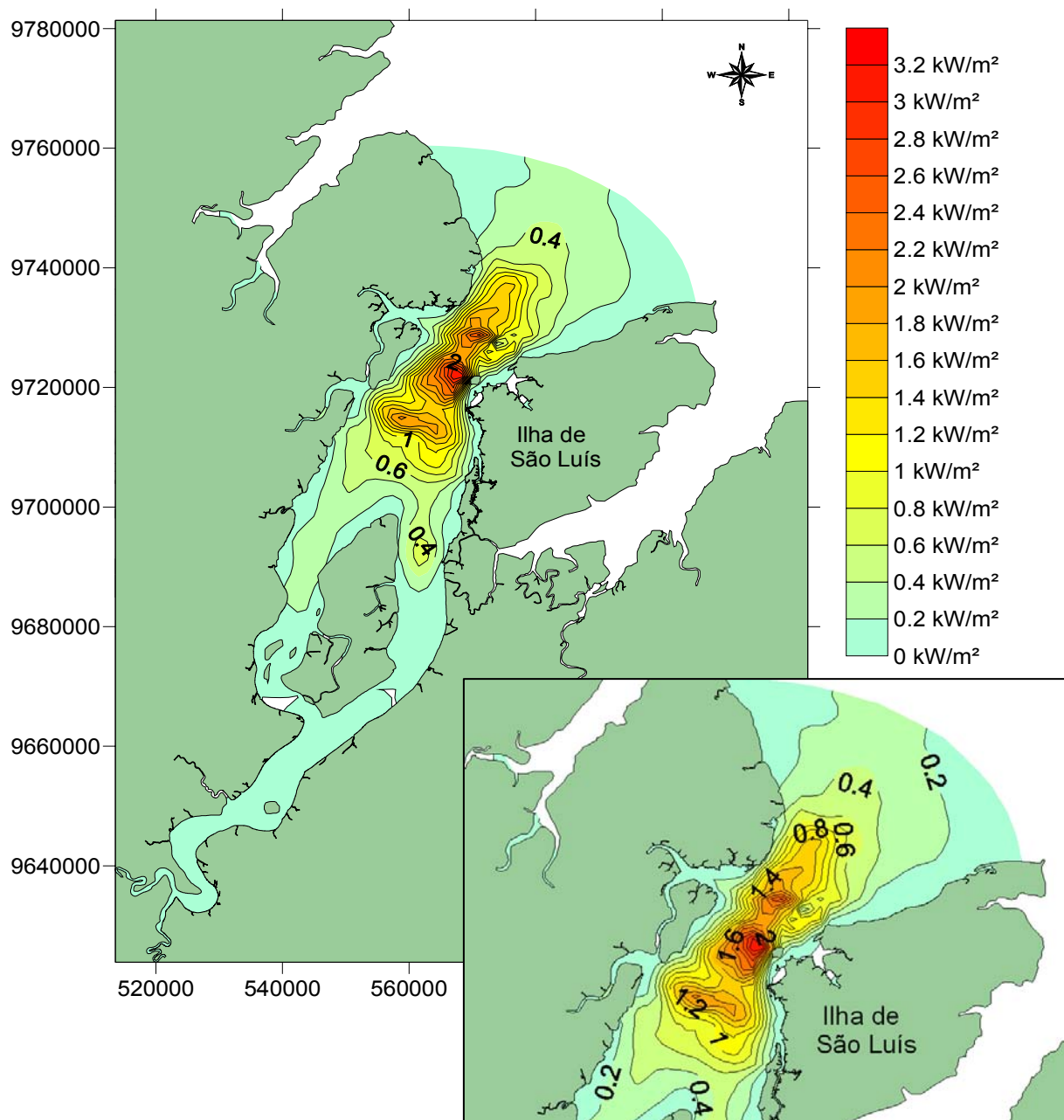


Figura 81: Mapa de densidade energética para a maré enchente a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico

Conforme pode ser observado na Figura 81, a região de maior concentração energética está próxima à ilha do Medo no canal principal da baía de São Marcos, onde são encontradas as maiores profundidades. Os valores de densidade energética atingem um pico de $3,2 \text{ kW/m}^2$, o que significa uma disponibilidade teórica de energia de $3,2 \text{ kW}$ para cada metro quadrado de seção transversal de um dispositivo de conversor instalado neste ponto. Este valor é considerado teórico devido ao fato de representar a energia disponibilizada pelas correntes, portanto não inclui fatores relacionados à eficiência dos conversores.

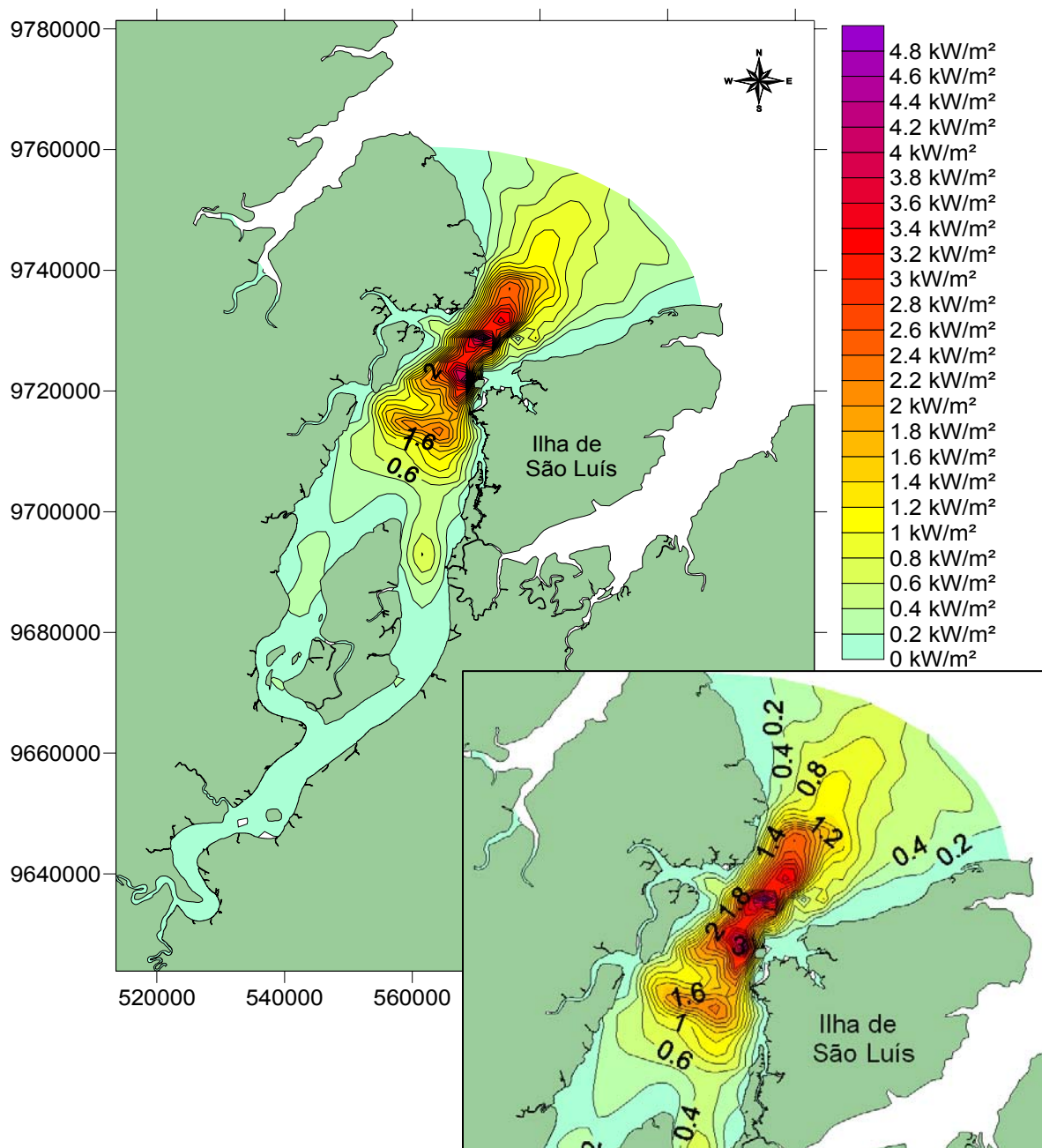


Figura 82: Mapa de densidade energética para a maré vazante a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico

Na Figura 82, representativa da vazante, pode ser observado que a região de maior concentração energética está localizada no mesmo lugar que no caso da maré enchente, entretanto possui maior abrangência espacial e alcança picos de densidade energética de 4,2 kW/m². Este acréscimo pode ser explicado devido às magnitudes das correntes de vazante serem superiores comparadas às de enchente, conforme foi discutido no Capítulo 5.

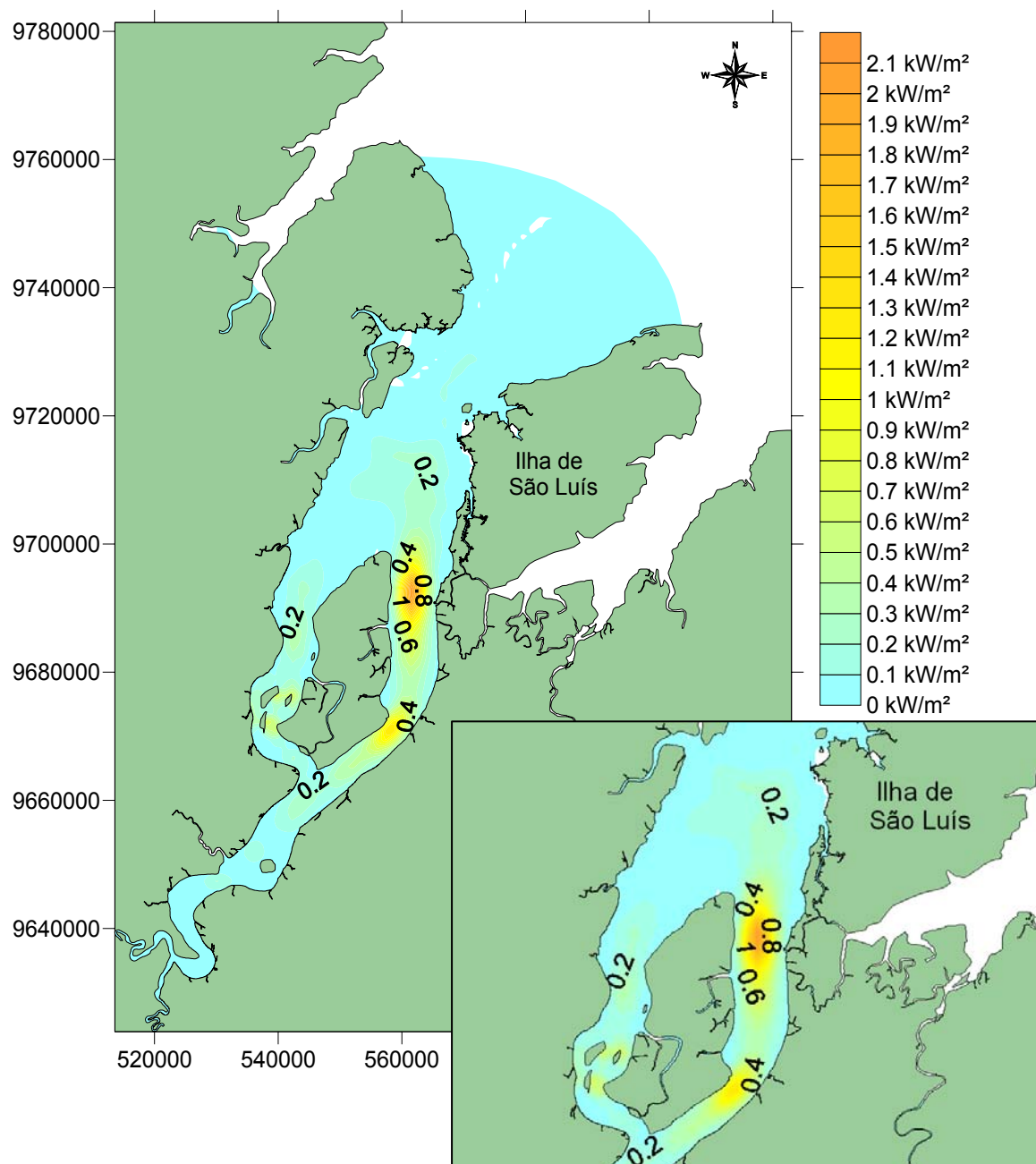


Figura 83: Mapa de densidade energética para a estufa de maré a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico

Durante a estufa de baixamar, as velocidades de corrente na parte norte e média da baía de São Marcos chegam aos seus menores valores absolutos, menores que 0,40 m/s. Esta magnitude de corrente irá corresponder a densidades energéticas entre 0 e 0,1 kW/m², conforme pode ser visto na Figura 83. Devido ao atraso da fase da maré em direção ao sul da baía, no instante de estufa de baixamar a parte mais meridional da baía apresenta velocidades de corrente significantes, acima de 1,0 m/s. Existe uma região de concentração energética no canal mais profundo ladeando a ilha dos Caranguejos, alcançando 2,0 kW/m² neste mapa.

A evolução temporal da densidade energética também foi obtida a partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica e está apresentada nas Figuras 84 e 85. A Figura 84 apresenta a variação da densidade energética ao longo de um mês em dois pontos do domínio, o P4, representativo do porto de Itaqui e P7, um dos pontos que apresentou maior magnitude das correntes no processo de modelagem. A Figura 85 mostra em detalhe a variação temporal para três ciclos de maré nos pontos P4 e P7.

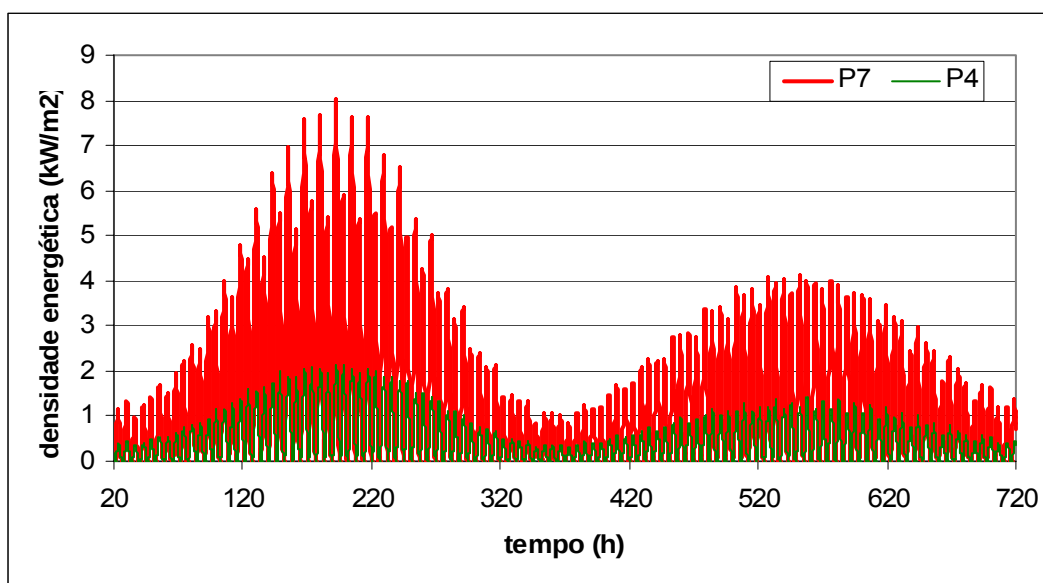


Figura 84: Séries temporais de densidade energética para os pontos P4 e P7

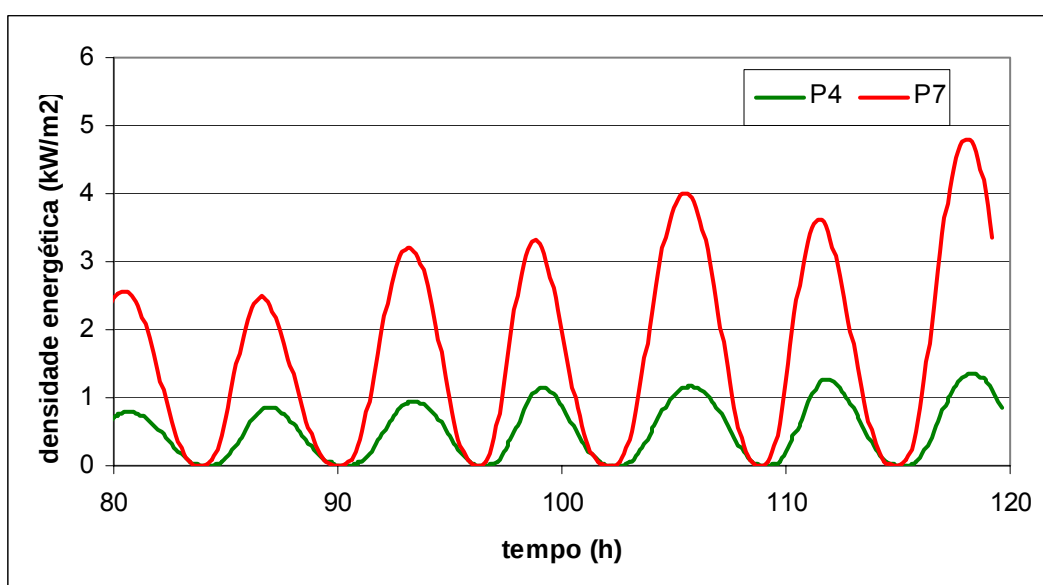


Figura 85: Detalhe das séries temporais de densidade energética para três ciclos de maré

Da mesma forma, os mapas de densidade energética podem ser elaborados tomando por base os campos de corrente derivados da interferometria *along-track* SAR. No caso deste trabalho, no qual as imagens interferométricas foram sintetizadas em ambiente numérico-computacional através do modelo M4S, utilizaram-se os campos de corrente resultantes desta simulação para construir os mapas apresentados nas Figuras 86 e 87. Respectivamente, a Figura 86 mostra a densidade energética de uma simulação para as correntes mais fortes da maré vazante, enquanto que a Figura 87 mostra a densidade energética para as correntes mais fortes da enchente.

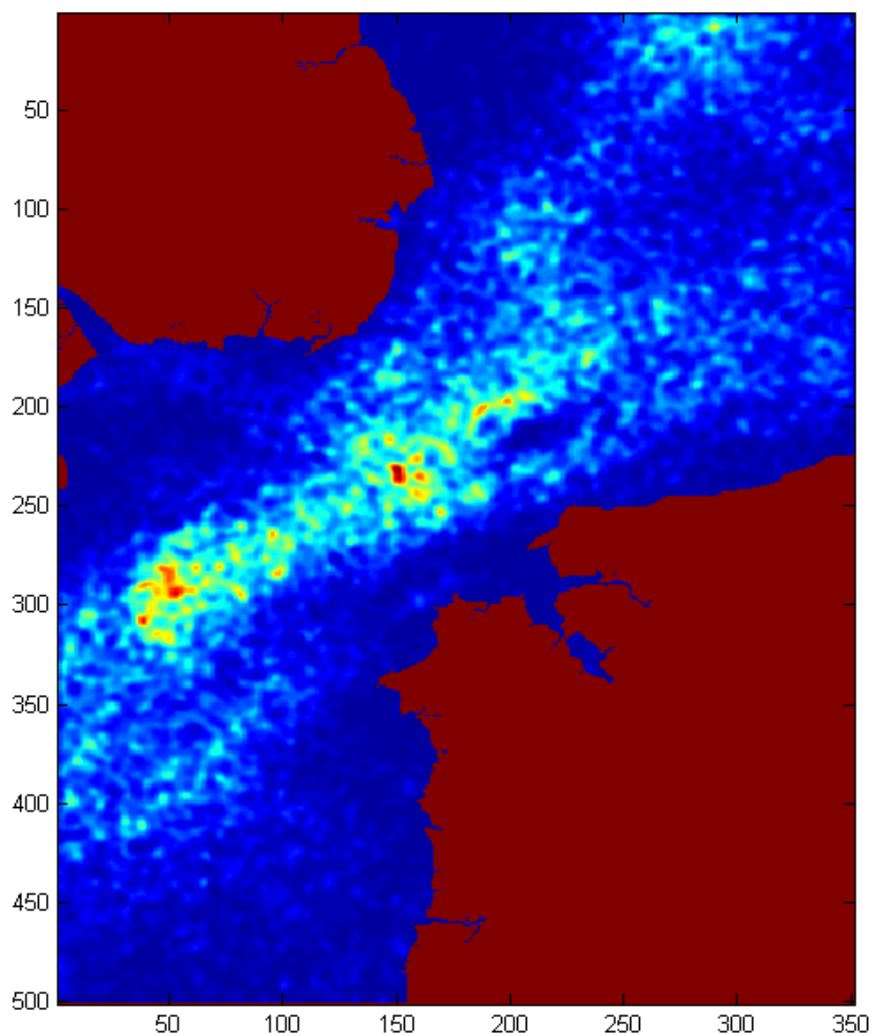


Figura 86: Mapa de densidade energética derivado da técnica ATI-SAR para as fortes correntes de vazante

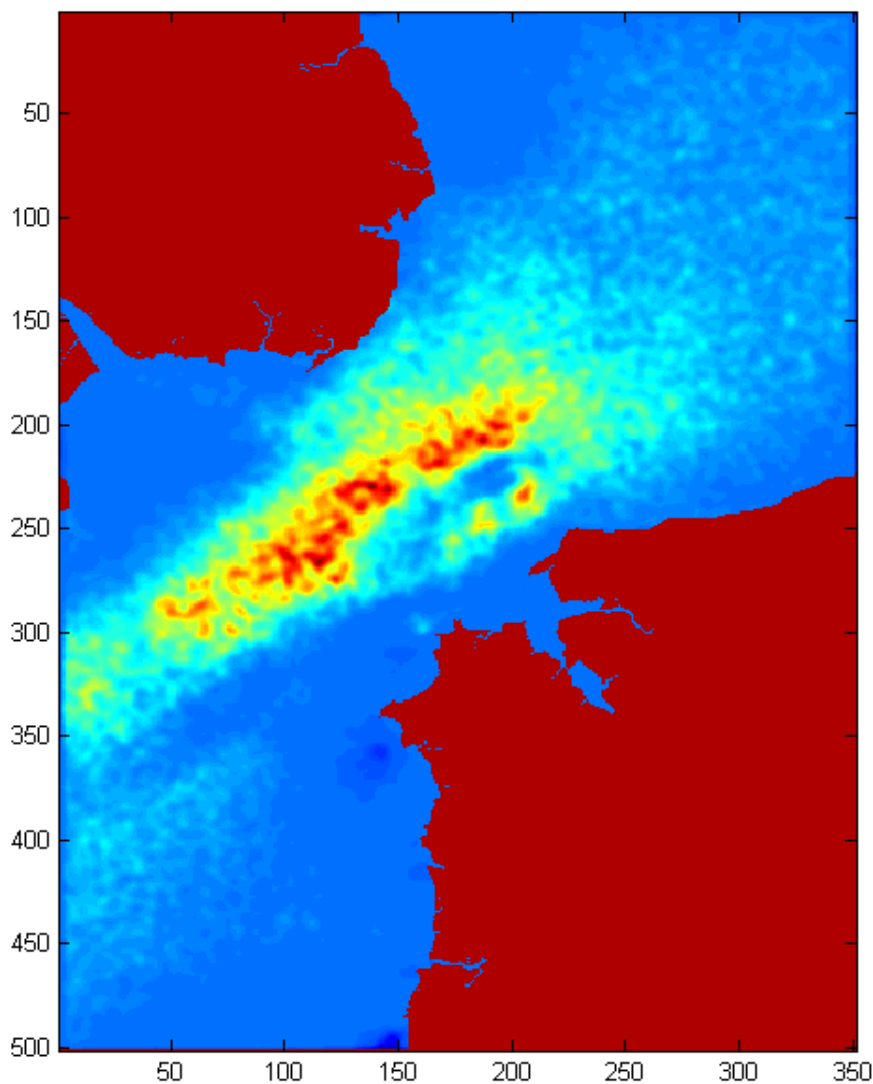


Figura 87: Mapa de densidade energética derivado da técnica ATI-SAR para as fortes correntes de enchente

Como pode ser observado nas Figuras 86 e 87, é possível a elaboração de mapas de densidade energética a partir das correntes detectadas pela técnica ATI-SAR. Através de simples comparação com aqueles mapas obtidos por modelagem hidrodinâmica, pode ser observado os mesmos padrões de densidade energética, ressaltando em sua maior parte as áreas que apresentam concentração de energia em função de correntes mais intensas. Em relação ao aproveitamento energético das correntes, a utilidade destes mapas está em indicar áreas de maior concentração energética, que devem ser melhor detalhadas através de medições *in situ*, no sentido de definir prioridades para o local exato da instalação de dispositivos conversores de corrente.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1. SÍNTESE DO TRABALHO

O aproveitamento das correntes estuarinas e oceânicas como fonte de energia alternativa demanda que seja realizada uma avaliação dos locais de implantação baseada principalmente no conhecimento das intensidades da corrente e sua variabilidade no tempo e no espaço. O potencial energético das correntes é proporcional ao cubo da velocidade do fluxo, o que significa dizer que este é o fator mais sensível para determinar se um local apresenta viabilidade econômica. Diferentes métodos de avaliação de locais favoráveis ao aproveitamento das correntes foram propostos na literatura, a exemplo do *farm method* e do *flux method*. Entretanto, esses métodos possuem uma abordagem do ponto de vista dos dispositivos possíveis de serem instalados em um determinado corpo d'água e não levam em consideração os aspectos ambientais do local, principalmente a hidrodinâmica das correntes.

Nos dois primeiros capítulos, as formas de estimar o potencial de energia das correntes e as metodologias propostas de avaliação deste recurso são apresentadas, indicando seus aspectos positivos e limitações na estimativa do potencial energético. Em seguida, uma revisão bibliográfica sobre as ferramentas de identificação dos campos de corrente, que possa auxiliar no processo de avaliação de locais adequados ao seu aproveitamento energético, foi realizada. Principalmente, as técnicas de sensoriamento remoto foram investigadas no tocante a sua efetividade em detectar as correntes oceânicas e outros parâmetros do mar.

No Capítulo 3, foi proposta uma metodologia para a avaliação de locais adequados à exploração da energia das correntes, fundamentada nas técnicas de interferometria *along-track* SAR e na modelagem hidrodinâmica para a obtenção dos campos de correntes locais. As vantagens da utilização de técnicas de sensoriamento remoto, especificamente, a interferometria SAR orbital, residem no baixo custo associado à aquisição de imagens de satélites que já se encontram em órbita e com seu custo amortizado e no fato de que o processamento destas imagens trata-se de uma atividade de escritório, que dispensa, em um primeiro momento, campanhas de medição *in situ*. Especialmente para o caso brasileiro, no qual os maiores potenciais de marés e correntes se encontram nas regiões Norte e Nordeste e que ao mesmo tempo, representam extensas áreas litorâneas com uma carência de dados ambientais, as técnicas que envolvam sensoriamento remoto orbital apresentam-se como uma solução para fornecer informações e subsidiar decisões.

Como estudo de caso, foi escolhida a baía de São Marcos, localizada no estado do Maranhão, em virtude das fortes correntes de maré observadas na região, o que foi tema do

Capítulo 4. Esta característica, bastante retratada em trabalhos específicos da oceanografia física, também está refletida em artigos que discorrem sobre locais potenciais para o aproveitamento energético das correntes. Na sequência, são apresentados os principais dados ambientais da baía, incluindo batimetria, marés, ventos, vazões fluviais entre outros, e que serviram de subsídio para a modelagem hidrodinâmica e simulações de interferometria SAR.

No Capítulo 5, foi realizada a modelagem hidrodinâmica da baía de São Marcos considerando os principais mecanismos de forçante na sua circulação: a influência das macromarés, a contribuição dos ventos e das vazões fluviais dos principais afluentes. Ademais, modelação bidimensional em planta (2DH) e tridimensional (3D) foi utilizada para avaliar a estrutura das correntes de acordo com a profundidade. Esta investigação tridimensional se torna relevante ao passo que, os valores de velocidade da corrente obtida por interferometria SAR são relativos às correntes superficiais e os dispositivos conversores de corrente são geralmente instalados em profundidades intermediárias, onde ocorre o decaimento da velocidade de superfície.

Simulações conduzidas no modelo M4S tiveram como principal objetivo determinar se condições ambientais usuais de vento e correntes e a influência dos parâmetros de radar permitem a obtenção de imagens SAR interferométricas adequados para realizar a interferometria *along-track* e, assim, detectar o campo de correntes da superfície oceânica (ou estuarina). Estas simulações, apresentadas no Capítulo 6, foram aplicadas também à baía de São Marcos e utilizaram dados ambientais do local e parâmetros de radar inspirados naquele embarcado no satélite alemão TerraSAR-X.

Finalmente, o Capítulo 7 teve como objetivo estabelecer o potencial energético das correntes, através da elaboração de mapas de densidade de energia derivados dos campos de corrente obtidos na modelagem hidrodinâmica com o SisBaHiA e na simulação da interferometria com o M4S. Além dos mapas de densidade energética, que indicam a variabilidade espacial das correntes e indicam os locais prioritários para a instalação de *arrays* de dispositivos conversores, também foram produzidos gráficos de séries temporais de energia das correntes.

8.2. CONCLUSÕES

A metodologia proposta neste trabalho para avaliação de locais adequados ao aproveitamento energético das correntes mostrou-se bastante realista, à medida que considera a circulação hidrodinâmica do corpo d'água, identificando áreas prioritárias para a instalação de conversores e não superestima o potencial das correntes a partir de simplificações encontradas nos métodos então propostos. Esta metodologia está baseada nas técnicas de interferometria *along-track* SAR e na modelagem hidrodinâmica para determinação do campo de correntes e sua variabilidade espacial e temporal e, por este motivo, pode ser considerada uma primeira abordagem no processo de decisão, mais prática e econômica, pois não estão associadas a dispendiosas campanhas de levantamento de dados *in situ*. Pelo contrário, estas técnicas identificam locais prioritários dentro de extensas áreas, por exemplo, passíveis de serem cobertas por uma imagem de satélite, visando à posterior medição *in situ*.

A interferometria *along-track* SAR apresenta-se como uma técnica promissora para medições de correntes superficiais oceânicas, o que pode ser constatado através de simulações com o modelo M4S, fornecendo excelentes valores de correlação e regressão para todos os casos simulados, variando parâmetros do radar e condições ambientais durante o imageamento. Para as melhores condições de imageamento ATI-SAR obtidas nas simulações do Capítulo 6, isto é, para maiores ângulos de incidência e ventos moderados, foram obtidos para os coeficientes de regressão entre a imagem de entrada e aquela simulada no M4S valores entre 0,89 e 0,91, enquanto que, para os coeficientes de determinação, foram obtidos valores entre 0,93 e 0,96.

Os níveis de precisão e acurácia obtidos nas simulações M4S para a baía de São Marcos tenderão a ser próximos daqueles que resultarão do processamento interferométrico com imagens *along-track* SAR reais obtidas pelo satélite. De acordo com experimentos que comparavam a precisão entre o processamento interferométrico de imagens sintéticas do TerraSAR-X e resultados de modelo de circulação para o estuário do Elba (ROMEISER *et al.*, 2007) e uma nova comparação entre seis imagens reais do TerraSAR-X com modelo de circulação também para o estuário do Elba (ROMEISER *et al.*, 2010), foi demonstrado que o coeficiente de correlação entre a simulação no M4S e o modelo de circulação foi de 0,98 e no segundo caso o coeficiente de correlação obtido foi de 0,88. Estes valores de correlação indicam que os campos de corrente derivados do ATI-SAR provenientes do modelo M4S são capazes de reproduzir aqueles produzidos através da interferometria com imagens SAR reais com bom nível de precisão.

Outro resultado importante deste trabalho foi a aplicação da metodologia de avaliação de locais favoráveis à exploração da energia das correntes na região da baía de São Marcos (Maranhão), solidificando as informações necessárias sobre o recurso energético e servindo de balizador para futuras iniciativas de aproveitamento das correntes no local ou em outras regiões similares do litoral norte brasileiro. Estudos preliminares sobre o potencial de extração da energia das correntes de maré foram elaborados, tomando como base valores de densidade energética estimados para alguns pontos da baía de São Marcos, conforme apresentado no Capítulo 7. Esses estudos consideraram a instalação de turbinas de eixo horizontal com 7 metros de diâmetro e 35% de eficiência, valor este obtido para outros conversores similares. A Tabela 14 apresenta a estimativa de geração das turbinas quando da instalação em diferentes pontos da baía de São Marcos. O ponto 4 está localizado próximo às instalações portuárias e o ponto 7 foi aquele que apresentou maiores densidades energéticas nos resultados do modelo hidrodinâmico.

Tabela 14: Estimativa de geração elétrica (kW) por cada turbina instalada em pontos da baía de São Marcos

Pontos	Densidade energética* (kW/m ²)	Diâmetro da turbina (m)	Eficiência total (%)	Potência elétrica (kW)
Pt 4	0,47	10	35	13
Pt 7	1,48	10	35	41

* Densidade energética média para o mês simulado

As estimativas de geração de energia a partir das correntes de maré na baía de São Marcos, apresentadas na Tabela 14, são bastante otimistas e apontam para a possibilidade de suprimento de eletricidade para a rede elétrica, sistemas isolados de comunidades ribeirinhas e, ainda, para aplicações industriais e portuárias, face à expansão da demanda por eletricidade e água potável (dessalinizada) dos portos e indústrias instaladas na área retroportuária do complexo de portos do Maranhão.

8.3. RECOMENDAÇÕES

A metodologia proposta é responsável pela identificação dos locais adequados à exploração da energia das correntes, fornecendo valores de potencial energético, mas não avalia a situação da circulação hidrodinâmica neste local após a instalação de dispositivos conversores de energia. Desta forma, podem ser incorporadas à metodologia proposta,

técnicas de medição e modelação da circulação das correntes após a implantação de projetos de geração de energia. Em QASSIM *et al.* (2009), os efeitos da circulação hidrodinâmica da baía de São Marcos antes e após a instalação idealizada de uma série de turbinas foram investigados através do modelo SisBaHiA. O monitoramento das correntes após a instalação das turbinas é desejável tanto do ponto de vista da geração de energia, como em relação a mudanças introduzidas no ambiente físico, tais como aspectos ecológicos, transporte de sedimentos e outros usos da água, a exemplo da navegação. Novamente, a técnica ATI-SAR é promissora para aplicação no monitoramento contínuo de projetos de energia das correntes.

Em relação à utilização da técnica ATI-SAR para detecção de correntes e para servir de apoio na identificação e no monitoramento de locais favoráveis à implantação da conversão da energia das correntes, é necessário que sejam definidas em quais condições relativas ao meio-ambiente e ao radar do sistema sensor são aqueles mais adequados. Neste trabalho, as simulações realizadas através do modelo M4S conduziram a conclusões e limitações da aplicação da técnica considerando condições ambientais da baía de São Marcos e características do radar inspiradas em satélites atualmente em órbita, como o TerraSAR-X. Estudos adicionais, envolvendo simulações para diferentes cenários e incluindo outros sistemas sensores, são recomendados para ampliar o conhecimento e estimular as capacidades promissoras desta técnica.

Outra recomendação para trabalhos futuros está relacionada ao processamento ATI-SAR de imagens reais obtidas por satélites atualmente em órbita. Conforme foi mencionado nas conclusões, é esperado que sejam obtidos níveis de precisão e acurácia na medição de correntes a partir da técnica ATI-SAR em imagens reais semelhantes aos resultados obtidos nas simulações com o M4S (Capítulo 6). Por se tratar de uma aplicação ainda não consolidada, a aquisição de imagens SAR interferométricas *along-track* reais dependerá da disponibilização destas pelas agências aeroespaciais e empresas que exploram cientificamente e comercialmente os produtos dos satélites. Também, conforme discutido anteriormente, a utilização destas imagens para medição de correntes superficiais oceânicas está associada a uma série de requerimentos da plataforma orbital, do sistema sensor (especialmente o arranjo das antenas) e as condições ambientais no instante do imageamento. No Anexo 2, são discutidas questões relativas aos sistemas sensores atuais e futuros capazes de produzir imagens ATI-SAR, assim como, as considerações que devem ser observadas durante o processo de aquisição destas imagens, tais como a frequência e polarização do radar, a direção e intensidade do vento, a sensibilidade da medição interferométrica entre outras.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFREDINI, P., HARARI, J., PEREIRA, J. E. R., “Estudo da circulação de maré na sub-área oceânica do Canal de Acesso de ponta da Madeira (MA), através de modelagem numérica”. *Boletim Técnico da EPUSP*, São Paulo, n. 19, 1995.

ALFREDINI, P., GARCIA, P. D., “Caracterização hidrodinâmica das correntes de maré na área portuária do Maranhão”. *Pesquisa Naval (SDM)*, Brasília, v. 18, pp. 39-44, 2005.

ALLEN, C. T., “Interferometric synthetic aperture radar”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter*, n. 96, pp. 6-13, set. 1995.

ALPERS, W. R., ROSS, D. B., RUFENACH, C. L., “On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar”. *Journal of geophysical research*, v. 86, n. C7, pp. 6481-6498, Jul. 1981.

ALPERS, W. R., HENNINGS, I., “A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar”, *J. Geophysical Research*, v. 89, n. C6, pp. 10529-10546, 1984.

BADDOUR, E., *Energy from waves and tidal currents towards 20yy ?*. In: Report of Institute for Ocean Technology, National Research Council, Canada, August 2004.

BEAULNE, P. D., GIERULL, C. H., LIVINGSTONE, C. E., SIKANETA, I. C., CHIU, S., GONG, S., QUINTON, M., “Preliminary design of a SAR-GMTI processing system for RADARSAT-2 MODEX data”,

BERR, Department for Business Enterprise & Regulatory Reform, *Assessment of performance for tidal energy conversion systems*. In: Report MRF/02/00008/01/REP URN 08/1154 Contractor European Marine Energy Centre Ltd, UK, 2008.

BROOKS, D. A., “The tidal-stream energy resource in Passamaquoddy-Cobscook Bays: A fresh look at an old story”, *Renewable Energy*, v. 31, pp. 2284-2295, 2006.

BRYDEN, I. G., COUCH, S. J., OWEN, A., MELVILLE, G., “Tidal current resource assessment”. In: *Proc. IMechE v. 221 Part A: J. Power and Energy*, 2007.

BLACK AND VEATCH Consulting Ltd. UK, *Europe and global tidal stream energy resource assessment*. In: Peer review issue 107799/D/2100/05/1, Carbon Trust, London, set. 2004.

BLUMBERG, A. F., MELLOR, G. L., “A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model”. *Three-Dimensional Ocean Models*, Ed., N. Heaps, Amer. Geophys. Union, pp. 208, 1987.

BLUNDEN, L. S., BAHAJ, A. S., “Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill”, *UK. Renewable Energy*, 31(2), pp. 121–132, 2006.

BLUNDEN, L. S., BAHAJ, A. S., “Tidal energy resource assessment for tidal stream generators”. In: *Proceedings of IMechE Vol. 221 Part A: J. Power and Energy*, 2007.

BROOKS, D. A., “The tidal-stream energy resource in Passamaquoddy–Cobscook Bays: A fresh look at an old story”. *Renewable Energy* v. 31, pp. 2284–2295, 2006.

CARBALLO, R., IGLESIAS, G., CASTRO, A., “Numerical model evaluation of tidal stream energy resources in the Ría de Muros (NW Spain)”. *Renewable Energy* v. 34, pp. 1517-1524, 2009.

CHARLIER, R. H., JUSTUS, J. R., *Ocean Energies*, ed. Elsevier Science Ltd., 1993.

CHARLIER, R. H., “Re-invention or Aggornamiento? Tidal Power at 30 years”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 1 n. 4, ed. Elsevier Science Ltd, 1997.

CHARLIER, R. H., “Sustainable co-generation from the tides: A review”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 7, ed. Elsevier Science Ltd, 2003.

COUCH, S. J., BRYDEN, I. G., “Large-scale physical response of the tidal system to energy extraction and its significance for informing environmental and ecological impact assessment”, In: *Proceedings of Oceans 2007 - Europe*, IEEE, Aberdeen, Scotland, 2007.

DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, “The proof of Betz’s Law”, *Wind Energy Manual*. Disponível em: <http://www.talentfactory.dk/en/stat/betzpro.htm>. Acessado em: ago. 2009.

DEAN, R. G., “Tides and harmonic analysis”. In: *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, Chapter 4, Ed. McGraw Hill Inc, pp. 222-230, 1966.

DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A., *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, ed. Prentice-Hall, 1984.

DEFNE, Z., HASS, K. A., FRITZ, H. M., “Numerical modeling of tidal currents and the effects of power extraction on estuarine hydrodynamics along the Georgia coast, USA”, *Renewable Energy* 36, pp. 3461-3471, 2011.

DEFNE, Z., HASS, K. A., FRITZ, H. M., “GIS based multi-criteria assessment of tidal stream power potential: A case study for Georgia, USA”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, pp. 2310–2321, 2011.

DHN, Marinha do Brasil, Brasil. Disponível em: www.mar.mil.br. Acessado em: abr. de 2007.

DYER, K. R., *Estuaries – A physical introduction*, 2º ed., ed. John Wiley & Sons ltd, Chichester, Inglaterra, 1997.

ELETROBRÁS, *Usina maremotriz – Estuário do Bacanga, projeto conceitual*, In: Relatório técnico Sondotécnica S.A., Brasil, 1980.

ELETROBRÁS, *Estado-da-arte de projeto e operação e usinas maremotrizes*, In: Relatório técnico Sondotécnica S.A., Brasil, 1981.

EL-ROBRINI, M., MARQUES, V. J., SILVA, M. A. M. A., EL-ROBRINI, M. H. S., FEITOSA, A. C., TAROUCO, J. E. F., SANTOS, J. H. S., VIANA, J. R., “Atlas de erosão e progradação da zona costeira do estado do maranhão - região amazônica: área oceânica e estuarina”. In: Dieter Muehe. (Org.). *Atlas de erosão e progradação da zona costeira brasileira*, ed. São Paulo, pp. 1-44, 2006.

EPRI, Methodology for estimating tidal current energy resources and power production by tidal in-stream energy conversion (TISEC) devices, In: EPRI-TP-001 NA Rev2, June 14, 2006.

ETSU, *Tidal stream energy review*. In: ETSU-T/05/00155/REP, 1993.

EUROPEAN COMMISSION, *Non Nuclear Energy – JOULE II, Wave energy project results. The exploitation of Tidal Marine Currents*. In: EU JOULE contract JOU2-CT94-0355, Technomare Spa, IT Power Ltd, 1996.

FEMAR, FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR, *Catálogo das estações maregráficas brasileiras*, FEMAR, Rio de Janeiro, 2000.

FERREIRA, R. M. S. A., ESTEFEN, S. F., “Conceptual design for Bacanga tidal power plant, Brazil”. In: *Ocean energy*, pp. 81-86, Bremerhaven, Alemanha, out. de 2006.

FERREIRA, R. M. S. A., 2007, *Aproveitamento da energia das marés. Estudo de caso: Estuário do Bacanga, MA*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FERREIRA, R. M. S. A., ESTEFEN, S. F., “Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions”, *Renewable Energy*, v. 34, pp. 1151-1157, 2009.

FERREIRA VIDIGAL, A. A., CUNHA, M. B., FERNANDES, L. P. C., MENDES, I. A., SILVA, N., OLIVEIRA, L. L., CUNHA JÚNIOR, O. B., ALBUQUERQUE, A. T. M., RODRIGUEZ, E. G., ALMEIDA, J. A. N., *Amazônia Azul, o mar que nos pertence*, ed. Record, pp.142-143, 2006.

FISSEL, D. B., JIANG, J., BIRCH, R., BUERMANS, J., LEMON, D., “Assessing the Site Potential for Underwater Turbines in Tidal Channels Using Numerical Modeling and Advanced Ocean Current Measurements”, In: *Proceedings of Oceans 2008*, IEEE, Quebec, Canada, 2008.

FOREMAN, M. G. G., “Manual for tidal heights analysis and prediction”. In: Pacific Marine Science Report, pp. 77-10, Sidney, British Columbia, Canada, 2004.

FRÖBERG, E., 2006, *Current Power Resource Assessment - A study of selected sites in Sweden and Norway*. M.Sc. thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden.

GOLDEN SOFTWARE INC., Surfer version 8.00 – Surface Mapping System. Software de geoprocessamento, Colorado, E.U.A., 2002.

GOLDSTEIN, R. M., ZEBKER, H. A., “Interferometric Radar Measurements of Ocean Surface Currents”, *Nature*, v. 328, n. 6132, pp. 707-709, aug. 1987.

GORLOV, A. M., "Tidal Energy," *Encyclopedia of Ocean Sciences*, Academic Press, London, pp. 2955-2960, 2001.

GOOGLE. Disponível em: www.google.com. Acessado em: Setembro de 2010.

HACKETT, B., RØED, L. F., GJEVIK, B., MARTINSEN, E. A., EIDE, L. I., "A review of the Metocean Modeling Project (MOMOP) Part 2: Model validation study", *Coastal and Estuarine Studies*, v. 47, pp. 307-327, 1995.

HENDERSON, F. M. *Open Channel Flow*, ed. MacMillan, 1966.

HASSELMANN, E., HASSELMANN, S., "On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a SAR image spectrum and its inversion", *Journal of Geophysical Research*, C96, pp.10.713–10.729, 1991.

HEIN, A., *Processing of SAR data: Fundamentals, Signal processing, Interferometry*, ed. Springer, Berlin Heidelberg, Germany, 2004.

ISAACS, J. D., SEYMOUR, R. J., "The ocean as a power resource", *Int. Journal of Environmental Studies*, v. 4(3), pp. 201-205, 1973.

JOHANNESSEN, O. M., SANDVEN, S., JENKINS, A., DURAND, D., PETTERSSON, L. H., ESPEDAL, H., EVENSEN, G., HAMRE, T., "Satellite earth observation in operational oceanography", *Coastal Engineering*, v. 41, pp. 155–176, 2000.

KIRKE, B., *Developments in ducted water current turbines*, 2005. Disponível em: www.cyberiad.net/library/pdf/bk_tidal_paper25apr06.pdf. Acessado em: ago. 2009.

LEWIS, A., ESTEFEN, S., HUCKERBY, J. *et al.*, "Ocean Energy". In: EDENHOFER O., R. PICHS-MADRUGA, R., SOKONA Y., *et al.* (eds), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, United States, 2011.

LIMA, S. L., SAAVEDRA, O. R., BARROS, A K., CAMELLO, N. J., "Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas". *5th Latin American congress: Electricity generation and transmission*, 16 – 20 nov. 2003, São Pedro, Brasil.

LIVINGSTONE, C. E., SIKANETA, I., GIERULL, C. H., CHIU, S., BEAUDOIN, A., CAMPBELL, J., BEAUDOIN, J., GONG, S., KNIGHT, T. A., “An airborne synthetic aperture radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 ground moving target indication (GMTI)”. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 28, n. 6, pp. 794–813, 2002.

MARANHÃO, Governo do Estado do, “Zoneamento ecológico e econômico”. Disponível em: www.zee.ma.gov.br. Acessado em: set. de 2006.

MARCHESIELLO, P., McWilliams J. C., Shchepetkin, A., “Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models”. *Ocean Modelling*, v. 3, pp. 1-20, 2001.

MATLAB, v. 6.0.0.88, release 12, The Mathworks Inc, 2000.

MENDONÇA, A., TEIXEIRA, A. T., “Tidal currents assessment in the Tagus estuary”. In: *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007.

MOCHEL, F. R., GUEIROS, B., ALCANTARA, E. H., “Caracterização geoambiental para a avaliação da sensibilidade a derrames de óleo na Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil”. In: *Anais do III Workshop Técnico-Científico Projeto Petrorisco*. Rede 05/01, CTPETRO/ FINEP/CNPq, 2004, Belém. Rede 05/01, CTPETRO/FINEP/CNPq. Natal, UFRN, 2004.

MONTES, M. L. (Org), *Zoneamento Geoambiental do Estado do Maranhão*, In: Diretrizes gerais para a ordenação territorial, IBGE, Salvador, BA, Brasil, 1997.

NOVO, E. M. L. M., *Sensoriamento remoto: Princípios e aplicações*, 3º ed., ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 2008.

ORLANSKY, J., “A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows”, *Journal Comput. Physics*, v. 21, pp. 251–269, 1976.

OWEN, A., BRYDEN, I. G., “Resource analysis on Pentland Firth”. Disponível em: <http://www.see.ed.ac.uk/~shs/Tidal%20Stream/Draft%20Pentland%20Firth%20Resource%20Assessment%20Paper.pdf>. Acessado em: Maio de 2010.

PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY, B., LENTZ, S., “Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE”. In: *Computers and Geosciences* 28, pp.929-937, 2002.

PEREIRA, J. E. R., *Modelagem numérica tri-dimensional da circulação na plataforma continental do Estado do Maranhão*. Dissertação de M.Sc. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

PEREIRA, J. E. R., HARARI, J., “Modelo numérico tri - dimensional linear da plataforma continental do Estado do Maranhão”, *Boletim do Instituto Oceanográfico*, , São Paulo, Brasil, v. 43, n. 1, pp. 11-26, 1995.

PEREIRA JR., A. O., SOARES, J., OLIVEIRA, R. G., QUEIROZ, R. P., “Energy in Brazil: Toward sustainable development?”, *Energy Policy*, v. 36, n. 1, pp. 73-83, jan. 2008.

PONTES, M. T., FALCÃO, A., “Ocean Energies: Resources and Utilization”. In: *18th Congress World Energy Congress*, Buenos Aires, Argentina, 2001.

QASSIM, R., ROSMAN, P. C. C., ROSMAN, P. A., SILVA, D., NZUALO, T., *Analyses of the effects of turbine array densities in the tidal currents in São Marcos Bay – MA*. In: Relatório 3 do projeto *Selecting sites for tidal current power extraction in Brazil*, PENO 11927, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, abr. 2009.

REBORDÃO, I. S. C., *Análise do potencial energético dos fluxos de maré no estuário do rio Lima*. Dissertação M.Sc., Instituto Superior Técnico, Lisboa Portugal, 2008.

ROMEISER, R., ALPERS, W., WISMANN, V., “An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface—Part I: Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data”, *J. Geophys. Res.*, v. 102, pp. 25237–25250, 1997.

ROMEISER, R., ALPERS, W., “An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface—Part II: Model response to surface roughness variations and the radar imaging of underwater bottom topography,” *J. Geophys. Res.*, v. 102, pp. 25251–25267, 1997.

ROMEISER, R., THOMPSON, D. R., “Numerical study on the along-track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents”, *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, 38-II, 446-458, 2000.

ROMEISER, R., THOMPSON, D. R., “Section 2: Fundamentals”. In: *KoRIOLiS - Study on concepts for Radar interferometry from satellites for Ocean (and Land) applications (In german: Studie zu Konzepten für Radar-Interferometrie über Ozeanen (und Land) im Rahmen zukünftiger Satellitenmissionen)*, 2002.

ROMEISER, R., Current measurements by airborne along-track InSAR: Measuring technique and experimental results, *IEEE J. Ocean. Eng.*, v. 30, pp. 552-569, 2005.

ROMEISER, R., BREIT, H., EINEDER, M., RUNGE H., FLAMENT, P., JONG, K. de, e VOGELZANG, J., “Current measurements by SAR along-track interferometry from a space shuttle”, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 43, 2315-2324, 2005.

ROMEISER, R., RUNGE, H., “Theoretical Evaluation of Several Possible Along-Track InSAR Modes of TerraSAR-X for Ocean Current Measurements”, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, v. 45, n. 1, jan.2007.

ROMEISER, R., RUNGE, H., SUCHANDT, S., SPRENGER, J., WEILBEER, H., SOHRMANN, A., STAMMER, D., “Current measurements in rivers by spaceborne along-track InSAR”, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing* 45, 4019-4030, 2007.

ROMEISER, R., SUCHANDT, S., RUNGE, H., STEINBRECHER, U., “High-resolution current measurements from space with TerraSAR-X along-track InSAR”, In: *Proc. Oceans 2009*, Bremen, pp. 1019-1023, IEEE, 2009.

ROMEISER, R., SUCHANDT, S., RUNGE, H., STEINBRECHER, U., “Analysis of first TerraSAR-X along-track InSAR-derived surface current fields”, In: *Proc. IGARSS 2009*, 4 pp., IEEE, 2009.

ROMEISER, R., SUCHANDT, S., RUNGE, H., STEINBRECHER, U., GRÜNLER, S., “First analysis of Terra-SAR-X along-track InSAR-derived current fields”, *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 48, 820-829, 2010.

ROMEISER, R., JOHANNESSEN, J., CHAPRON, B., COLLARD, F., KUDRYAVTSEV, V., RUNGE, H., SUCHANDT, S., “Direct surface current field imaging from space by along-track InSAR and conventional SAR”, In: BARALE, V., GOWER, J. F. R., ALBEROTANZA, L. (eds.), *Oceanography From Space, Revisited*, pp. 73-91, ed. Springer Science+Business Media, 2010.

ROMEISER, R., RUNGE, H., SUCHANDT, S., GRABER, H., “Status report on current measurements by TerraSAR-X along-track interferometric SAR”, In: Proc. *Living Planet 2010*, ESA Special Publication SP-686, 4 pp., European Space Agency, Noordwijk, Netherlands, 2010.

ROMEISER, R., RUNGE, H., SUCHANDT, S., GRABER, H., “Currents in rivers, coastal areas, and the open ocean from TerraSAR-X along-track InSAR”, In: *Proc. IGARSS 2010*, 4 pp., IEEE, 2010.

ROSMAN, P. C. C., “Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos”. In: *Métodos numéricos em recursos hídricos*, vol. 3, Ed. ABRH, 1997.

ROSMAN, P. C. C., “Modelos para recurso hídricos”. In: *Gestão ambiental de bacias hidrográficas*, MAGRINI, A., SANTOS, M. A. (eds). Rio de Janeiro, UFRJ, COPPE, Instituto Virtual de Mudanças Globais, 2001.

ROSMAN, P. C. C., *Referência Técnica do SisBaHiA*. PENO/COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

ROURKE, F. O., BOYLE, F., REYNOLDS, A., “Tidal energy update 2009”, *Applied Energy* 87, pp. 398–409, 2010.

RUNGE, H., SUCHANDT, S., BREIT, H., EINEDER, M., SCHULZ-STELLENFLETH, J., BARD, J., ROMEISER, R., “Mapping of tidal currents with SAR along track interferometry”. In: *Proceedings of IGARSS 2004*, Anchorage, AK, Estados Unidos, IEEE, 2004.

SCHWIDERSKI, E., “On charting global ocean tides”, *Review of geophysics and space physics*, v. 18, n. 1, pp. 243-268, fev. 1980.

SHUCHMAN, R. A., LYZENGA, D. R., MEADOWS, G. A., “Synthetic Aperture Radar imaging of ocean-bottom topography via tidal-current interactions: theory and observations”, *International Journal of Remote Sensing*, v. 6, pp. 1179-1200, 1985.

SIEGMUND, R., BAO, M., LEHNER, S., “First Demonstration of Surface Currents Imaged by Hybrid Along- and Cross-Track Interferometric SAR”, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, v. 42, n. 3, mar. 2004.

SILVA, A. C., ARAUJO, M., PINHEIRO, L. S., “Caracterização hidrográfica da plataforma continental do maranhão a partir de dados oceanográficos medidos, remotos e modelados”. *Rev. Bras. Geof.*, v. 25, n. 3, pp. 281-293, 2007.

SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. CAMARA, G., SOUZA, R. C. M., FREITAS, U. M., GARRIDO, J., *Computers & Graphics*, 20: (3) pp. 395-403, mai.-jun. 1996.

SOUZA, R. B. (ed), *Oceanografia por satélites*, 2º Ed, Oficina de textos, São Paulo, Brasil, 2008.

STEWART, H.B. (ed), *Proceedings of the MacArthur Workshop on the Feasibility of Extracting Useable Energy from the Florida Current*, Palm Beach Shores, FL, Estados Unidos, 27 Fev. – 1 Mar. 1974.

SUCHANDT, S., ROMEISER, R., RUNGE, H., LAWRENCE, J., STEINBRECHER, U., “Tidal Current Measurement Using the TanDEM-X Satellite Formation”, *Proceedings of 9th EWTEC 2011*, Southampton, Inglaterra, 5 Set - 9 Set. 2011.

TERRASAR-X, sítio oficial. Disponível em: <http://www.infoterra.de/terrasar-x-satellite>. Acessado em: fevereiro de 2011.

THOMPSON, D. R., “Calculation of microwave Doppler spectra from the ocean surface with a time-dependent composite model”. In: *Radar Scattering from Modulated Wind Waves*”, (eds) KOMEN G. J., OOST W. A., ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 27-40, 1989.

THOMPSON, D. R., JENSEN, J. R., “Synthetic aperture radar interferometry applied to ship-generated waves in the 1989 Loch Linnhe experiment”, *J. Geophys. Res.*, v. 98, pp. 10259–10269, 1993.

THOMPSON, D. R., LIVINGSTONE, 2000 “Moving target performance for RADARSAT-2”. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. IGARSS 2000, IEEE, Honolulu, HI, USA, 2000.

TOCARD, Projeto da Turbina Tocardo. Disponível em: <http://www.tocardo.com>. Acessado em: ago. de 2009.

TORRES JR., A. R., SILVA, M. P. R., SILVA, R. M., HOCHLEITNER, F. R., DECCO, H. T., LANDAU, L., ASSAD, L. P. F., MANO, M., “PIATAM – Uma parceria entre a petrobrás e instituições de pesquisa para o aumento do entendimento das questões ambientais na Amazônia”, *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, v. 1, n. 2-3, ago.-dez. 2007.

WALKINGTON, I., BURROWS, R., “Modelling tidal stream power potential”, *Applied Ocean Research*, v. 31, n. 4, pp. 239-245 out. 2009.

WALTON, T., *Tidal Velocity Asymmetry at Inlets*, In: Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note/ US Army Corps of Engineers ERDC/CHL CHETN-IV-47, jun. 2002.

ZEBKER, H. A., GOLDSTEIN, R. M., “Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations”, *J. Geophys. Res.*, v. 91, pp. 4993–4999, 1986.

ZEBKER, H. A., VILLASENOR, J., “Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing”, v.30, n.5, p.950-959, 1992.

ZIMMERMAN, J. T. F., “Dynamics, diffusion and geomorphological significance of tidal residual eddies”, *Nature*, v. 290, pp. 549 – 555, 16 April 1981.

ANEXO 1

ROTEIRO PARA TRANSFORMAÇÃO E CORREÇÃO DAS IMAGENS DE DIFERENÇA DE FASE INSAR EM VELOCIDADE DA CORRENTE SUPERFICIAL

A diferença de fase entre duas imagens SAR obtidas em curto intervalo de tempo por antenas dispostas na mesma direção de azimute do deslocamento da plataforma guardam uma medida do desvio Doppler causado pelo movimento do alvo. Desta forma, a detecção de correntes superficiais pode ser realizada através deste tipo de processamento, que computa as diferenças de fase ATI-SAR entre duas imagens adquiridas de uma região oceânica ou costeira (ROMEISER & THOMPSON, 2000). De acordo com a Figura 12, o processamento interferométrico primeiramente resulta em um interferograma, ou seja, a imagem de diferença de fase entre as imagens SAR iniciais. A Equação 21 relaciona a diferença de fase com a velocidade do alvo na mesma direção da linha de visada do radar. No caso de imageamento oceânico objetivando a detecção de correntes, alguns passos devem ser seguidos para o mapeamento da velocidade das correntes.

A partir da Equação 21, um fator de conversão entre as diferenças de fase (em radianos) para velocidade superficial (em m/s) é obtido. Este fator depende de parâmetros do radar como a frequência do radar, o ângulo de incidência e a *baseline* ATI entre as imagens adquiridas, que no caso dos resultados apresentados neste trabalho foram de $-0,02641 \text{ rad/m.s}^{-1}$ para 30° de ângulo de incidência e 1 metro de *baseline*, $-0,0317 \text{ rad/m.s}^{-1}$ para 60° e 1 metro de *baseline*, $-0,07923 \text{ rad/m.s}^{-1}$ para 30° e 3 metros de *baseline* e $-0,0953 \text{ rad/m.s}^{-1}$ para 60° e 3 metros de *baseline*.

No entanto, a velocidade obtida é relativa ao deslocamento da superfície oceânica na mesma direção de visada do radar e contém contribuições não só das correntes superficiais, mas, também, do movimento orbital das ondas. Conforme mencionado na página 124, para uma melhor compreensão dos movimentos causados pela propagação da onda e sua interação com a corrente superficial é desejável que se utilize fontes de dados externas ou simulação numérica da própria imagem e, de maneira iterativa, que se realizem as correções induzidas pelo movimento das ondas. Considerando um campo de ondas relativamente homogêneo, gerado pelo campo de ventos constante na entrada do M4S, haverá um *offset* entre as velocidades obtidas e aquelas causadas somente pela corrente. Este *offset*, relativo ao movimento das ondas, pode ser estimado em uma primeira aproximação pela ferramenta M4Squick, que fornece um valor singular de *offset* Doppler calculado somente devido ao efeito de ondas na ausência de correntes. Para as simulações com o vento de 6 m/s direção

NE, o *offset* da velocidade foi estimado em -0.96 m/s e para o vento de 6 m/s direção SE em -0,78 m/s.

Outra particularidade da técnica de detecção de correntes por ATI-SAR está relacionada ao fato de que a velocidade detectada é a componente na linha de visada do radar da velocidade absoluta da superfície oceânica. Essa limitação deve-se ao arranjo das antenas SAR, que estão alinhadas na direção azimutal da plataforma e possuem visada lateral, ou seja, a 90° da direção de azimute.

A direção absoluta das correntes para o caso de rios ou baías pode ser determinada, pois estas acompanham a morfologia do canal principal. De posse de um mapa batimétrico ou de um campo de correntes simulado em modelo hidrodinâmico, é possível computar o alinhamento do canal principal/correntes e, assim, estimar um fator de correção para a velocidade obtida pela técnica ATI-SAR. No caso de mar aberto, no qual as correntes são bidirecionais, novas tendências estão sendo avaliados por pesquisadores que poderão solucionar a limitação de direcionalidade, como novas configurações de antenas, de órbitas e de constelações de satélites, conforme apresentando no Anexo 2.

No caso deste trabalho, que foi aplicado à baía de São Marcos, um fator de correção pode ser determinado para obter em verdadeira grandeza as velocidades detectadas pela técnica ATI-SAR, apresentadas no Capítulo 6. O procedimento de correção para obter as velocidades absolutas da corrente, isto é, intensidade e direção, está baseado na premissa que a componente da velocidade na linha-de-visada do radar é proporcional entre o cosseno do ângulo formado pela direção do escoamento e a direção da visada do radar. Com o auxílio dos resultados do modelo hidrodinâmico, máscaras indicativas da direção do escoamento podem ser geradas para cada instante desejado. Para cada ângulo formado entre as direções das correntes e aquela de visada do radar, um fator de correção pode ser calculado tomando o inverso do cosseno do ângulo.

Na Figura 88 está apresentado o padrão de escoamento na baía de São Marcos para um instante simulado no SisBaHiA para a maré enchente. As direções da corrente de maré estão indicadas por vetores e, também, por isolinhas de cores. O fator de correção sugerido para transformar as velocidades obtidas pela técnica ATI-SAR em velocidades absolutas está indicado na legenda da direita. Quanto mais próximo da direção da visada do radar, mais precisa será a velocidade detectada pelo ATI-SAR, ao passo que, esta será subestimada quanto mais próxima sua direção estiver da direção de azimute. Considerando a direção azimutal do satélite TerraSAR-X, a precisão das velocidades em função dos ângulos formados com a direção da corrente está apresentada na Figura 89.

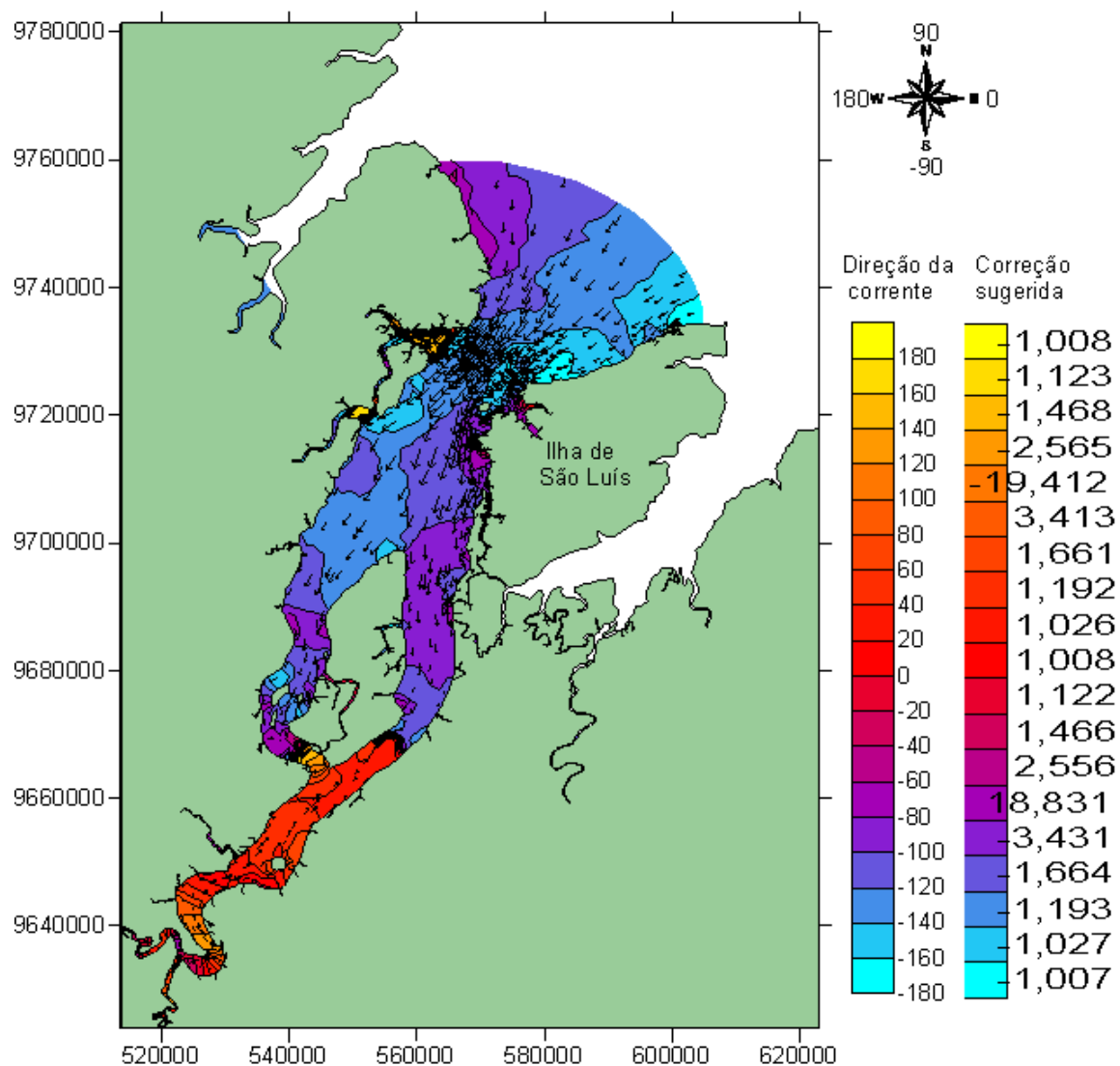


Figura 88: Padrão de escoamento na Baía de São Marcos com direções do vetor velocidade da corrente obtidas no SisBaHiA e fator de correção para velocidade absoluta

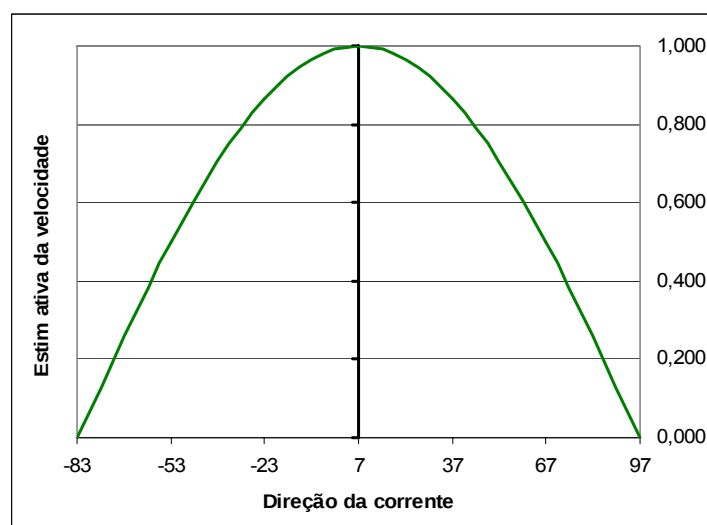


Figura 89: Estimativa da velocidade da corrente por ATI-SAR em função da direção da corrente, considerando o deslocamento do satélite TerraSAR-X

ANEXO 2

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SISTEMAS SENSORES E IMAGENS PRODUZIDAS PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA ATI-SAR

Atualmente, alguns satélites em órbita poderiam realizar a aquisição de imagens ATI-SAR como os alemães TerraSAR-X e TanDEM-X e o canadense Radarsat-2, assim como a constelação de satélites italiana COSMO-Skymed. Um dos requerimentos fundamentais para a interferometria *along-track* é a disposição das antenas de forma que o sensor realize duas aquisições quase simultâneas durante o sobrevôo do alvo na mesma direção de azimuth. Outros requisitos importantes são a frequência e polarização do radar, o ângulo de incidência, a distância da *baseline* ATI, a resolução espacial, o ruído equivalente do instrumento e as condições de vento durante o imageamento. No artigo de ROMEISER & THOMPSON (2000), a influência estes parâmetros de radar do sistema sensor no mecanismo de imageamento oceânico foi amplamente discutida, servindo de balizador para os limites de aplicação da técnica.

Em satélites dotados de antena em forma de *array*, esta pode ser particionada em duas metades para cumprir o duplo imageamento (*Dual receive antenna*) ou utilizar todo o *array* e alternar a transmissão com as duas recepções necessárias (*Alternate switching*) (Figura 90). O satélite TerraSAR-X realizou experimentalmente os modos *Alternate Switching* em 2008 e *Dual Receive* em 2009, produzindo imagens ATI-SAR para futuras investigações (ROMEISER, 2009). No canadense Radarsat-2, o modo *Dual Receive* é utilizado para a detecção de alvos em movimento através das técnicas ATI ou DPCA, sigla para deslocamento de fase do centro da antena (LIVINGSTONE *et al.*, 2002).

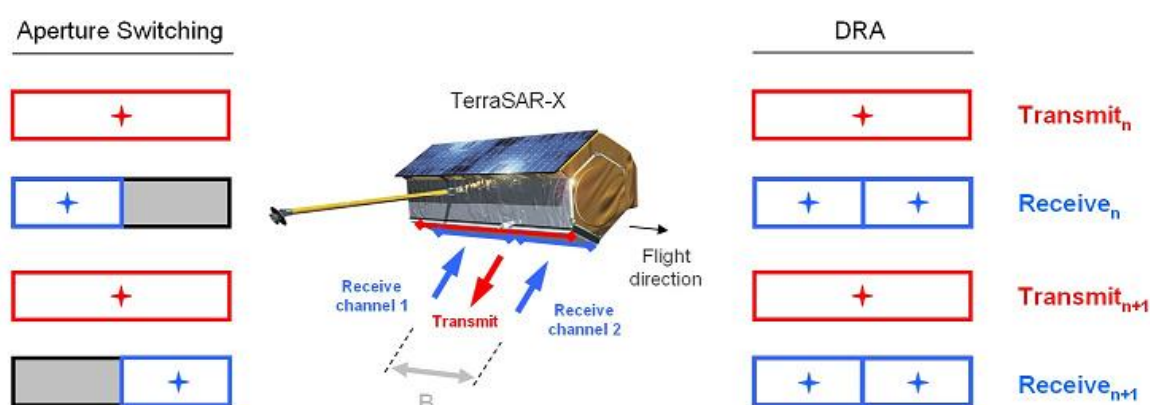


Figura 90: Modos de transmissão da antena AS e DRA do satélite TerraSAR-X
(Fonte: SUCHANDT *et al.*, 2005)

Em relação à constelação de satélites e configurações de órbita, as *baselines* XTI ou ATI podem ser conseguidas através do arranjo de uma constelação de satélites em órbitas diferentes. Alguns conceitos têm sido idealizados por pesquisadores como as missões

Tandem, no qual dois ou mais satélites sobrevoam em conjunto o mesmo alvo, formando uma maior *baseline* entre as antenas de cada um; o carrossel interferométrico, no qual a solução encontrada para a formação de *baselines* XTI de mesmo tamanho foi a utilização de três satélites com órbitas elípticas com o mesmo plano orbital (e então mesmo período de ciclo), porém com o eixo principal da órbita rotacionado em relação aos demais; e o pêndulo interferométrico, no qual os três satélites são arranjados em orbitas circulares com nos ascendentes e inclinações ligeiramente diferentes, formando *baselines* na direção horizontal. Uma vantagem relacionada a essas constelações é o fato de apenas um satélite possuir um sistema SAR convencional, chamado de mestre, enquanto os demais (satélites escravos) são equipados somente com uma antena receptora que aproveita a iluminação gerada pelo primeiro satélite. Os satélites escravos podem ser do tipo microsatélites, associados a um baixo peso e menores custos de fabricação e lançamento.

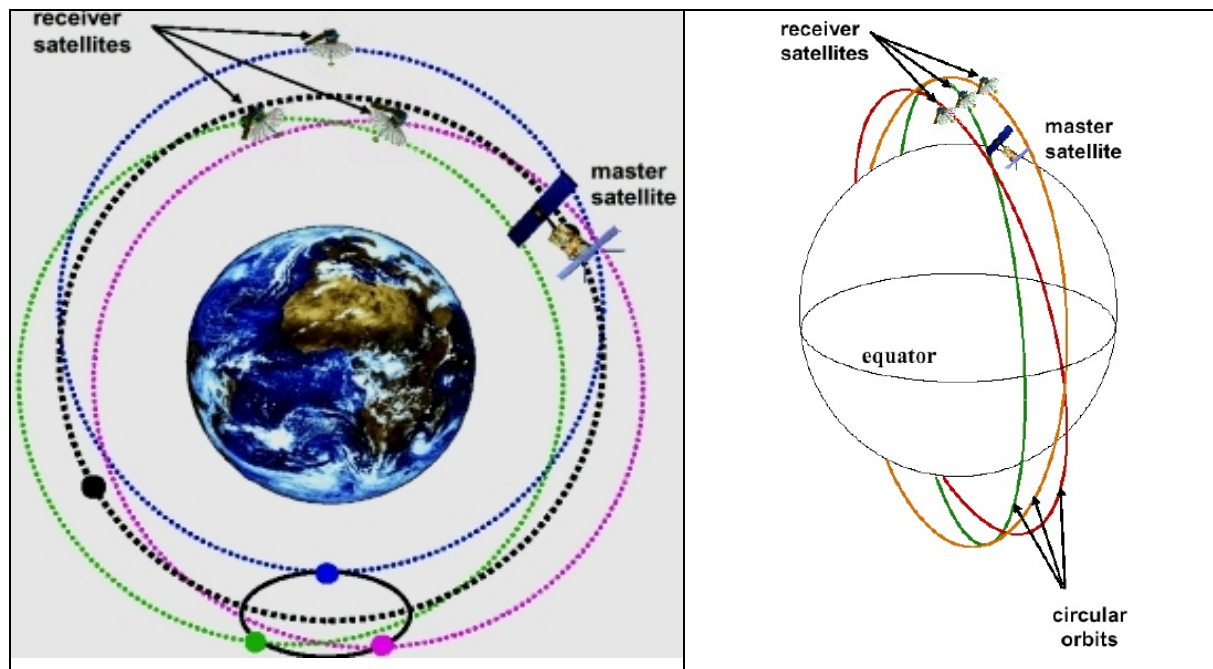


Figura 91: Constelações de satélites para interferometria (a) Carrossel interferométrico (b) Pêndulo interferométrico (Fonte: ROMEISER *et al.*, 2002)

Em relação ao sistema de radar, o tamanho da antena e seu esquema para o duplo imageamento definem a *baseline* ATI e, desta forma, a sensibilidade da medição do movimento dos alvos. A antena do tipo *array* ativo faseado do TerraSAR-X tem 4,8 metros de comprimento, o que resulta em 1,2 metros de distância entre os centros das duas metades da antena, quando está é particionada. A antena também *array* ativo do Radarsat-2 possui 15 metros de comprimento, que dividida em duas metades resulta em uma *baseline* ATI de 3,75 metros. Esta distância entre as antenas (*baseline*) associada a outros parâmetros de radar

como a frequência, polarização, resolução espacial, ruído do instrumento, condições de vento e ângulo de incidência e, também, o procedimento posterior de filtragem, irão determinar a sensibilidade da medição ATI, o que poderá ser investigada através de modelos numéricos a exemplo do M4S.

O comprimento da *baseline* requerida para a medição de corrente por ATI-SAR, conforme mostrado no Capítulo 2, está associado à sensibilidade da medição, ou seja, quanto maior esta dimensão, menores velocidades da corrente poderão ser detectadas. Entretanto, pode ser demonstrado que o processo de filtragem do ruído ATI, valendo-se da alta resolução espacial obtidas pelos sistemas SAR atuais e futuros, aumenta o SNR da imagem resultante, compensando em parte o curto e inadequado comprimento da *baseline* disponível em satélites atuais como o TerraSAR-X por exemplo.

Outros importantes parâmetros do sistema de radar, visando à aplicação da interferometria para a superfície oceânica, estão relacionados a um baixo nível de ruído, geralmente causado pela fase do *jitter* e ruído térmico do radar, a frequência do radar devem estar entre 1 e 10 GHz (bandas L até X), a polarização deve ser VV, por apresentar maiores valores de σ_0 (ROMEMEISER & THOMPSON, 2000) e frequência de repetição de pulso (PRF) é preferível os maiores valores possíveis do equipamento do ponto de vista do usuário, pois estaria associado a maiores índices de SNR nas imagens processadas.

No sentido de resolver a limitação da técnica ATI-SAR em medir as correntes unidimensionais na mesma direção de visada do radar, sistemas de radar que combinem a interferometria *across-track* (XTI) com a *along-track* (ATI) e sistemas de ATI redundantes como o *Dual-beam* ATI estão sendo investigados para a produção de campos de velocidade bidimensionais.

Em suma, sistemas de radar orbitais atuais são capazes de realizar o imageamento SAR *along-track* interferométrico, a exemplo do TerraSAR-X, TanDEM-X, Radarsat-2 entre outros, todavia apresentam limitações por não serem totalmente adequados para a medição de movimentos na superfície oceânica. Dentre essas não adequações pode ser citado o comprimento da *baseline* muito curto, associado a um baixo SNR, alto nível de ruído inerente do próprio instrumento e o fato do arranjo simples *along-track* permitir somente o imageamento da componente da velocidade na mesma direção da linha de visada do radar. Portanto, uma série de recomendações vem sendo realizadas por pesquisadores envolvidos na potencial aplicação da técnica ATI-SAR, incluindo sugestões para sistemas sensores futuros de parâmetros mais adequados do radar, de espaçamento e arranjo das antenas e de constelações de satélites, que possam favorecer o emprego desta técnica para monitoramento oceânico e costeiro.